

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

**з дисциплін: «Вимірювання електричних величин та метрологічне забезпечення електронних систем», «Основи метрології та електронних вимірів», «Вимірювання електричних величин та метрологічне забезпечення автоматичних систем», «Основи метрології»
для студентів денної та заочної форм навчання усіх спеціальностей**

Конспект лекцій з дисциплін: «Вимірювання електричних величин та метрологічне забезпечення електронних систем», «Основи метрології та електронних вимірів», «Вимірювання електричних величин та метрологічне забезпечення автоматичних систем», «Основи метрології» (для студентів денної та заочної форм навчання усіх спеціальностей) / [укл. І.С. Лактіонов, О.В. Вовна]. – Покровськ: ДонНТУ, 2017. – 80 с.

Конспект лекцій призначено для засвоєння студентами теоретичної частини дисциплін «Вимірювання електричних величин та метрологічне забезпечення електронних систем», «Основи метрології та електронних вимірів», «Вимірювання електричних величин та метрологічне забезпечення автоматичних систем», «Основи метрології», у ньому викладено необхідні положення щодо засвоєння основних розділів заявлених навчальних дисциплін, наведено узагальнені приклади оцінки метрологічних характеристик засобів вимірювання, контрольні питання до кожного змістовного блоку та перелік рекомендованих джерел інформації.

Укладачі: Лактіонов І.С., к.т.н., доц. каф. електронної техніки;
Вовна О.В., доц., д.т.н., проф. каф. електронної техніки.

Рецензент: Дмитрієва О.А., проф., д.т.н., завідувач кафедри прикладної математики та інформатики.

Відповідальний за випуск: Зорі А.А., завідувач кафедри електронної техніки.

Затверджено навчально-методичним відділом ДонНТУ,
протокол № 8 від 31.01.2017 р.

Розглянуто на засіданні кафедри електронної техніки,
протокол № 6 від 23.01.2017 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ	6
ТЕМА 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ МЕТРОЛОГІЇ	7
1.1 Предмет, методи досліджень та зміст дисципліни	7
1.2 Етапи розвитку метрології, як самостійної науки	9
1.3 Основні терміни та визначення в галузі метрології	12
Контрольні питання	17
Рекомендована література	18
ТЕМА 2 ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ЇХ ВИМІРЮВАННЯ	19
2.1 Визначення фізичної величини.....	19
2.2 Одиниці вимірювання фізичних величин.....	20
2.3 Основне рівняння вимірювання.....	21
2.4 Основні етапи вимірювань	22
2.5 Види вимірювань.....	24
2.6 Методи вимірювань	26
Контрольні питання	27
Рекомендована література	28
ТЕМА 3 ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ	29
3.1 Загальні відомості про похибки вимірювання	29
3.2 Систематичні похибки вимірювання	32
3.3 Випадкові похибки вимірювання	35
3.4 Обробка результатів вимірювань із багаторазовими спостереженнями...	40
3.5 Оцінка результатів нерівноточних вимірювань.....	47

3.6 Нормування похибок засобів вимірювання та їх класи точності.....	50
Контрольні питання	55
Рекомендована література	56

ТЕМА 4 ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ ОСНОВИ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН	57
4.1 Вимірювання електричних величин.....	57
4.2 Загальна структура, передавальна функція та точність вимірювальної системи	69
4.3 Особливості вимірювання неелектричних фізичних величин	73
4.4 Узгодження первинних перетворювачів з електричними засобами вимірювань.....	76
Контрольні питання	79
Рекомендована література	80

ВСТУП

Дисципліни «Вимірювання електричних величин та метрологічне забезпечення електронних систем», «Основи метрології та електронних вимірів», «Вимірювання електричних величин та метрологічне забезпечення автоматичних систем», «Основи метрології» є базовими предметами, які вивчаються студентами технічних вишів, що навчаються за комп'ютерними, електротехнічними та радіотехнічними спеціальностями.

Метою викладання вищевказаних дисциплін є формування у студентів знань щодо методів та способів вимірювання фізичних величин електричної та неелектричної природи, а також вмінь та навиків кваліфікованого застосування засобів вимірювальної техніки задля досягнення підвищення ефективності контролю й діагностики параметрів технологічних процесів. Дисципліна покликана навчити студентів застосуванню сучасних методів та засобів виконання технічних вимірювань з контрольованою точністю.

Процес засвоєння змісту курсів «Вимірювання електричних величин та метрологічне забезпечення електронних систем», «Основи метрології та електронних вимірів», «Вимірювання електричних величин та метрологічне забезпечення автоматичних систем», «Основи метрології» базується на знаннях, що були попередньо отриманні під час вивчення дисциплін «Вища математика», «Фізика», «Теорія електричних кіл» та «Вступ до фаху».

Основні розділи конспекту лекцій стосуються теоретичного матеріалу з питань прикладної метрології, метрологічного забезпечення пристроїв та систем, теорії похибок та концепції невизначеності, теоретичних основ структурної організації та принципів дії засобів вимірювальної техніки, а також техніки використання вимірювачів задля контролю фізико-хімічних показників технологічних об'єктів та процесів.

Знання та вміння, що отримані студентами при вивченні зазначених вище курсів, використовуються під час подальшого вивчення дисциплін циклів професійної та практичної підготовки, а також при виконанні бакалаврських та магістерських кваліфікаційних робіт.

ПРОГРАМА НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ

Тема 1. Загальні відомості метрології. 1.1 Предмет, методи досліджень та зміст дисципліни. 1.2 Етапи розвитку метрології, як самостійної науки. 1.3 Основні терміни та визначення в галузі метрології.

Тема 2. Фізичні величини та класифікація методів їх вимірювання. 2.1 Визначення фізичної величини. 2.2 Одиниці вимірювання фізичних величин. 2.3 Основне рівняння вимірювання. 2.4 Основні етапи вимірювань. 2.5 Види вимірювань. 2.6 Методи вимірювань.

Тема 3. Похибки вимірювання та обробка результатів вимірювання. 3.1 Загальні відомості про похибки вимірювання. 3.2 Систематичні похибки вимірювання. 3.3 Випадкові похибки вимірювання. 3.4 Обробка результатів вимірювань із багаторазовими спостереження. 3.5 Оцінка результатів нерівноточних вимірювань. 3.6 Нормування похибок засобів вимірювання та їх класи точності.

Тема 4. Теоретичні та практичні основи вимірювання фізичних величин. 4.1 Вимірювання електричних величин. 4.2 Загальна структура, передавальна функція та точність вимірювальної системи. 4.3 Особливості вимірювання неелектричних фізичних величин. 4.4 Узгодження первинних перетворювачів з електричними засобами вимірювань.

