

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 мультиметра

Виконав:

студент 2 курсу, групи МВТ<sub>ЗМ</sub>-20-1

Гайворонський Д.Л.  
(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 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 Гайворонському Дмитру Леонідовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка методики калібрування мультиметра

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. Калібрування мультиметрів, амперметрів, вольтметрів цифрових універсальних, комбінованих та постійної напруги та струму, змінної напруги
2. Діапазон частот для змінної напруги від 10 до  $5 \cdot 10^7$  Гц
3. Діапазон частот для змінного струму від 10 до  $5 \cdot 10^5$  Гц.

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

- 4.1 Мультиметри, визначення та класифікація
- 4.2 Оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні вимірювальних приладів
- 4.3 Розробка методики калібрування мультиметрів
- 4.4 Висновки

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

5.1 Тема роботи; 5.2 Мультиметри, види та класифікація

5.3 Базовий алгоритм оцінювання невизначеності вимірювань;

5.4 Вимоги до оцінки невизначеності вимірювань в калібрувальних лабораторіях;

5.5 Проведення калібрування; 5.6 Основні методи калібрування

5.7 Розрахунок невизначеності вимірювань; 5.8 Форма протоколу калібрування

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
Основний розділ	доц. Козлов Ю.В.		

### 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 методики калібрування	15.11.2021 – 21.11.2021	
3	Написання пояснювальної записки	22.11.2021 – 28.11.2021	
4	Виконання графічної частини	29.11.2021 – 05.12.2021	
5	Представлення закінченої кваліфікаційної роботи на кафедрі	06.12.2021	

Дата видачі завдання 25 жовтня 2021 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

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

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської кваліфікаційної роботи містить 56 сторінок, 6 рисунків, 7 таблиць, перелік посилань з 14 назв.

Мета роботи – розробити методику калібрування мультиметрів.

У роботі розглянуті різновиди мультиметрів, їхні переваги та недоліки, рекомендації щодо вибору, позначення діапазонів вимірювань, управління режимами вимірювань та приєднання щупів.

У другому розділі проаналізовані основні положення міжнародного підходу до оцінювання характеристик точності вимірювань. Проведений аналіз основ теорії невизначеності вимірювань, досліджені алгоритми оцінювання невизначеностей, викладені оцінки кількісних результатів випробувань та форм подання невизначеностей вимірювань.

У третьому розділі розроблена методика калібрування мультиметрів постійної та змінної напруги та струму у діапазоні частот від 10 до  $5 \cdot 10^7$  Гц для змінної напруги та для змінного струму у діапазоні частот від 10 до  $5 \cdot 10^5$  Гц.

МЕТОДИКА КАЛІБРУВАННЯ, КВАЛІФІКАЦІЯ ПЕРСОНАЛУ,  
МУЛЬТИМЕТР, МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ,  
НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ВИМІРЮВАНЬ

## ABSTRACT

The explanatory note for the master's qualification work contains 56 pages, 6 figures, 7 tables, a list of references from 29 names.

The purpose of the work is to develop a method of calibrating multimeters.

The paper considers the types of multimeters, their advantages and disadvantages, recommendations for selection, designation of measurement ranges, control of measurement modes and connection of probes.

The second section analyzes the main provisions of the international approach to measuring the characteristics of measurement accuracy. The analysis of bases of the theory of uncertainty of measurements is carried out, algorithms of estimation of uncertainties are investigated, estimations of quantitative results of tests and forms of representation of uncertainties of measurements are stated.

In the third section the technique of calibration of multimeters of direct and alternating voltage and current in the frequency range from 10 to  $5 \cdot 10^7$  Hz for alternating voltage and for alternating current in the frequency range from 10 to  $5 \cdot 10^5$  Hz is developed.

CALIBRATION METHODS, PERSONNEL QUALIFICATION,  
MULTIMETER, METROLOGICAL CHARACTERISTICS, UNCERTAINTY  
OF MEASUREMENTS

## ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки.....	8
Вступ .....	9
1 Мультиметри, визначення та класифікація.....	10
1.1 Цифрові мультиметри.....	10
1.2. Аналогові мультиметри.....	11
1.3 Порівняння цифрових та аналогових мультиметрів.....	13
1.4. Сучасне поняття мультиметра.....	17
1.5 Висновки.....	21
2 Оцінювання невизначеності вимірювань при калібруванні вимірювальних приладів.....	22
2.1 Основні терміни і положення щодо оцінки невизначеності вимірювань.....	22
2.1.1 Визначення та класифікації.....	25
2.1.2 Базовий алгоритм оцінювання невизначеності вимірювань.....	29
2.2 Вимоги до оцінки невизначеності вимірювань в калібрувальних лабораторіях.....	32
2.3 Основні поняття калібрування.....	34
2.4 Основні методи калібрування.....	36
3 Розробка методики калібрування мультиметрів.....	38
3.1 Вимоги до кваліфікації персоналу.....	38
3.2 Обладнання та засоби калібрування.....	39
3.3 Умови калібрування.....	40
3.4 Підготовка до калібрування.....	40
3.5 Вимоги безпеки.....	41
3.6 Проведення калібрування.....	41
3.7 Розрахунок невизначеності вимірювань.....	44
3.8 Оформлення результатів калібрування.....	50
Висновки.....	51

Перелік джерел посилання.....	52
Додаток А. Форма протоколу калібрування.....	54
Додаток Б. Відомість кваліфікаційної роботи.....	56

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ВК – вимірювальний канал;

ВТ – вимірювальна техніка;

ГОСТ – міждержавний стандарт;

ДСТУ – національний стандарт України;

ЕД – експлуатаційний документ (настанова з експлуатації, паспорт, інструкція з експлуатації та інші);

ЕОМ – електронна обчислювальна машина;

ЗВТ – засоби вимірювальної техніки;

ІВС – інформаційно-вимірювальна система;

МЗ – метрологічне забезпечення;

МХ – метрологічні характеристики;

НД – нормативний документ. Документ, який встановлює вимоги, обов'язковий для виконання в визначених галузях діяльності, розроблений у встановленому порядку та затверджений компетентним органом;

ПК – персональний комп'ютер, допоміжний засіб для проведення вимірювань та виконання розрахунків.

## ВСТУП

Мультиметр – це багатофункціональний електровимірювальний прилад. Основне його призначення – вимірювання показників електричного сигналу. Функціонально мультиметр поєднує можливості амперметра, вольтметра, омметра та інших електровимірювальних приладів.

Це стандартний та поширений пристрій, що застосовується для вирішення різних завдань: діагностика та ремонт машин, монтаж та налагодження електросистем будівель та обладнання, виробництво електронної продукції, метрологічний контроль засобів вимірювання та інші.

Основні функції мультиметрів: вимірювання постійної та змінної напруги, вимірювання постійного та змінного струму, вимірювання опору, ємності та індуктивності.