ТЕМА 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ МЕТРОЛОГІЇ

1.1 Предмет, методи досліджень та зміст дисципліни

Предмет метрології – отримання кількісної та якісної інформації щодо властивостей об'єктів і процесів, встановлення й застосування наукових і організаційних основ, технічних засобів, правил і норм, необхідних для досягнення єдності й необхідної точності вимірювань.

Методи метрології – це сукупність фізичних і математичних методів, що використовуються для отримання вимірювальної інформації. До них належать: методи вимірювання, відтворення величин заданого розміру, порівняння величин, вимірювальне перетворення, обробка результатів спостережень, планування вимірювального експерименту.

Методи метрології дозволяють перевірити істинність інформації метрологічними експериментами. Різноманітність каналів отримання вимірювальної інформації, сукупність методів її обробки сприяють підвищенню точності та достовірності, а отже, й поглибленню пізнання людиною об'єктів матеріальної природи.

Засоби метрології – різноманітні засоби вимірювань та контролю, які вдосконалюються і розвиваються на основі об'єктивних законів.

Збільшення числа структурних елементів, програмно-апаратна реалізація засобів вимірювання та контролю призводять до їх якісної зміни. Вони безперервно вдосконалюються – від найпростіших мір до приладів, установок, комп'ютерно-вимірювальних систем і метрологічних роботів.

Відбувається перехід кількості структурних елементів у новий якісний функціонал.

Всі засоби вимірювання й контролю регламентуються державними і міжнародними правилами, законодавчими актами, що мають на меті підтримання єдності вимірювань і підвищення їх достовірності. Таким чином, засоби метрології включають у себе:

- сукупність засобів вимірювання й контролю;

- систему державних еталонів одиниць фізичних величин;
- систему передачі розмірів одиниць фізичних величин від еталонів усім засобам вимірювання за допомогою зразкових засобів повірки;
- систему обов'язкової державної й відомчої повірки, або метрологічної атестації засобів вимірювання;
- систему стандартних зразків складу й властивостей речовин, матеріалів.

Напрямки метрології. Усі розділи метрології розвиваються на основі об'єктивних законів, коли існуючі раніше засоби вимірювання відкидаються та замінюються новими, коли забезпечується єдність об'єкта дослідження та суб'єкта, їх взаємозв'язок і взаємодія призводить до підвищення точності.

Розвиваючись швидкими темпами, метрологія розподіляється на ряд наступних самостійних розділів:

- теорія вимірювань;
- теорія похибок;
- теорія невизначеності;
- інформаційна теорія вимірювань;
- теорія інформаційно-вимірювальних систем;
- статистичні вимірювання;
- вимірювання електричних величин;
- вимірювання магнітних величин;
- вимірювання неелектричних величин.

Факт існування в сучасній метрології різноманітних напрямків вивчення вимірювань є відображенням процесу диференціації науки про вимірювання як важливого принципу її розвитку.

Тенденція диференціації призвела до створення окремих напрямків вимірювань, а також відповідних навчальних і наукових спеціальностей, що, в свою чергу, забезпечило їх прискорений розвиток. Однак поряд із тенденцією диференціації у зв'язку з розвитком наукових досліджень на межі різнорідних явищ, створенням складних систем з використанням фізичних явищ різного роду, ефективністю взаємного проникнення методів вимірювання і вимірювального перетворення з різних галузей науки і техніки посилюється

тенденція інтеграції в розвитку метрології і вимірювальної техніки.

Напрямки розвитку метрології визначають її місце серед інших наук, як показано на рис. 1.1.

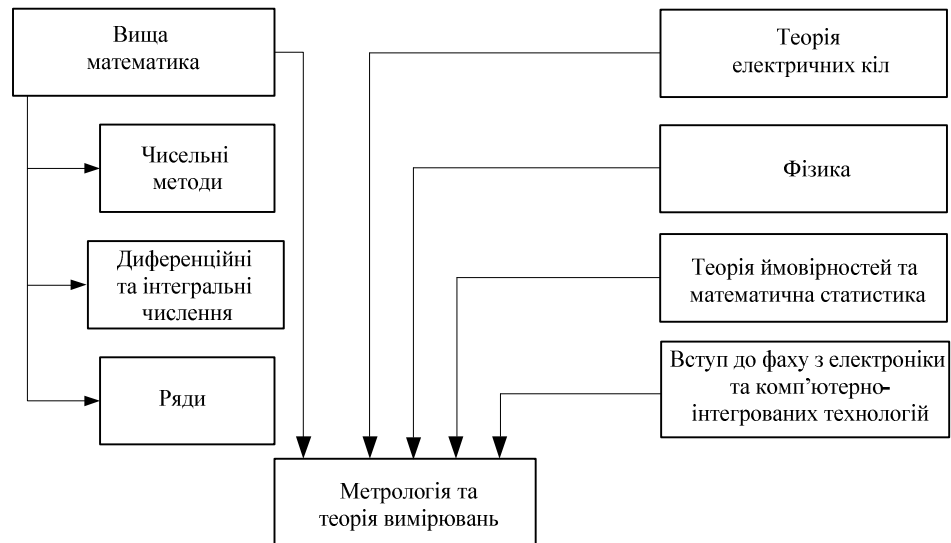


Рисунок 1.1 – Зв'язок метрології з іншими науками

Метрологія веде до єднання різних наук. Вона тісно пов'язана з фундаментальними природничими науками. Виконуючи завдання метрологічного забезпечення, вона також поєднується зі суспільними науками, оскільки проблеми метрології мають багато спільного з типовими проблемами масового обслуговування.

1.2 Етапи розвитку метрології, як самостійної науки

Вимірювання – одне з найбільш стародавніх занять у пізнавальній діяльності людини. Його виникнення відноситься до початку матеріальної культури людства.

Заснування у 1725 році Російської Академії сприяло розвитку наукової думки, вдосконаленню мір та упорядкуванню їх точності. Розширювалися межі впровадження одноманітних мір. У 1736 році за рішенням сенату була створена Комісія мір і ваги, яку очолив головний директор монетного двору граф М. Г. Головін.

Для організації повірочної роботи було утворено спеціальний комітет, який у 1747 році розробив еталонний російський фунт (409,5 г) і визначив за норму довжини аршин (0,7112 м). Фунт і аршин у нашій державі використовувалися до впровадження метричної системи.

Указом від 1835 року «Про систему російських мір і ваги» було закладено основу російської системи вимірювання, а в Санкт-Петербурзькій фортеці в одному з особливих приміщень зберігалось нове зібрання еталонних мір довжини, місткості рідких і крихких тіл та вагових одиниць. За цими еталонами було виготовлено і розіслано в губернії Росії вивірені копії аршина, відра, четверика, фунта.

Практичним застосуванням російських мір і ваги займалося засноване у 1842 р. Депо еталонних мір та ваги. Організація Депо і встановлення правил повірки робочих мір стали тією основою, яка забезпечувала єдність вимірювання й одноманітність мір. Першим хранителем Депо еталонних мір і ваги було призначено академіка А.Я. Купфера, відомого вченого і метролога, який очолював Депо з 1842 до 1865 р.

Період 1892-1917 рр. називають «Менделєєвським». Головна палата мір і ваги, управителем якої до останніх днів життя був видатний науковець Д.І. Менделєєв, стала однією з перших у світі науково-дослідних установ метрологічного профілю.

Подальша історія розвитку метрології у колишньому СРСР починається з декрету від 14 вересня 1918 р. «Про введення метричної системи мір і ваги». Він сприяв подальшому розвитку науково-дослідних робіт щодо забезпечення єдності вимірювань і розвитку приладобудування.

До 1918 р. вітчизняна метрична система впроваджувалась факультативно, поряд зі старою російською та англійською (дюймовою) системами. Значні зміни в метрологічній діяльності почали відбуватися після підпису Радою Народних комісарів РРФСР Декрету «О введении международной метрической системы мер и весов». Метрична система в Росії впроваджувалась з 1918 до 1927 рр. Можна виділити наступні етапи її розвитку:

30.08.1922 р. – створення української Головної палати мір і ваги та

місцевих органів з метрології.

07.01.1966 р. – створення Української республіканської лабораторії державного нагляду за стандартами і вимірювальною технікою.

11.12.1970 р. – відкриття Українського республіканського центру метрології та стандартизації.

24.12.1971 р. – організація Українського республіканського управління Держстандарту СРСР.

24.05.1991 р. – створення Державного комітету УРСР зі стандартизації, метрології та якості продукції.

Розвиток метрології в усі часи був неподільно пов'язаний із загальним розвитком науки, оскільки без уміння швидко, точно та правильно виконувати вимірювання найрізноманітніших фізичних величин неможливі ніякі наукові дослідження. Тому Піфагор і Архімед, Галілей і Ньютон, Лейбніц, Ейлер, Ломоносов, Гаус, Менделєєв – усі вони, а також тисячі інших видатних учених активно працювали над винайденням і вдосконаленням методів вимірювань, навічно пов'язавши свої імена з розвитком метрології. Звичайно, важко передбачити, як розвиватиметься метрологія у XXI ст. Але можна з упевненістю відзначити, що її роль і значення в усіх без винятку аспектах суспільного життя будуть тільки зростати.

В Україні з 01.01.1999 р. чинними є державні стандарти – ДСТУ 3561.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення, ДСТУ 3561.1-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Похідні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні поняття, назви та позначення, ДСТУ 3561.2-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Фізичні сталі та характеристичні числа. Основні положення, назви, позначення та значення, згідно з якими обов'язковим є застосування одиниць SI, а також часткових і кратних від них.

Метр є довжина шляху, який проходить світло у вакуумі за проміжок часу що дорівнює $1/299792458$ секунди (XVII ГКМВ. 1983 р.).

Кілограм дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма (I ГКМВ,

1889 р.; III ГКМВ, 1901 р.).

Секунда дорівнює 9192631770 періодам випромінювання, яке відповідає переходові між двома надтонкими рівнями основного стану атома цезію-133 (XIII ГКМВ, 1967 р.).

Ампер дорівнює силі постійного струму, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних проводах нескінченної довжини та знехтовно малої площі поперечного перерізу, розміщених на відстані 1 м один від одного у вакуумі, викликає би на кожній ділянці проводу довжини 1 м силу взаємодії $2 \cdot 10^{-7}$ Н (IX ГКМВ, 1948 р.).

Кельвін дорівнює $1/273,16$ частині термодинамічної температури потрійної точки води (XIII ГКМВ, 1967 р.).

Моль дорівнює кількості речовини системи, яка вміщує стільки ж структурних елементів, скільки міститься атомів у вуглеці-12 масою 0,012 кг. При застосуванні моля структурні елементи мають бути специфіковані і можуть бути атомами, молекулами, іонами, електронами та іншими частинками або специфікованими групами частинок (XIV ГКМВ, 1971 р.).

Кандела дорівнює силі світла в заданому напрямі джерела, що випускає монохроматичне випромінювання частотою $540 \cdot 10^{12}$, енергетична сила світла якого в цьому напрямі становить $1/683$ Вт/ср (XVI ГКМВ, 1979 р.).

Радіан дорівнює куту між двома радіусами кола, дуга між якими дорівнює радіусу.

Стерадіан дорівнює тілесному куту з вершиною в центрі сфери, який вирізає на поверхні сфери площу, що дорівнює площі квадрата зі стороною, яка дорівнює радіусу сфери.

1.3 Основні терміни та визначення в галузі метрології

Метрологія – наука про вимірювання, методи і засоби забезпечення їх єдності та способи досягнення потрібної точності.

Вимірювання – знаходження значень фізичних величин експериментальним шляхом.

Фізична величина – будь-яка властивість матеріального об'єкту, яку можна кількісно визначити.

Єдність вимірювань – такий стан вимірювань коли фізичні величини виражені в узаконених одиницях, а значення їх похибок відомі з заданою імовірністю.

Метрологія поділяється на теоретичну, прикладну та законодавчу:

- теоретична – вирішує загальні наукові проблеми вимірювань;
- предметом прикладної метрології є практичне застосування положень теоретичної метрології;
- законодавча – полягає у встановленні та контролі за дотриманням спеціальних вимог і правил для забезпечення єдності й потрібної точності вимірювань.

Названі три розділи є взаємопов'язані і мають на меті вирішення ряду завдань, найважливіші серед яких є:

- опрацювання загальної теорії вимірювань;
- розробка теорії певних окремих видів вимірювань;
- розробка теорії фізичних величин, одиниць і систем фізичних величин;
- розробка теорії похибок;
- визначення фізичних констант і стандартних довідкових даних про властивості речовин і матеріалів;
- розробка еталонів і стандартних зразків;
- розробка засобів вимірювання;
- забезпечення правильної експлуатації засобів вимірювальної техніки;
- відтворення розмірів одиниць за допомогою еталонів і передавання їх усім іншим засобам вимірювання;
- нормування метрологічних характеристик засобів вимірювання;
- нормування стандартних вимірювальних процесів і методик виконання вимірювань;
- метрологічний нагляд за засобами вимірювання і правильністю їх застосування.

Порівнюючи окремі завдання можна розрізнити, які з них більше чи

менше відповідають окремим трьом розділам метрології, але ніколи їх не можна віднести тільки до одного з них. Однак треба зазначити, що функції прикладної і законодавчої метрології завжди підпорядковані положенням теоретичної. В свою чергу, положення теоретичної метрології знаходять практичну перевірку при реалізації функцій прикладної та законодавчої метрології.

Метрологія оперує рядом термінів, що встановлені ДСТУ 2681-94 «Метрологія. Терміни та визначення». Цей стандарт встановлює обов'язкові для використання терміни в усіх видах нормативної документації, науково-технічній, навчально-методичній літературі, що належить до метрології та метрологічного забезпечення, а також робіт зі стандартизації або під час використання результатів цих робіт, включаючи програмні засоби для комп'ютерних систем.