Прості бюджетні моделі мають невеликий набір функцій, достатній для вирішення основних побутових завдань: перевірка провідників, продзвонювання ланцюга, вимірювання напруги в розетці або рівня заряду акумулятора автомобіля. Додаткові функції мультиметрів залежать від призначення приладу. Сучасні багатофункціональні моделі здійснюють тестування діодів та транзисторів, вимірювання частоти та температури. Професійні мультиметри здатні не тільки проводити прямі вимірювання, але й обчислювати ряд показників - коефіцієнт заповнення, провідність, дійсні середньоквадратичні значення.

Оскільки даний тип приладів дозволяє вимірювати всі основні параметри електричних сигналів, то це робить їх достатньо поширеними як серед висококваліфікованих спеціалістів так і серед звичайних радіоаматорів.

Росповсюдженість мультиметрів робить актуальною задачу розробки методики їх калібрування з метою визначення метрологічних характеристик.

## 1 МУЛЬТИМЕТРИ, ВИЗНАЧЕННЯ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ

Мультиметр (від англ. multimeter, тестер - від англ. Test випробування, авометр - від АмперВольтОмметр) - комбінований електровимірювальний прилад, що поєднує кілька функцій. У мінімальному наборі це вольтметр, амперметр та омметр.

Існують цифрові та аналогові мультиметри.

Мультиметр може бути як легким переносним пристроєм, що використовується для базових вимірювань та пошуку несправностей, так і складним стаціонарним приладом з багатьма можливостями.

Років двадцять тому найскладніший прилад цього типу міг вимірювати силу струму, напругу та опір (звідси й стара назва – авометр). І навіть незважаючи на загальну цифровізацію мультиметрів, їхні старші аналогові брати поки що не здали своїх позицій — у ряді випадків вони, як і раніше, незамінні (наприклад, для швидкої якісної оцінки параметрів або при вимірюваннях в умовах радіоперешкод). До того ж живлення їм потрібно тільки при вимірюванні опору, та й то не завжди, тому що деякі мультиметри мають для цих цілей вбудовану динамо-машину.

### 1.1 Цифрові мультиметри

Найбільш прості цифрові мультиметри мають розрядність 2,5 цифрових розрядів (точність зазвичай близько 10%). Найбільш поширені прилади із розрядністю 3,5 (точність зазвичай близько 1,0 %). Випускаються також трохи дорожчі прилади з розрядністю 4,5 (точність зазвичай близько 0,1%) і значно дорожчі прилади з розрядністю 5 і вище. Точність останніх сильно залежить від діапазону виміру та виду вимірюваної величини, тому обговорюється окремо для кожного піддіапазону. Загалом точність таких приладів може перевищувати 0,01%, незважаючи на портативне виконання.

Розрядність цифрового вимірювального приладу, наприклад, «3,5» означає, що дисплей приладу показує 3 повноцінні розряди, з діапазоном від 0 до 9, і 1 розряд — з обмеженим діапазоном. Так, прилад типу «3,5 розряду» може, наприклад, давати показання в межах від 0,000 до 1,999, при виході вимірюваної величини ці межі потрібно перемикання на інший діапазон (ручне або автоматичне).

Кількість розрядів не визначає точності приладу. Точність вимірювань залежить від точності АЦП, від точності, термо- та тимчасової стабільності застосованих радіоелементів, від якості захисту від зовнішніх наведень, від якості калібрування.

## 1.2 Аналогові мультиметри

Аналоговий мультиметр складається із стрілочного магнітоелектричного вимірювального приладу, набору додаткових резисторів для вимірювання напруги та набору шунтів для вимірювання струму. Вимір опору проводиться з використанням вбудованого або зовнішнього джерела.

Радянські аналогові мультиметри проводилися під шифром, що починається з літери Ц, через що широко поширилася їхня неофіційна назва "цешка".

Основні режими вимірювань:

- ACV - вимірювання змінної напруги (скор. від англ. alternating current voltage - досл. напруга змінного струму).
- DCV - вимірювання постійної напруги (скор. від англ. direct current voltage - досл. напруга постійного струму).
- DCA - вимір постійного струму (скор. від англ. direct current amperage - досл. сила струму постійного струму).
- $\Omega$  - Вимірювання електричного опору.

*Деякі мультиметри мають додаткові функції:*

- Продзвінок - вимірювання електричного опору зі звуковою (іноді і світловою) сигналізацією низького опору ланцюга (зазвичай менше 50 Ом).
- Генерація тестового сигналу найпростішої форми (гармонічну чи імпульсну) — як своєрідний варіант продзвонювання.
- Тест діодів – перевірка цілісності напівпровідникових діодів та знаходження їх «прямої напруги».
- Тест транзисторів - перевірка напівпровідникових транзисторів і, як правило, знаходження їх h<sub>21e</sub> (наприклад, тестери ТЛ-4М, Ц-4341).
- Вимірювання електричної ємності (Ц-4341).
- Вимірювання індуктивності (рідко).
- Вимірювання температури, із застосуванням зовнішнього датчика (як правило, термопара К-типу).
- Вимірювання частоти гармонійного сигналу.
- Вимірювання великого опору (зазвичай до сотень МОм; потрібен додатковий пристрій).
- Вимірювання великої сили струму (з використанням підключених/вбудованих струмових кліщів).

*І службові:*

- Автовимкнення живлення
- Підсвічування дисплея
- Фіксування результатів вимірювань (відображуване значення та/або максимальне)
- Автоматичне визначення меж
- Індикація розряду батареї
- Індикація навантаження
- Режим відносних вимірів

### 1.3 Порівняння цифрових та аналогових мультиметрів



Рисунок 1. 1 – Аналоговий (а) та цифровий (б) мультиметр

Основною відмінністю аналогових мультиметрів від цифрових для споживача є спосіб виводу результатів вимірів. У цифровому, результати вимірів виводяться на дисплей (рис.1.1, б) та відображаються цифрами. Аналоговий же мультиметр виводить результати вимірів **стрілкою** на багатофункціональній шкалі (рис.1.1, а). Попри такі розбіжності, принципи користування обома видами приладів однакові.

Для вимірювання напруги та струмів, як постійних так і змінних, аналогові мультиметри не потребують живлення. Вони працюють як звичайний шкільний вольтметр чи амперметр. Виводячи результати виміру на шкалу пристрою за допомогою стрілки. Живлення таким приладам потрібне лише в режимі виміру опорів. Цифровий мультиметр потребує

живлення завжди, адже це досить складний пристрій, всередині якого реалізована електронна схема аналого-цифрового перетворювача. Тобто, аналогові сигнали зазнають перетворення, для того щоб показати їх у цифровому вигляді. Саме для такої електронної начинки і потрібне джерело живлення.

Слід також знати, що аналогові мультиметри здатні правильно працювати (*переважно*) лише у горизонтальному положенні. На цифрові – така вимога не розповсюджується. Ще, не забувайте, аналогові мультиметри бояться різких ударів, падінь – може вийти з ладу досить ніжний **мікроамперметр** (*механізм, який перетворює рівень сигналу на рух стрілки*). Та й до шкали аналогового приладу слід призвичаїтися.

Ще одна суттєва деталь про яку я ледь не забув сказати. Практично будь-який цифровий мультиметр здатен *автоматично визначити полярність поданого потенціалу*. Якщо ви переплутаєте полярність приєднання щупів до джерела потенціалу на шкалі цифрового мультиметра ліворуч з'явиться знак "-", а от тестер відреагує на таке – падінням стрілки у протилежний бік на обмежувачі. Тобто у випадку з цифровим мультиметром вам слід прочитати інформацію і скоригувати її відповідно до вказівки про обернену полярність, а у тестері доведеться міняти місцями щупи.



Рисунок 1.2 – Перемикач режимів роботи мультиметра

Більш дорогі моделі цифрових приладів (рис.1.2) можуть мати додаткові кнопки, скажімо кнопку керування живленням, кнопки увімкнення різноманітних додаткових функцій та ін. Якщо звернете увагу на це фото, то помітите, що його центральний перемикач вибирає лише режим. Межі виміру встановлюються автоматично. Це мультиметр класу "автомат". Жовта його кнопка, це кнопка керування живленням "POWER", блакитна – підсвічування шкали. А ще подібні прилади мають функцію автоматично вимкнення живлення через певний проміжок часу, звісно, якщо приладом не користуються.

Відверто кажучи перемикач режимів та вибору діапазону аналогового мультиметра УХ-360TR не є показовим, різновидів тестерів дуже багато, вони відрізняються методом вибору діапазону та режиму виміру, на відміну від цифрових, де все більш-менш схоже. Для зразку наведу декілька прикладів:

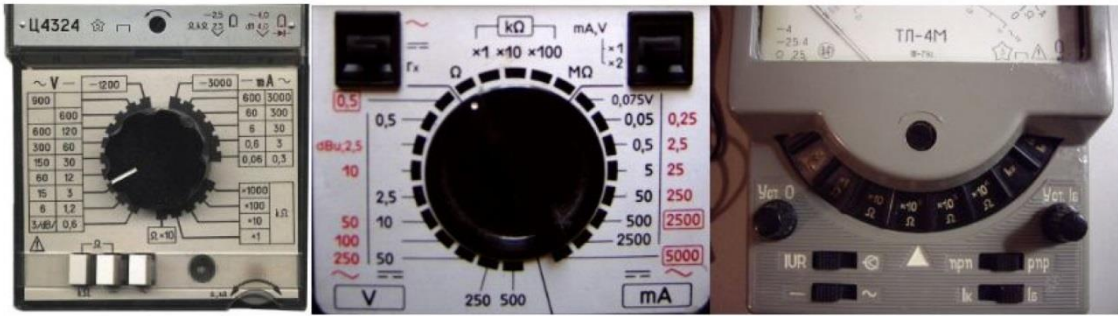


Рисунок 1. – Перемикачі режимів роботи різних мультиметрів

Основна маса дешевших моделей цифрових мультиметрів не має функції авто-вимкнення живлення. За цим потрібно слідкувати самостійно, якщо ви забудете вимкнути живлення, батарейка приладу *втратить здатність забезпечувати прилад енергією* (сяде). Для вимикання такого приладу існує положення центрального перемикача "OFF", а от вмикається він автоматично при переведенні перемикача у будь-яке інше положення. Як я вже казав, живлення аналоговому мультиметру потрібне лише в режимі виміру опорів, тому будь який інший режим вважається таким, що не споживає енергії, втім, слід себе привчити теж переводити перемикач у нейтральне положення "0", або "OFF".

У мультиметрів з автоматичним вибором межі виміру, обирається лише режим, а діапазон визначається автоматично відповідно до внутрішньої логіки. Тобто перемикачем слід обирати лише необхідний режим виміру.

Щоб виміряти мультиметром який-небудь параметр – слід приєднати його до об'єкту виміру. Для цього у мультиметрів є дрти зі щупами, які встромляються у відповідні гнізда.



Рисунок 1. Гнізда для приєднання дротів зі щупами

#### 1.4 Сучасне поняття мультиметра

Тепер поняття «мультиметр» точніше відбиває призначення цього багатофункціонального приладу. Число наявних різновидів настільки велике, що кожен інженер може знайти прилад, який точно відповідає його специфічним вимогам як за видом і діапазоном вимірюваних величин, так і за набором сервісних функцій. Крім стандартного набору величин (напруги та сили постійного та змінного струму, а також опору) сучасні мультиметри дозволяють вимірювати ємність та індуктивність, температуру (за допомогою внутрішнього датчика або зовнішньої термопари), частоту (Гц та об/хв), а також шпаруватість, тривалість імпульсів та інтервали між імпульсами у разі імпульсного сигналу. Майже всі вони можуть здійснювати продзвонювання (перевірку цілісності ланцюга з подачею звукового сигналу при його опорі

нижче за певну величину). Дуже часто в них реалізовані такі функції, як перевірка напівпровідникових приладів (падіння напруги на рп-переході, коефіцієнт посилення транзисторів) та генерація простого тестового сигналу (зазвичай меандр певної частоти). Багато останніх моделей мають обчислювальні можливості та графічний дисплей для відображення форми сигналу, щоправда, з невисокою роздільною здатністю.

Серед сервісних функцій особливу увагу привертає таймер вимкнення живлення і досить рідко зустрічається, але часом незамінне підсвічування дисплея. Популярністю користується автоматичний вибір межі виміру - у більшості останніх моделей мультиметрів перемикач режиму служить лише для вибору вимірюваної величини, а межа виміру прилад визначає сам. Деякі прості моделі взагалі не мають такого перемикача. Варто зазначити, що в ряді випадків подібна «розумна» поведінка приладу може завдавати незручностей.

Дуже корисна фіксація (утримання) показань. Найчастіше вона проводиться при натисканні відповідної клавіші, але деякі прилади дозволяють автоматично фіксувати будь-який стабільний та відмінний від нуля вимір. Іноді фіксація можлива для короткочасних замикань або розмикань ланцюга (тригер) у режимі продзвонювання.

Потужні цифрові процесори дозволяють обчислювати справжнє середньоквадратичне значення сигналу, що вимірюється, з урахуванням або без урахування вищих гармонік. Такі прилади коштують дорожче, але вони годяться для діагностики проблем у силових мережах з нелінійними навантаженнями. Справа в тому, що звичайні цифрові мультиметри вимірюють середнє значення сигналу, але, виходячи з припущення про строгу синусоїдальну форму вимірюваного сигналу, вони відкалібровані для відображення середньоквадратичного значення. Таке припущення призводить до помилок у випадках, коли вимірюваний сигнал має іншу форму або є суперпозицією кількох синусоїдальних сигналів або синусоїди

та постійної складової. Розмір помилки залежить від форми сигналу і може бути суттєвим (десятки відсотків).

Цифрова обробка результатів вимірювань вимагається набагато рідше: при утриманні максимальних (пікових) значень, при перерахуванні значень за законом Ома (наприклад, на відомому резисторі вимірюється напруга, а відображається розрахований струм), при відносних вимірах з обчисленням дБ, а також при запам'ятовуванні кількох вимірювань з обчисленням середньої величини за кількома відліками.