Фізична величина – властивість, спільна в якісному відношенні для багатьох матеріальних об'єктів та індивідуальна в кількісному відношенні для кожного з них.

Розмір (фізичної) величини – кількісний вміст фізичної величини в даному об'єкті.

Значення (фізичної) величини – відображення фізичної величини у вигляді числового значення величини з позначенням її одиниці.

Істинне значення (фізичної величини) – значення фізичної величини, яке ідеально відображало б певну властивість об'єкта.

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

Система (фізичних) величин – сукупність взаємопов'язаних фізичних величин, в якій декілька величин приймають за незалежні, а інші визначають як залежні від них.

Основна (фізична) величина – фізична величина, що входить до системи фізичних величин і прийнята за незалежну від інших величин цієї системи.

Похідна (фізична) величина – фізична величина, що входить до системи величин та визначається через основні величини цієї системи.

Розмірність фізичної величини – вираз, що відображає її зв'язок із основними величинами системи.

Одиниця (фізичної) величини – фізична величина певного розміру, прийнята за угодою для кількісного відображення однорідних з нею величин.

Числове значення (фізичної) величини – число, що дорівнює відношенню розміру фізичної величини, що вимірюється, до розміру одиниці цієї фізичної величини або кратної одиниці.

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

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

Непряме вимірювання – вимірювання, у якому значення однієї або кількох вимірюваних величин знаходять після перетворення ряду величин або обчислення за відомими залежностями їх від декількох величин аргументів, що вимірюються прямо.

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

Сукупне вимірювання – непряме вимірювання, у якому значення кількох одночасно вимірюваних однорідних величин отримують розв'язанням рівнянь, що пов'язують різне сполучення цих величин, які вимірюються прямо чи опосередковано.

Сумісне вимірювання – непряме вимірювання, у якому значення кількох одночасно вимірюваних різнорідних величин отримують розв'язанням рівнянь, які пов'язують їх з іншими величинами, що вимірюються прямо чи опосередковано.

Абсолютна похибка (вимірювання) – різниця між результатом вимірювання та умовно істинним значенням вимірюваної величини.

Відносна похибка – відношення абсолютної похибки вимірювання до умовно істинного значення вимірюваної величини.

Систематична похибка (вимірювання / засобу вимірювальної техніки) – складова похибки, що залишається сталою або прогнозовано змінюється у ряді вимірювань тієї самої величини.

Випадкова похибка (вимірювання / засобу вимірювальної техніки) – складова похибки, що непрогнозовано змінюється в ряді вимірювань тієї самої величини.

Методична похибка (вимірювання) – складова похибки вимірювання, що зумовлена неадекватністю об'єкта вимірювання та його моделі, прийнятої під час вимірювання.

Інструментальна похибка (вимірювання) – складова похибки вимірювання, обумовлена властивостями засобів вимірювальної техніки.

Точність вимірювання – головна характеристика якості вимірювання, що відображає близькість результату вимірювання до істинного значення вимірюваної величини.

Засіб вимірювальної техніки – технічний засіб, що застосовується під час вимірювань і має нормовані метрологічні характеристики.

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

Вимірювальний прилад – засіб вимірювань, у якому створюється візуальний сигнал вимірювальної інформації.

Метрологічні характеристики – характеристики засобів вимірювань, що нормуються для визначення результату вимірювання та його похибок.

Клас точності (засобу вимірювальної техніки / засобу вимірювань) – узагальнена характеристика засобу вимірювань, що визначається межами його допустимих основної й додаткових похибок, а також іншими характеристиками, що впливають на його точність.

Еталон (одиниці фізичної величини) – засіб вимірювальної техніки, що

забезпечує відтворення й збереження одиниці фізичної величини та передавання її розміру відповідним засобам, що стоять нижче за повірковою схемою, офіційно затверджений як еталон.

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

Робочий еталон – еталон, призначений для передавання розміру фізичної величини засобам вимірювальної техніки.

Метрологічна служба – мережа організацій, окрема організація або окремий підрозділ, на які покладено відповідальність за забезпечення єдності вимірювань у закріплених за ними сфері діяльності.

Метрологічне забезпечення – встановлення й застосування метрологічних норм і правил, а також розроблення, виготовлення та застосування технічних засобів, необхідних для забезпечення єдності й потрібної точності вимірювань.

Повірка засобів вимірювальної техніки – визначення похибок засобів вимірювальної техніки та встановлення придатності їх до застосування.

Контрольні питання:

1. Надайте характеристику предмету та методам дослідження метрології.
2. Проаналізуйте логічні зв'язки метрології з іншими науковими дисциплінами.
3. Назвіть основні історичні етапи розвитку метрології.
4. Дайте визначення основним фізичним величинам системи SI.
5. Що таке вимірювання?
6. В якому нормативному документі надані основні стандартизовані терміни метрології?
7. Дайте визначення термінам: фізична величина (ФВ) та розмір ФВ.
8. Дайте визначення термінам: абсолютна похибка та точність вимірювання.

Рекомендована література:

1. Поджаренко, В.О. Опрацювання результатів вимірювань на основі концепції невизначеності: навч. посіб. / В.О. Поджаренко, О.М. Васілевський, В.Ю. Кучерук. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 128 с.

2. Державний стандарт України. Метрологія. Терміни та визначення: ДСТУ 2681-94. – Чинний від 26.07.1994. – К.: Держстандарт України, 1994. – 68 с.

3. Метрологія, стандартизація, сертифікація та акредитація. ВНТУ [Електронний ресурс]: конспект лекцій. – Режим доступу: <http://ignatenko.vk.vntu.edu.ua/file/bf72e522a09da43275a7f57ed2b02d19.pdf>. – Назва з титул. екрана.

4. Тартаковский, Д.Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений: учеб. для вуз. / Д.Ф. Тартаковский, А.С. Ястребов. – М.: Высш. шк., 2001. – 205 с.

ТЕМА 2 ФІЗИЧНІ ВЕЛИЧИНИ ТА КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ ЇХ ВИМІРЮВАННЯ

2.1 Визначення фізичної величини

Фізична величина (ФВ) – це кожна (одна з багатьох) означена якісно властивість фізичних об'єктів (фізичних тіл, їх систем, станів, процесів), яка може мати певний розмір.

Приклади ФВ: довжина, маса, швидкість, сила електричного струму, світловий потік.

Розмір ФВ є її атрибутом, що існує об'єктивно, незалежно від наших знань про нього.

За характером зв'язків розмірів ФВ з об'єктами, яким вони притаманні, їх поділяють на екстенсивні та інтенсивні величини. *Екстенсивні ФВ* (маса, довжина, площа, енергія та ін.) при поділі об'єкта на частини змінюють свої розміри і є адитивними величинами, тобто їх можна додавати або віднімати. *Інтенсивна ФВ* характеризує стан фізичного об'єкту та при його поділі на частини може зберігати свій розмір, наприклад, густина, температура, питомий електричний опір. Інтенсивні ФВ не є адитивними (густина суміші не дорівнює сумі густин компонентів).

За характером виявлення ФВ поділяються на енергетичні (активні), які здатні самі проявляти свої розміри (температура, напруга) і параметричні (пасивні): опір, індуктивність, ємність, розміри яких проявляються при впливі на об'єкт відповідної активної величини (відповідно активні та пасивні величини визначаються з використанням різних видів вимірювань – прямих та непрямих).

Конкретні ФВ існують в просторі і часі, перебувають в причинно-наслідкових зв'язках з іншими ФВ згідно з законами фізики. Тому розміри ФВ є функціями часу, координат та інших величин. Розрізняють скалярні й векторні величини. Скалярні – відповідно поділяються на неполярні, що мають тільки розмір (маса, об'єм), і полярні, які мають ще й знак (заряд, напруга). Векторні

ФВ (сила, переміщення, швидкість) поруч з розміром мають напрям і отримуються як зміна іншої ФВ в просторі і часі (переміщення – зміна координати в просторі, швидкість – зміна переміщення в часі), а математично описуються похідними. Розміри ФВ можуть змінюватись безперервно або стрибкоподібно (дискретно). ФВ, розмір якої виражений як функція часу, за визначенням, становить процес, тобто послідовну в часі зміну розміру величини.

2.2 Одиниці вимірювання фізичних величин

Допустимо, що всі можливі розміри ФВ позначено через X , тобто X – множина розмірів ФВ. Виберемо зі всієї множини ФВ довільний розмір X_0 і назовемо його розміром одиниці величини X . Тоді відношення $X/X_0=M$ буде певним числовим значенням величини X і кожний можливий її розмір можна виразити через якесь числове значення.

Отже, *одиниця ФВ* – такий її розмір, якому присвоєно числове значення, що дорівнює 1. Вимірюванням замість числа M знаходять наближене його значення N , через яке отримують наближене значення ФВ – $x=N \cdot X_0$, яке є тільки оцінкою істинного значення величини. Значення ФВ, яке настільки близьке до істинного її значення, що для даної цілі може бути використане замість істинного, називають дійсним значенням: $x_d=N_d \cdot X_0$.

ФВ пов'язані поміж собою залежностями, які виражають одні величини через інші. Сукупність пов'язаних такими залежностями величин, серед яких одні умовно вважаються незалежними, а інші виражаються через них, називають системою величин. В системі незалежні величини називаються основними, всі решта – похідними величинами. Сукупність основних і похідних одиниць певної системи величин становить систему їх одиниць.

У побудові системи одиниць вибір основних величин і розмірів їх одиниць теоретично довільний, але практично є продиктований певними раціональними вимогами:

– число основних величин має бути невелике;

- за одиниці мають бути вибрані величини, одиниці яких легко відтворити з високою точністю;
- розміри основних одиниць мають бути такими, щоб на практиці значення всіх величин системи не виражалися ні надто малими, ні надто великими числами;
- похідні одиниці мають бути когерентні, тобто входити в рівняння, що пов'язують їх з іншими одиницями системи, з коефіцієнтом 1.

Одиниці, що не належать ні до основних, ні до похідних одиниць даної системи, називають додатковими.

2.3 Основне рівняння вимірювання

Вимірювання є одним із важливих шляхів пізнання навколишнього середовища, зв'язків між подіями, закономірностей природи. Завдяки вимірюванням людство відкрило багато законів природи, що сприяло науково-технічному прогресу.

Вимірювання – це процес експериментального відшукування значень фізичної величини за допомогою спеціальних засобів вимірювання. Точні й вірогідні вимірювання фізичних величин, технологічних параметрів мають велике значення для науки, техніки та управління технологічними процесами в промисловості та сільському господарстві.

Відповідно до стандарту ДСТУ 2681–94, вимірювання є відображенням вимірюваних величин, їх значень шляхом експерименту та обчислень за допомогою спеціальних технічних засобів.

Число, яке виражає відношення вимірюваної величини до одиниці вимірювання, називається числовим значенням вимірюваної величини. Воно може бути цілим або дробовим, але обов'язково *абстрактним числом* (таким, за допомогою якого можна лічити предмети).

Значення величини, прийняте за одиницю вимірювання, називається розміром цієї одиниці.

Якщо A – вимірювана величина, U – одиниця вимірювання, g – числове

значення вимірюваної величини, то результат вимірювання A можна записати у вигляді рівняння (2.1):

$$A = g \cdot U . \quad (2.1)$$

Вираз (2.1) називається основним рівнянням вимірювань. Права частина рівняння називається результатом вимірювання та завжди має розмірність одиниці фізичної величини, а число g показує, скільки разів одиниця вимірювання U вміщується у вимірюваній величині. Тому при написанні результату вимірювання поряд з числовим значенням вимірюваної величини слід ставити позначення відповідної одиниці.

2.4 Основні етапи вимірювань

Принципом вимірювань називають сукупність явищ, на яких базується вимірювання, наприклад, вимірювання температури з використанням термоелектричного ефекту; вимірювання напруженості магнітного поля з використанням ефекту Холла.

Метод вимірювань – спосіб використання принципів і засобів вимірювань, його основна ознака – це спосіб виконання операції порівняння.

Режим вимірювань (статичний або динамічний) визначається характеристиками засобів вимірювань, вхідних сигналів і тривалістю їх перетворення. *Статичний режим* буває тоді, коли вхідний сигнал є сталою величиною або стаціонарним процесом, пов'язана з ним вимірювана величина не залежить від часу (середнє, середнє квадратичне значення), а тривалість вимірювання достатня для погасання перехідних процесів у колі перетворення, що виникли при поданні сигналу на його вхід (наприклад, для заспокоєння рухомої частини електромеханічного приладу). *Динамічний режим* є при вимірюванні миттєвих значень змінних величин, а також значень сталих величин чи інтегральних значень стаціонарних процесів, якщо тривалість перетворення недостатня для усталення вихідного сигналу. Теоретично режим

вимірювань завжди динамічний, а статичний режим є певним наближенням, коли можна нехтувати динамічною складовою похибки перетворення.

Алгоритм вимірювань – детермінований (регулярний) або стохастичний (нерегулярний) – це сукупність правил підготовки і виконання операцій процесу вимірювань. Стохастичні алгоритми, що базуються на методі статистичних випробувань Монте-Карло, забезпечують достатню точність порівняно нескладних автоматичних засобів вимірювань, побудованих, з використанням мікропроцесорних елементів. Точність і функціональні можливості таких засобів визначаються в основному якістю генератора шумового сигналу з заданою густиною розподілу.