Для інженерів важливе значення мають такі характеристики мультиметрів, як роздільна здатність та точність. Прямої залежності між ними немає. Роздільна здатність залежить від розрядності АЦП і числа знаків, що відображаються на дисплеї (зазвичай 3,5; 3,75, 4,5 або 4,75 — для носіння, і 6,5 — для настільних). Але скільки б не мав знаків дисплей, точність визначатиметься характеристиками АЦП мультиметра та алгоритмом обчислень. Зазвичай похибка вказують у відсотках від вимірюваної величини. Для мультиметрів вона знаходиться в межах від 0,025 до 3%, залежно від виду вимірюваної величини і класу приладу.

Деякі моделі мають одночасно стрілочний та цифровий індикатори. Дуже зручний індикатор з двома цифровими шкалами для відображення другої величини, що одночасно вимірюється або обчислюється в ході вимірювання. Але ще корисніше індикатор, де разом із цифровою є аналогова (стовпцева) шкала. Зазвичай у цифрових мультиметрах використовуються порівняно повільні, але точні та стійкі до перешкод АЦП, де реалізовано метод подвійного інтегрування. Тому інформація на цифровому дисплеї оновлюється досить повільно (не частіше 4 разів на секунду). Стовпчикова діаграма зручна для швидкої якісної оцінки вимірюваної величини - вимірювання проводиться з невисокою точністю, але частіше (до 20 разів на секунду).

Нові мультиметри з графічним дисплеєм передбачають можливість

відображення форми сигналу, тому з невеликою натяжкою їх можна віднести до найпростіших осцилографів. Таким чином, мультиметр як би вбирає в себе властивості дедалі більшої кількості приладів. Більш того, деякі мультиметри можуть працювати під керуванням комп'ютера і передавати на нього результати вимірювань для подальшої обробки (різновиди, що носяться, зазвичай через інтерфейс RS-232, а настільні - по GPIB).

З погляду конструктивного виконання, мультиметри досить консервативні. За винятком особливого, що випускається у вигляді щупа різновиду, основні відмінності складаються у розмірі дисплея, вигляді органів управління (клавіші, перемикач, дисковий перемикач), тип елементів живлення. Головне, щоб обраний прилад відповідав передбачуваним умовам експлуатації, а його корпус забезпечував достатній захист (вологобризгозахист, ударостійкий пластик, футляр).

Ще більше значення має захист входів мультиметра та його електробезпека (захист від ураження електрострумом при попаданні на входи високої напруги). Інформація про електробезпеку зазвичай чітко вказується в інструкції та на корпусі приладу. Згідно з міжнародним стандартом IEC1010-10, з точки зору електробезпеки мультиметри діляться на чотири класи: CAT I - для роботи з низьковольтними ланцюгами електронних вузлів, CAT II - для локальних ланцюгів живлення, CAT III - для розподільних ланцюгів живлення в будинках, та CAT IV - для роботи на аналогічних ланцюгах поза будинками. Захист входів має не меншу важливість (хоча дані про неї не настільки докладні) - найчастіше мультиметри виходять з ладу при перевищенні дозволеної сили струму, при короткочасних викидах напруги та при підключенні включеного в режимі вимірювання опору приладу до ланцюгів під напругою. Для того щоб запобігти цьому, входи мультиметрів можуть захищатися різними способами: електронним або електромеханічним (термозахист), за допомогою звичайного запобіжника або комбінованим. Електронний захист більш ефективний, оскільки він характеризується

широким діапазоном, універсальністю, швидкістю спрацьовування і відновлення.

Вибираючи мультиметр, не варто забувати про аксесуари до нього. Проводи повинні бути максимально гнучкими, а закладення в щупи та вилки виконане з використанням захисних гумових втулок. У разі потреби вимірювання струму або температури вам знадобляться струмові кліщі або температурні пробники. Якщо мультиметр застосовуватиметься в промислових умовах, то має сенс придбати захисний гумовий черевик або поясну сумку. Потрібно поцікавитися і тим, на який час роботи розраховані батареї, а також задуматися, чи не варто вибрати прилад із живленням від акумуляторів.

## 1.5 Висновки

Мультиметр цифрові - універсальні вимірювальні прилади, що виконують комплекс функцій. Мультиметри призначені для вимірювання постійного струму, напруги постійного та змінного струму, опору, тестування діодів, перевірки цілісності ланцюга. Більш досконалі модифікації приладів виконують також додаткові функції: вимірюють змінний струм, індуктивність, ємність, частоту, деякі моделі здатні виміряти шпаруватість.

Існують також мультиметри для вимірювання температури об'єкта та моделі мультиметрів, що мають можливість запам'ятовування результатів або утримання поточного показання. Більшість приладів мають індикацію розрядження батареї та індикацію перевантаження.

## 2 ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ КАЛІБРУВАННІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

2.1 Основні терміни і положення щодо оцінки невизначеності вимірювань

### 2.1.1 Визначення та класифікації

Невизначеність вимірювань ненегативний 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.