Процес вимірювань як сукупність операцій перетворення вимірювальної інформації за певним алгоритмом, який визначав послідовність їх виконання в часі залежно від ступеня необхідної участі в ньому експериментатора, може бути неавтоматизованим, автоматизованим і автоматичним.

Алгоритм виконання вимірювальної процедури:

1. Постанова вимірювального завдання. Розв'язуючи цю проблему, перш за все визначають рід вимірюваної величини, діапазон, в якому вона може змінюватись. На цьому ж етапі обґрунтовується точність кінцевого результату. Правильність формулювання поставленого завдання визначає в кінцевому підсумку якість вимірювань та економічні витрати на їх виконання.

2. Вибір методу вимірювання. Здійснюється аналізом методичних похибок серед існуючих методів вимірювання.

3. Синтез вимірювальної структури (кола). Один і той самий метод вимірювання може бути реалізований різними способами. Тому дуже важливо правильно вибрати вимірювальну схему і конкретно реалізувати її. У цьому випадку розглядають питання раціональної реалізації засобів вимірювання з точки зору забезпечення необхідних метрологічних характеристик, габаритів, маси тощо.

4. Обробка результатів вимірювання. Для широкого класу експериментальних досліджень можна виділити такі етапи обробки результатів вимірювань. *Перший етап* – зчитування (зняття) інформації, перетворення її в

цифровий код і запис в запам'ятовувальний пристрій мікропроцесора. *Другий етап* – статистична обробка результатів спостереження з оцінюванням ступеня довіри. *Третій етап* – інтерпретація результатів, одержаних на другому етапі обробки. Вона містить, як правило, оцінку шуканих характеристик явища чи об'єкта, що досліджується.

2.5 Види вимірювань

Повної сталої та загальновизнаної класифікації вимірювань на теперішній час не існує. Практично використовують певний варіант неповної класифікації, який відповідає призначенню. Розглянемо декілька прикладів класифікацій вимірювань за певними ознаками:

- за наявністю розмірності: розмірні, безрозмірні;
- за наявністю попереднього вимірювального перетворення: безпосередні (вимірювана величина (ВВ) вимірюється без будь-яких попередніх перетворень шляхом порівняння з величиною міри); з попереднім перетворенням (ВВ попередньо перетворюється у величину, однорідну з величиною міри, після чого відбувається порівняння);
- за співвідношенням між числом n вимірюваних величин і числом m рівнянь вимірювань ($n < m$, $n = m$, $n > m$);
- за способом здійснення умови $m > n$ (повторне вимірювання m разів, m -канальне вимірювання).

Однією з найбільш поширених ознак, за якою визначають види вимірювань: прямі, непрямі (опосередковані, сукупні та сумісні), – є характер співвідношень, на підставі яких знаходять значення вимірюваних величин. Вимірювання є *прямим*, якщо значення вимірюваної величини знаходять безпосередньо з дослідних даних, наприклад, вимірювання довжини лінійкою з поділками, сили струму – амперметром.

На противагу прямим – опосередковані, сукупні та сумісні вимірювання називають непрямыми.

Опосередкованим називають вимірювання ($n=1$) однієї величини X ,

значення якої x знаходять за результатами $u, v, \dots, w$, прямих вимірювань величин $U, V, \dots, W$, з якими величина X пов'язана відомою функціональною залежністю $X=f(U, V, \dots, W)$.

Опосередковані вимірювання виконують тоді, коли значення величини неможливо або складно виміряти прямо або якщо вони забезпечують вищу точність, ніж прямі.

Сумісними називають вимірювання $n \geq 2$ неоднойменних величин $U, V, \dots, Z$, значення яких $u, v, \dots, z$ знаходять за результатами $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$ прямих або опосередкованих вимірювань величин $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in}$, через які величини $U, V, \dots, Z$, пов'язані між собою системою m -умовних (емпіричних) рівнянь:

$$F_i(U, V, \dots, Z; X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in})=0$$

$$i=1,2, \dots, m, \text{ причому } m \geq n$$

Прикладом сумісних вимірювань може також бути визначення температурних коефіцієнтів опору за результатами прямих вимірювань опору резистора та його температури. Сумісні вимірювання використовуються також для визначення функціональних залежностей між величинами.

Сукупними називають вимірювання $n \geq 2$ однойменних величин $X_1, X_2, \dots, X_n$, значення яких $x_1, x_2, \dots, x_n$ знаходять за результатами $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$ прямих вимірювань величин $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in}$, які є комбінаціями величин $X_1, X_2, \dots, X_n$, і пов'язані з ними системою m -умовних рівнянь:

$$F_i(X_1, X_2, \dots, X_n; X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in})=0$$

$$i=1,2, \dots, m, \text{ причому } m \geq n$$

Наприклад, щоб знайти значення r_1, r_2, r_3 опорів R_1, R_2, R_3 резисторів, що сполучені трикутником, вимірюють опори R_{12}, R_{23} та R_{31} на кожній парі вершин трикутника і, якщо $m=n$, отримують системи рівнянь, що пов'язують значення опорів. Розв'язуючи систему 3-х рівнянь, знаходять значення опорів r_1, r_2, r_3 .

Для підвищення точності сумісних і сукупних вимірювань, забезпечують умову $m > n$ і систему несумісних умовних рівнянь розв'язують, застосовуючи метод найменших квадратів.

2.6 Методи вимірювань

З визначення поняття вимірювання випливає, що неодмінною його операцією є порівняння інформації про розміри величин. Згідно з ДСТУ 2681-94 *метод вимірювання* – сукупність способів використання засобів вимірювальної техніки та принципу вимірювань для створення вимірювальної інформації; розрізняють 6 основних методів вимірювання:

1. *Метод зіставлення* – метод прямого вимірювання з одноразовим порівнянням вимірюваної величини з усіма вихідними величинами багатозначної нерегульованої міри. Приклади: вимірювання довжини лінійкою з поділками; вимірювання інтервалу часу годинником.

2. *Метод одного збігу (метод ноніуса)* – метод прямого вимірювання з одноразовим порівнянням вихідних величин двох багатозначних нерегульованих мір, з різними за значеннями ступенями, нульові позначки яких зсунуті між собою на вимірювану величину. Приклади: вимірювання довжини за допомогою двох лінійок з поділками, ціни яких знаходяться в певному відношенні (штангенциркуль); вимірювання часу за допомогою двох послідовностей періодичних імпульсів, періоди яких знаходяться в певному відомому відношенні.

Метод збігу полягає в тому, що різниця між ефектами, які викликані діями вимірюваної й зразкової величини, визначається за збігом шкал або періодичних сигналів.

3. *Метод подвійного збігу* – метод прямого вимірювання з одноразовим порівнянням двох квантованих фізичних величин: вимірюваної та відтворюваної багатозначною нерегульованою мірою. Приклади: вимірювання зістикованих інтервалів часу за допомогою послідовності періодичних імпульсів з відомим значенням їх періоду; вимірювання зістикованих відрізків

довжини за допомогою лінійки з відомим значенням поділок.

4. *Метод зрівноваження з регульованою мірою* – метод прямого вимірювання з багаторазовим порівнянням вимірюваної величини та величини, що відтворюється мірою, яка регулюється, до їх повного зрівноваження. Приклад: вимірювання електричної напруги компенсатором; зважування на рівноплечих терезах (метод протиставлення).

Цей метод ще має назву – нульовий метод вимірювання, бо відрізняється тим, що результуючий ефект діяння вимірюваної X і зразкової X_3 величин на пристрій порівняння доводять до нуля.

5. *Диференціальний метод (різницевий метод)* – метод вимірювання, за яким невелика різниця між вимірюваною величиною та вихідною величиною одноканальної міри вимірюється відповідним засобом вимірювання.

Диференціальний метод вимірювань полягає в тому, що на вимірювальний прилад діє різниця вимірюваної X та зразкової X_3 величин, тобто $\Delta X = X - X_3$, а результат вимірювання $x = X_3 + \Delta X$, причому похибка вимірювання величини X визначається практично похибкою відтворення зразкової величини X_3 .

6. *Метод заміщення* – метод непрямого вимірювання з багаторазовим порівнянням до повного зрівноваження вихідних величин вимірювального перетворювача з почерговим перетворенням ним вимірюваної величини та вихідної величини регульованої міри. Приклад: вимірювання опору неточною мостовою схемою з застосуванням заміщуючого магазину опору.

Контрольні питання:

1. Надайте визначення терміну «фізична величина» та наведіть приклади фізичних величин.
2. Що таке розмір фізичної величини?
3. Що таке одиниця фізичної величини?
4. Наведіть основне рівняння вимірювань та дайте визначення параметрам, що входять до нього.

5. Надайте визначення наступним термінам: принцип, метод, режим та алгоритм вимірювань.
6. Назвіть основні етапи алгоритму виконання вимірювальної процедури.
7. Надайте класифікацію вимірювань за наявністю розмірності та за наявністю попереднього вимірювального перетворення.
8. Охарактеризуйте види вимірювань за характером співвідношень, на підставі яких знаходять значення вимірюваних величин.
9. Надайте визначення терміну «опосередковані вимірювання».
10. Охарактеризуйте основні методи вимірювань.

Рекомендована література:

1. Державний стандарт України. Метрологія. Терміни та визначення: ДСТУ 2681-94. – Чинний від 26.07.1994. – К.: Держстандарт України, 1994. – 68 с.
2. Поджаренко, В.О. Опрацювання результатів вимірювань на основі концепції невизначеності: навч. посіб. / В.О. Поджаренко, О.М. Васілевський, В.Ю. Кучерук. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 128 с.
3. Седалищев, В.Н. Физические основы повышения эффективности (создания нелинейных) измерительных устройств: учеб. пособ. / В.Н. Седалищев. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2008. – 287 с.
4. Селиванов, М.Н. Качество измерений. Метрологическая справочная книга / М.Н. Селиванов, А.Э. Фридман, Ж.Ф. Кудряшова. – Л.: Лениздат, 1987. – 295 с.
5. Тартаковский, Д.Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений: учеб. для вуз. / Д.Ф. Тартаковский, А.С. Ястребов. – М.: Высш. шк., 2001. – 205 с.

ТЕМА 3 ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ

3.1 Загальні відомості про похибки вимірювання

Похибка вимірювання (error of a measurement) – відхилення результату вимірювання (X) від істинного значення ($X_{icm.}$) вимірюваної фізичної величини:

$$\Delta = X - X_{icm.} \quad (3.1)$$

В ряді джерел поряд із терміном похибка вимірювання вживається термін помилка вимірювання. Оскільки термін помилка вимірювання є невдалим, він не рекомендується до вживання.

Похибка вимірювання є кількісною характеристикою точності вимірювання.

На практиці істинне значення величини невідоме, тому неможливо точно визначити і величину відхилення результату вимірювання від нього. Тому на практиці доводиться користуватися не похибками, а їх оцінками або характеристиками. *Оцінку похибки* (наближене значення) можна знайти, як різницю відхилення вимірюваного значення ФВ (X) та дійсного значення ФВ (X_0) за формулою:

$$\Delta = X - X_0. \quad (3.2)$$

Дійсне значення вимірюваної фізичної величини, тобто її значення, знайдене експериментально і настільки близьке до істинного, що може бути використане замість нього. Фактично за таке значення приймають значення міри фізичної величини, еталона або визначене за допомогою точнішої методики.

В залежності від обраної класифікаційної ознаки існують різні

класифікації похибок вимірювання, серед яких можна виділити найпоширеніші:

- за формою вираження;
- за джерелами виникнення;
- за закономірностями виникнення та прояву.

За формою вираження похибки вимірювання поділяються на абсолютні, відносні та приведені.

Абсолютна похибка вимірювання – це похибка вимірювання, виражена в одиницях вимірюваної величини та знаходиться за формулою (3.2).

Відносна похибка вимірювання – це похибка вимірювання, виражена як відношення абсолютної похибки до результату вимірювання. Відносну похибку у частках вимірюваної величини або у відсотках знаходять зі співвідношення:

$$\delta = \frac{\Delta}{X} \cdot 100 \% . \quad (3.3)$$

Приведена похибка – це похибка вимірювання, виражена як відношення абсолютної похибки до верхньої межі діапазону вимірювання.

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_{\max}} \cdot 100 \% . \quad (3.4)$$

Вираження похибок вимірювання в абсолютній, відносній або приведеній формі обумовлено історичними традиціями, які склалися в певних галузях вимірювань. Ці традиції часто знаходять закріплення в нормативних документах.

За джерелами виникнення похибки вимірювання бувають: інструментальні, методичні та суб'єктивні (похибки оператора).

Інструментальна похибка – складова похибки вимірювання, зумовлена властивостями засобу вимірювання. Ця похибка в свою чергу може містити кілька компонентів, зокрема, похибку засобу вимірювання та похибку обумовлену взаємодією засобу вимірювання з об'єктом вимірювання.

Методична похибка – складова похибки вимірювання, обумовлена недосконалістю методу вимірювання або невідповідністю об'єкта вимірювання його моделі, прийнятій для вимірювання.

Суб'єктивна похибка – складова похибки вимірювання, обумовлена індивідуальними властивостями оператора.

Така класифікація зручна для ідентифікації компонентів повної похибки вимірювання з метою її оцінювання.

За закономірностями виникнення та прояву розрізняють: систематичні та випадкові похибки.

1. Систематична похибка – складова загальної похибки вимірювання, яка залишається постійною або закономірно змінюється під час повторних вимірювань однієї й тієї ж величини.