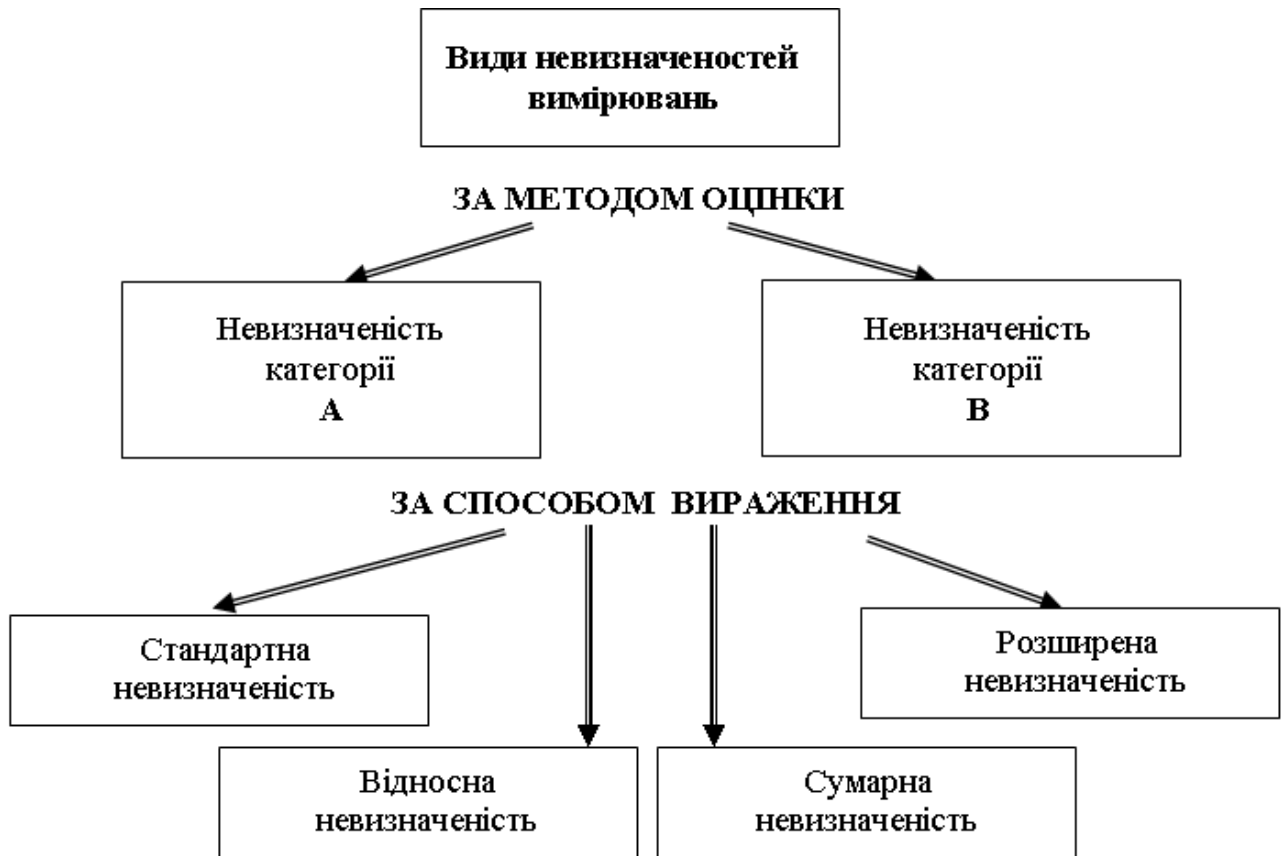


Рисунок 2.1 – Класифікація невизначеності вимірювань

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 - коефіцієнт, що відповідає прийнятним законам розподілу в середині кордонів НСП.

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

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

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

#### 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.

$$Y = bX_1^{q_1} X_2^{q_2} \dots X_m^{q_m}$$

$$c_i = a_i y / x_i$$

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  $Q_1, 1 = 1, 2, \dots, L$  (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

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

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 Стьюдента 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 Стьюдента 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  $v_{eff}$ , довірна 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, калібрувальною 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 помилковою званою «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, використовувани 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 (повірки) 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 проведенням в лабораторії калібрування;
- задаються замовником або (якщо не задаються) вибираються калібрувальною лабораторією;
- повинні підходити для використання за призначенням і бути достовірними.

У розділі проаналізовані основні положення міжнародного підходу до оцінювання характеристик точності вимірювань. Проведений аналіз основ теорії невизначеності вимірювань, досліджені алгоритми оцінювання невизначеностей, викладені оцінки кількісних результатів випробувань та форм подання невизначеностей вимірювань.

### 3 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ КАЛІБРУВАННЯ МУЛЬТИМЕТРІВ

Дана методика повинна визначати порядок калібрування мультиметрів, амперметрів, вольтметрів цифрових універсальних, комбінованих та постійної напруги та струму, змінної напруги у діапазоні частот від 10 до  $5 \cdot 10^7$  Гц та змінного струму у діапазоні частот від 10 до  $5 \cdot 10^5$  Гц.

Метод (принцип) вимірювання: прямі виміри.

Найкращі вимірювальні можливості калібрувальної лабораторії (КЛ) при проведенні калібрування засобів вимірювальної техніки за цією методикою відповідно до сфери акредитації КЛ наведені в таблиці 1.1:

Таблиця 1.1

Устаткування (об'єкт калібрування)	Назва вимірюваної величини	Діапазон вимірювання	Розширена невизначеність вимірювань $U$ ( $k=2$ )
Амперметри, вольтметри цифрові універсальні, мультиметри	Сила струму постійного	$(1 \cdot 10^{-7} - 30)$ А	$(1,4 \cdot 10^{-10} - 4,4 \cdot 10^{-3})$ А
	Сила струму змінного	$(2 \cdot 10^{-5} - 30)$ А	$(8 \cdot 10^{-9} - 1,2 \cdot 10^{-2})$ А
	Напруга постійного струму	$(1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^3)$ В	$(6 \cdot 10^{-7} - 3,5 \cdot 10^{-3})$ В
	Напруга змінного струму	$(1 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^3)$ В	$(10,8 \cdot 10^{-6} - 5,2 \cdot 10^{-1})$ В

#### 3.1 Вимоги до кваліфікації персоналу

Персонал, який проводить калібрування за цією методикою, відповідно до вимог ДСТУ ISO/IEC 17025 повинен бути компетентний, атестований на право виконання калібрування за видом вимірювань ЕМ (електрика та магнетизм) та уповноважений керівником КЛ на проведення калібрування, складання протоколів та сертифікатів калібрування, готування думок та тлумачень, надання звітів щодо відповідності обладнання встановленим вимогам та керування устаткуванням конкретних типів згідно з цією методикою.

Персонал, відповідальний за результати, викладені в протоколі калібрування, повинен мати відповідну кваліфікацію, підготовленість, досвід та задовільні знання, володіти знанням основних вимог, що містяться в законодавстві та стандартах, і дотримуватись вимог цієї методики.

### 3.2 Обладнання та засоби калібрування

При проведенні калібрування необхідно використовувати еталони з метрологічними характеристиками, наведеними у таблиці 3.1, або аналогічні.

Таблиця 3.1

Назва еталону	Діапазон вимірювання	Метрологічні характеристики	Примітка
Багатофункціональний калібратор Transmille 3041A	0 – 1020 В	- $U = (6 \cdot 10^{-7} - 3,5 \cdot 10^{-3})$ В ~ $U = (10,8 \cdot 10^{-6} - 5,2 \cdot 10^{-1})$ В 40 Гц– 500 кГц	
	0 – 30 А	- $U = (1,4 \cdot 10^{-10} - 4,4 \cdot 10^{-3})$ А ~ $U = (8 \cdot 10^{-9} - 1,2 \cdot 10^{-2})$ А 40 Гц– 500 кГц	
Прилад для повірки вольтметрів В1-16	Від 100 мкВ до 3 В Від 10 Гц до 500 кГц Від 1МГц до 50 МГц	$U = (3 \cdot 10^{-5} - 0,017)$ В $U = (2,3 \cdot 10^{-10} - 1,2 \cdot 10^{-4})$ Гц $U = (2,3 \cdot 10^{-4} - 1,2 \cdot 10^{-2})$ Гц	

Метрологічні характеристики допоміжних ЗВТ, які використовуються при калібруванні наведені у таблиці 3.2, або аналогічні.

Таблиця 3.2

Назва та позначення ЗВТ	Діапазон вимірювання	Метрологічні характеристики	Примітка
Стабілізатор напруги СНОПТ-4,5	220 В 50 Гц	$U = 12,72$ В $U = 0,87$ Гц	
Барометр-анероїд метеорологічний БАММ-1	80 – 106 кПа	$U = 0,12$ кПа	
Термогігробарометр Testo 610	Мінус 10 – 60° С 0 – 100 %	$U = 0,29$ °С $U = 2,8$ %	
Мультиметр Escort-2020	220 В; 50 Гц	$U = 2,78$ В; $U = 7,2 \cdot 10^{-3}$ Гц	

### 3.3 Умови калібрування

Під час калібрування у лабораторії повинні бути забезпечені умови, наведені у таблиці 3.3:

Таблиця 3.3

Параметр	Значення параметру
Температура повітря (довкілля), °C	$20 \pm 5$
Відносна вологість повітря, %	30 – 80
Напруга живлення мережі, В	$220 \pm 20$
Частота, Гц	$50 \pm 5$
Атмосферний тиск, кПа.	$100 \pm 4$

Температура та вологість повітря у лабораторії підтримується спліт-системою «Samsung». Середня температура, відносна вологість та атмосферний тиск повинні бути проконтрольовані та занесені до протоколу калібрування.

Напруга та частота мережі забезпечується стабілізатором напруги та частоти у діапазоні, наведеному у таблиці 7.1.

### 3.4 Підготовка до калібрування

Переконайтесь у виконанні усіх вимог п.1 даної методики.

Перед проведенням калібрування цифрових ЗВТ, які підлягають калібруванню, еталон та допоміжні ЗВТ повинні бути приведені у робочий стан згідно з ЕД на ці прилади та витримані протягом восьми годин на робочому місці.

Прилад включають в мережу та прогрівають для встановлення робочого режиму згідно ЕД.

Провести контроль напруги мережі живлення за допомогою мультиметра Escort-2020. Переконайтесь, що виміряне значення напруги та

частоти мережі живлення відповідає встановленим вимогам. Результат вимірювання занести до протоколу калібрування. (Додаток А)

### 3.5 Вимоги безпеки

При калібруванні цифрових ЗВТ повинні бути дотримані вимоги електричної безпеки згідно з «Правилами улаштування електроустановок», «Правилами технічної експлуатації електроустановок споживачів» та «Правилами техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів», а також вимоги безпеки, встановлені у відповідних розділах ЕД на ЗВТ, що калібруються, та в ЕД на калібрувальне устаткування.

### 3.6 Проведення калібрування

#### 3.6.1 Зовнішній огляд.

При проведенні зовнішнього огляду повинно бути встановлено відповідність приладу наступним вимогам:

- комплектність;
- прилад не повинен мати зовнішніх пошкоджень, що порушують або ускладнюють роботу приладу, та сторонніх предметів всередині приладу;
- чіткість фіксації положень перемикачів у всіх позиціях при збігу покажчика позиції з відповідними надписами на панелі приладу;
- відповідність маркування та надписів;

Якщо при зовнішньому огляді приладу було встановлено невідповідність хоча б по одному з перелічених за пунктом 3.6.1, калібрування призупиняють, невідповідності реєструють у протоколі переговорів із замовником за встановленою формою та проводять консультації з замовником, щоб отримати від нього подальші вказівки щодо

доцільності чи можливості проведення калібрування відповідно до процедури.

### 3.6.2 Прогрів цифрового ЗВТ

Прилад вмикається та прогрівається з метою встановлення робочого режиму протягом відповідного часу при навантаженні, що вказується в ЕД на прилади відповідного типу. Якщо час прогріву не передбачений ЕД, то виконується наступна операція калібрування.

Під час прогріву не повинно проводитись ніяких вимірювань та перемикань. Всі вимірювальні кабелі повинні бути від'єднанні.

### 3.6.3 Опробування цифрового ЗВТ

Під час випробування необхідно виконати регулювання та настройку цифрового ЗВТ. Підключення приладів та вибір вимірювальних режимів здійснюється згідно з ЕД на цифровий ЗВТ та ЕД на еталон.

На вхід приладу подати плавно регульований сигнал від еталону та перевірити працездатність усіх сегментів дисплею цифрового ЗВТ, а також працездатність цифрового ЗВТ в усіх діапазонах приладу.

Калібрування цифрового ЗВТ призупиняють, якщо:

- неможливе встановлення нульового значення (за умови, що встановлення нуля передбачено конструкцією приладу);
- неможлива робота в одному із передбачених режимів;
- відсутня індикація будь-якого сегменту дисплею.

У випадку, якщо за результатами опробування встановлено непрацездатність цифрового ЗВТ, калібрування призупиняють, невідповідність реєструють у протоколі переговорів із замовником за формою та сповіщають замовника письмово про неможливість проведення калібрування ЗВТ.

### 3.6.4 Проведення вимірювання

Для виконання калібрування необхідно провести серії вимірювань для кожної точки вимірювального діапазону, яка потребує калібрування. При виборі точок калібрування керуватись заявкою замовника.

Якщо замовник не зазначив у заявці кількість точок калібрування, то кожну серію вимірювань проводять не менше ніж при трьох значеннях вимірюваної фізичної величини (в трьох точках, рівномірно розподілених по шкалі приладу), включаючи верхню межу діапазону вимірювання.

Підключити цифровий ЗВТ до еталону у відповідності до схеми на рисунку 3.1.

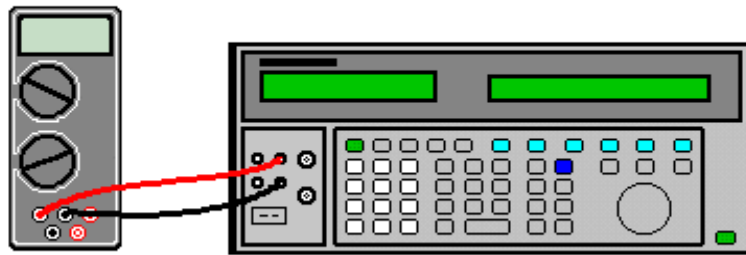


Рисунок 3.1 – Схема підключення цифрового ЗВТ

З клейм «voltage» або «current» калібратора підключити відповідно наругу або струм на роз'єми ЗВТ (при підключенні сили постійного струму або напруги, враховувати полярність). Встановити на еталоні та ЗВТ необхідні режими та діапазон для виконання калібрування потрібної точки.

Провести вимірювання. Для цього, з еталону подати точно встановлене значення та після встановлення значення на цифровому ЗВТ зчитати показання.

Вимірювання для кожної точки, що підлягає калібруванню, виконується не менше 10 разів. При виконанні вимірювань керуватись

вказівками ЕД на еталон та ЕД на відповідний цифровий ЗВТ, які задіяні в роботі.

Отримані показання (первинні данні) занести до протоколу калібрування за формою на ноутбук, що встановлений безпосередньо на робочому місці. За допомогою програми Excel розраховуються данні калібрування та заносяться до протоколу та сертифікату калібрування.

### 3.7 Розрахунок невизначеності вимірювань

Розрахунок невизначеності вимірювань проводити відповідно до вимог ЕА-4/02М.

Математична модель величини  $V_x$ , яка підлягає калібруванню, розраховується по формулі:

$$V_x = \bar{V}_x + \delta V_{en.} + \delta V_t + \delta V_{u,f} + \delta V_{np.} + \delta V_{em} \quad (3.1)$$

$\bar{V}_x$  – середнє арифметичне значення, величини що вимірюється;

$\delta V_{en.}$  – сумарна поправка, яка враховує вплив на еталон таких складових:

а) поправка, обумовлена впливом вологості повітря та атмосферним тиском;

б) поправка, яка враховує вплив вимірювальних кабелів при калібруванні.

$\delta V_t$  - поправка, обумовлена впливом температури навколишнього середовища;

$\delta V_{u,f}$  - поправка, обумовлена зміною напруги та частоти мережі живлення;

$\delta V_{np.}$  - поправка, що враховує відхилення пов'язане з роздільною здатністю приладу:

$$V_{np.} = 0,5 \cdot JS, \quad (3.2)$$

де  $JS$  – найменше значення, яке можливо зчитати на дисплеї приладу, що калібрується, найменше значення поділки (дискретність).

$\delta V_{em}$  - поправка, що враховує вплив еталону при вимірюваннях.

Обробка результатів калібрування та розрахунків невизначеності виконується за допомогою ПК.

Використовуючи раніше отримані дані, для кожної точки, яка потребує калібрування, розрахувати середнє арифметичне значення:

$$\bar{V}_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{xi}, \quad (3.3)$$

$V_{xi}$  – результат  $i$ -го вимірювання точки, що калібрується;

$\bar{V}_x$  - середнє арифметичне для кожної точки;

$n$  – кількість вимірювань.

Розрахувати складову невизначеності типу А для повторно вимірюваних величин (невизначеність від розсіяння вимірюваних значень).

Для цього розраховуємо експериментальне середньоквадратичне відхилення  $S(\bar{V}_x)$  за формулою:

$$S(\bar{V}_x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \left[ \sum_{i=1}^n [V_{xi} - \bar{V}_x]^2 \right]}, \quad (3.4)$$

де  $n$  – кількість вимірювань,

Дисперсія середнього:

$$s(\bar{V}_x)^2 = \frac{S(\bar{V}_x)^2}{n}, \quad (3.5)$$

Враховуючи попередні дії, розраховується стандартна невизначеність за типом А вимірювання від розсіяння вимірюваних значень:

$$u(\bar{V}_x) = s(\bar{V}_x) = \frac{S(\bar{V}_x)}{\sqrt{n}}, \quad (3.6)$$

11.5 Для точного уявлення розширеної невизначеності вимірювання розглянемо модель вимірювання у загальному вигляді. При калібруванні зазвичай мають справу тільки з однією вимірюваною величиною, яка

також зветься "вихідна величина  $Y$ ", яка залежить від кількості вхідних величин  $X_i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) через відношення:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N), \quad (3.7)$$

Функція моделі  $f$  описує одночасно процедуру вимірювання та метод оцінювання. Вона показує, як значення вихідної величини  $Y$  виходить із значень вхідних величин  $X_i$ . Оцінка вимірювальної величини  $Y$ , вихідна величина позначається як  $y$  виходить з рівняння (7) шляхом заміни вхідних величин  $X_i$  їх оцінками  $x_i$ . Тоді результат є наступною функцією:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N), \quad (3.8)$$

де  $y$  - оцінка вихідної величини,

$x_i$  - оцінка вхідної величини.

Стандартна невизначеність вимірювання, пов'язана з вихідною оцінкою або результатом вимірювання  $y$ , що позначається як  $u(y)$ , є стандартним відхиленням вимірюваної величини  $Y$ . Вона визначається з оцінок  $x_i$  вхідних величин  $X_i$  і пов'язаних з ними стандартних невизначеностей  $u(x_i)$ . Вхідні величини некорельовані – тобто незалежні одна від одної. Для некорельованих вхідних величин квадрат стандартної невизначеності, пов'язаний з оцінкою  $y$  вихідної величини в загальному вигляді визначається по формулі:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^n u_i^2(y), \quad (3.9)$$

де  $u_i(y)$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) - є внеском у стандартну невизначеність вимірювання, який пов'язаний з оцінкою  $y$  вихідної величини, який виходить при даній оцінці  $x_i$  вхідної величини  $X_i$  зі стандартної невизначеності вимірювання, пов'язаної з оцінкою наступною формулою:

$$u_i(y) = c_i u(x_i), \quad (3.10)$$

$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$  - коефіцієнти чутливості, пов'язані з вхідною величиною, як

приватні похідні, які показують, як пов'язані між собою вхідні величини.

Таким чином квадрат стандартної невизначеності, пов'язаної з оцінкою вихідної величини  $y$  з формули (9), набуває наступний вигляд:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i), \quad (3.11)$$

Отже стандартна невизначеність вимірювання в загальному вигляді буде виглядати так:

$$u(y) = \sqrt{c_1^2 u^2(x_1) + c_2^2 u^2(x_2) + \dots + c_i^2 u^2(x_i)}, \quad (3.12)$$

Враховуючи вплив усіх складових відповідно до математичної моделі для вимірювань, що проводяться в даному випадку, сумарна стандартна невизначеність вимірювання розраховується згідно формули:

$$u(y) = \sqrt{c_1^2 u^2(\overline{V}_x) + c_2^2 u^2(\delta V_{en}) + c_3^2 u^2(\delta V_i) + c_4^2 u^2(\delta V_{u,f}) + c_5^2 u^2(\delta V_{np.}) + c_6^2 u^2(\delta V_{em.})}, \quad (3.13)$$

де  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$  - коефіцієнти чутливості, що враховують взаємний вплив вхідних величин відповідно до моделі калібрування і являють собою приватні похідні.

В даному випадку прямих вимірювань вхідні величини незалежні одна від одної  $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6 = 1$ , так як часткова похідна від вхідної величини дорівнює:

$$c_1 = c_2 = c_3 = c_4 = c_5 = c_6 = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} = \frac{\partial U}{\partial u} = \partial U(u) = (U)' = 1, \quad (3.14)$$

$u(\overline{V}_x)$  - стандартна невизначеність вимірювання по типу А із-за розсіяння показань, що знімаються, за формулою (6),

$u(\delta V_{en.})$  - стандартна невизначеність вимірювання, що виникає від загального впливу на еталон. Це вплив вологості повітря, атмосферного тиску, а також вимірювальних кабелів еталону.

Значення вологості повітря у лабораторних умовах наведені в таблиці 3.3. За допомогою термогіробарометра Testo 610 та барометра-анероїда метеорологічного БАММ-1 виконується постійний контроль за параметрами довкілля.

Під час калібрування використовуються кабелі, які входять в комплект еталону та вплив яких врахований у сертифікаті на еталон.

Усі ці складові вже враховані виробником еталону в значенні  $U_{em}$ , що розраховано за формулою специфікації на еталон, за умови додержання всіх параметрів довкілля (таблиця 3.3), виконанні всіх режимів калібрування, прогріву та успішного проведення попереднього тестування. Якщо вимоги виробника під час калібрування виконані, приймаємо, що складова невизначеності від впливу відносної вологості та атмосферного тиску, та від впливу вимірюваних кабелів дорівнює нулю:  $u(\delta V_{en.}) = 0$ .

$u(\delta V_t)$  - стандартна невизначеність вимірювання, що виникає від впливу температури навколишнього середовища.

Температура у лабораторних умовах підтримується спліт-системою «SENSEI», а за допомогою термогіробарометра Testo 622 виконується постійний контроль за параметрами, забезпечуючи у приміщенні лабораторії значення, наведені в таблиці 3.3. Якщо ці умови виконуються, то вплив цієї складової приймаємо рівним нулю:  $u(\delta V_t) = 0$ .

$u(\delta V_{u,f})$  - стандартна невизначеність вимірювання, що виникає від впливу зміни напруги та частоти мережі.

Якщо напруга та частота мережі відповідають діапазонам наведеним в таблиці 3.1, значення яких підтверджуються постійним контролем та забезпечуються стабілізатором напруги та частоти, то вплив цієї складової дорівнює нулю:  $u(\delta V_{u,f}) = 0$ .

$u(\delta V_{np.})$  - стандартна невизначеність вимірювання типу Б, що виникає від відліку показань, розраховується за формулою (3.15) у припущенні прямокутного (рівномірного) розподілу ймовірностей:

$$u(\delta V_{np.}) = \frac{0,5 \cdot JS}{\sqrt{3}}, \quad (3.15)$$

де  $JS$  – найменше значення, яке можна відрахувати по дисплею приладу, найменше значення поділки (дискретність),

$u(\delta V_{em.})$  - стандартна невизначеність вимірювання, пов'язана з впливом еталона, розраховується за формулою (3.16) у припущенні нормального розподілу ймовірностей:

$$u(\delta V_{em.}) = \frac{U_{em}}{2}, \quad (3.16)$$

$U_{em}$  - розширена невизначеність вимірювання із специфікації еталону.

11.7 Розрахунок розширеної невизначеності вимірювань  $U$  проводиться за формулою (3.17):

$$U = k \cdot u(y), \quad (3.17)$$

де  $u(y)$  - сумарна стандартна невизначеність вимірювання, пов'язана з оцінкою  $y$  вихідної величини:

$k$  - коефіцієнт охоплення, який стандартно приймається рівним 2 ( $k=2$ ) при нормальному законі розподілу. Приписана розширена невизначеність вимірювання відповідає ймовірності покриття приблизно 95 %.

Результат вимірювання та всі складові невизначеності вимірювання наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Таблиця компонентів невизначеності вимірювання (бюджет невизначеності)

Величина $X_i$	Оцінка $x_i$	Стандартна невизначеність $u(x_i)$	Тип розподілу	Коефіцієнт Чутливості $c_i$	Складова сумарної невизначеності $u_i(y)$
$\bar{V}_x$	значення	значення	нормальний	1,0	значення
$\delta V_{еп.}$	0	0	прямокутний	1,0	значення
$\delta V_{пр.}$	значення	значення	прямокутний	1,0	значення
$\delta V_{ет.}$	значення	значення	нормальний	1,0	значення
$\delta V_t$	0	0	прямокутний	1,0	значення
$\delta V_{u,f}$	0	0	прямокутний	1,0	значення
$V_x$	значення			$u(V_y)$	значення
				k	2
				$U(V_y) = u(V_y) \cdot k$	значення

### 3.8 Оформлення результатів калібрування

Результати калібрування заносять у протокол, який підписують виконавці.

У протоколі зазначають:

- назву калібрувальної лабораторії;
- назву та адресу замовника;
- заводський номер цифрового ЗВТ;
- метрологічні характеристики цифрового ЗВТ;
- умови проведення калібрування;
- результати проведення калібрування;
- ім'я, посаду та підпис особи, яка завірила протокол.

На підставі протоколу калібрування оформляють сертифікат калібрування за формою.

Таким чином, у третьому розділі розроблена методика калібрування мультиметрів постійної та змінної напруги та струму у діапазоні частот від 10 до  $5 \cdot 10^7$  Гц для змінної напруги та для змінного струму у діапазоні частот від 10 до  $5 \cdot 10^5$  Гц.

## ВИСНОВКИ

Мультиметри дозволяють вимірювати всі основні параметри електричних сигналів і це робить їх достатньо поширеними як серед висококваліфікованих спеціалістів так і серед звичайних радіоаматорів.

Росповсюдженість мультиметрів робить актуальною задачу розробки методики їх калібрування з метою визначення метрологічних характеристик.

У першому розділі розглянуті різновиди мультиметрів, їхні переваги та недоліки, рекомендації щодо вибору, позначення діапазонів вимірювань, управління режимами вимірювань та приєднання щупів.

У другому розділі проаналізовані основні положення міжнародного підходу до оцінювання характеристик точності вимірювань. Проведений аналіз основ теорії невизначеності вимірювань, досліджені алгоритми оцінювання невизначеностей, викладені оцінки кількісних результатів випробувань та форм подання невизначеностей вимірювань.

У третьому розділі розроблена методика калібрування мультиметрів постійної та змінної напруги та струму у діапазоні частот від 10 до  $5 \cdot 10^7$  Гц для змінної напруги та для змінного струму у діапазоні частот від 10 до  $5 \cdot 10^5$  Гц.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бензар В. К. Словник-довідник з електротехніки, промислової електроніки та автоматики - 2-ге вид., Пров. та дод. - Мн.: Вища школа, 1985. - С. 7. - 176 с.
2. Садченков Д.А. Сучасні цифрові мультиметри: СОЛОН - Р, 2002. - 112с.
3. Сазонов Д. Як користуються мультиметром; "Залізо" 2004. - №8
4. Руководство по выражению неопределенностей измерения Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement : [научн. редактор Слаев В. А.]. – Санкт-Петербург : НПО ВНИИМ им. Д. М. Менделеева, 1999. – 134 с.
5. Васілевський О. М. Основи теорії невизначеності вимірювань : навчальний посібник / О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 172 с.
6. Захаров И. П. Теория неопределенности в измерениях : учеб. посо-бие / И. П. Захаров, В. Д. Кукуш. – Харьков : Консум, 2002. – 256 с.
7. Метрологічне забезпечення вимірювань і контролю : [навч. посіб-ник] / Є. Т. Володарський, В. В. Кухарчук, В. О. Поджаренко, Г. Б. Сердюк. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 219 с.
8. Методика обґрунтування рівнянь вимірювань та оцінки методичної складової похибки (невизначеності) результатів вимірювань : МІ 13.002-2003. – Офіц. вид. – Харків : ХДНДІМ, 2003. – 11 с.
9. Статистические методы. Термины и определения : ГОСТ Р 50779.10-2000 (ISO 3534.1:93). – [Введ. с 2000-01-01].– М. : ИПК Изд-во стандартов. – 2001. – 41 с.
10. Смирнов Н. Д. Курс теории вероятности и математической статистики для технических приложений / Н. Д. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – Л. : Наука. Главная ред. физматлитературы, 1969. – 511 с.

11. Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання». Частина 5. Альтернативні методи визначення прецизійного стандартного методу вимірювань : ДСТУ ГОСТ ISO 5725-5:2005 (ISO/IEC 5725-5:1994), IDT. – [Чинний від 2006-07-01]. – К. : Держспожив-стандарт України, 2006. – 80 с. – (Національний стандарт України).

12. ДСТУ ISO/IEC 17025:2017 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій;

13. ДСТУ 3008-95 Документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення [Текст]. – К. : Держстандарт України, 1995. – 24 с.

14. ДСТУ ГОСТ 7.1-2006 Бібліографічний запис. Загальні вимоги та правила складання [Текст] чинний з 2007-07-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 47 с.