2. Випадкова похибка – складова загальної похибки вимірювання, яка змінюється випадковим чином (як за знаком, так і за величиною) під час повторних вимірювань однієї і тієї ж величини. Таким чином, повна похибка вимірювання є сумою систематичної та випадкової похибок. Випадкові похибки можна виявити шляхом проведення повторних вимірювань, оскільки вони призводять до мінливості їх результатів. В цьому відношенні небезпечнішими є систематичні похибки, оскільки вони часто лишаються непоміченими. Якщо змінну систематичну похибку ще можна виявити за результатами повторних вимірювань методами дисперсійного аналізу або інженерними методами, то не існує математичних методів для виявлення постійних систематичних похибок. Постійні систематичні похибки можуть бути виявлені в результаті ретельного аналізу вимірювальної процедури (методики вимірювання) або експериментально в результаті спеціальних досліджень.

Класифікація похибок за закономірностями виникнення та прояву використовується:

1. Під час розрахунку характеристик похибки вимірювання. В залежності від того, до систематичних чи випадкових відносяться ті чи інші похибки, використовуються різні методи їх сумування.

2. Під час вибору способів зменшення повної похибки, якщо вона перевищує прийнятне значення. Способи усунення, врахування або зменшення похибки кінцевого результату вимірювання залежать також від того, до якої групи (систематичних чи випадкових похибок) відносяться ті чи інші компоненти повної похибки вимірювання.

В окрему групу слід виділити грубі (надмірні) похибки.

Груба похибка – похибка вимірювання, яка істотно перевищує очікувану за даних умов похибку.

Результати, що містять грубу похибку, називаються промахами. Такі результати мають бути обов'язково виявлені та вилучені.

3.2 Систематичні похибки вимірювання

Систематична похибка (systematic error) – складова загальної похибки вимірювання, яка залишається постійною або закономірно змінюється під час повторних вимірювань однієї й тієї ж величини.

Причинами виникнення систематичних похибок є:

- відхилення параметрів реальних засобів вимірювань від розрахункових значень, передбачених схемою;
- похибки градування чи невеликий зсув шкали приладу;
- неточність мір фізичних величин;
- старіння матеріалів, із яких виготовлені засоби вимірювань;
- відхилення значень впливних величин (температури, вологості повітря, напруженості зовнішніх електричних та магнітних полів тощо) під час вимірювання від їх значень під час градування засобів вимірювання.

За характером зміни систематичні похибки поділяються на постійні та змінні. Змінні систематичні похибки, в свою чергу, поділяються на періодичні та прогресуючі:

1. Періодичною називається похибка, що змінюється за періодичним законом. Наприклад, періодичною є похибка, обумовлена зміною температури протягом доби.

2. Прогресуючими називаються похибки, що змінюються монотонно (збільшуються або зменшуються) в загальному випадку за складним, найчастіше невідомим законом. До таких похибок, зокрема, належать похибки, обумовлені зміною властивостей елементів приладів, наприклад, внаслідок нагрівання електронних приладів у процесі експлуатації.

Систематичні похибки є найбільш небезпечними, оскільки часто лишаються непоміченими. Постійні систематичні похибки не можуть бути виявлені ніякими математичними методами.

Більшість систематичних похибок може бути виявлена та оцінена шляхом теоретичного аналізу властивостей об'єкта, умов вимірювання, особливостей методу, характеристик застосовуваних засобів вимірювань тощо. Звідси і найпоширеніший спосіб зменшення сумарної систематичної похибки – виявлення та за можливості усунення причин виникнення систематичних похибок. Систематичні похибки, обумовлені стабільними фізичними ефектами, можуть бути також розраховані теоретично та усунені шляхом введення поправок.

Ще одним способом виявлення та усунення постійних систематичних похибок є експериментальне їх отримання з метою визначення їх значень та внесення поправок до результату вимірювання. Інструментальні складові повної систематичної похибки можуть бути виявлені шляхом перевірки (калібрування) засобів вимірювань у робочих умовах експлуатації.

Ефективним способом усунення систематичних похибок є застосування спеціальних методів вимірювання, тобто вилучення цих похибок безпосередньо в процесі вимірювання. Серед них найбільш універсальними є методи порівняння з мірою – метод заміщення або протиставлення. Вони дозволяють вилучити більшість систематичних похибок.

За цими методами з допомогою приладу порівняння (компаратора) значення вимірюваної величини порівнюють зі значенням величини, яка відтворюється мірою. Метод протиставлення полягає в тому, що вимірювання проводять двічі таким чином, щоб причина похибки першого результату виявляла протилежну дію на результат другого вимірювання.

Наприклад, під час першого зважування на рівноплечих вагах маса тіла, що перебуває на одній тарілці, врівноважується гирями, розміщеними на протилежній тарілці. Під час повторного зважування тіло і гирі міняють місцями. Таким чином вилучають похибку від нерівноплечесті терезів.

За методу заміщення вимірюваний об'єкт замінюють відомою мірою, яка перебуває в тих же умовах. Наприклад, під час вимірювання опору невідомий опір включається в електричне коло (часто для цього використовують мостову схему) і коло врівноважують. Після цього, не змінюючи схеми, вимірюваний об'єкт замінюють магазином опору. За результат вимірювання приймається значення опору магазину, за якого відновлюється рівновага кола.

У будь-якому разі при порівнянні з мірою до результату буде входити похибка міри порівняння.

Однак, оскільки точність мір зазвичай вища від точності інших засобів вимірювань, ці методи часто забезпечують істотне підвищення точності вимірювання.

У ряді випадків вилучити систематичну похибку можна способом компенсації за знаком, суть якого полягає в тому, що вимірювання проводять двічі таким чином, щоб похибка входила в результати з протилежними знаками. Її вилучають, розраховуючи середнє значення.

Прикладом може слугувати вилучення похибки, обумовленої магнітним полем Землі, коли вимірювання проводять двічі, повертаючи прилад перед другим вимірюванням на 180° в горизонтальній площині. До цього способу відноситься також спосіб вилучення похибки від паразитної термо-е.р.с. під час вимірювання напруги потенціометричним методом зі зміною напрямку протікання струму. При цьому полярність напруги буде змінюватись зі зміною напрямку струму, а полярність термо-е.р.с. не залежить від його напрямку.

Слід зауважити, що усунути повністю систематичну похибку вимірювання неможливо.

Таким чином, у кінцевому результаті вимірювання завжди залишається певна систематична похибка, яку часто називають *невилученим залишком систематичної похибки* або просто *невилученою систематичною похибкою*.

3.3 Випадкові похибки вимірювання

Випадкова похибка (random error) – складова загальної похибки вимірювання, яка змінюється випадковим чином (як за знаком, так і за величиною) під час повторних вимірювань однієї й тієї ж величини.

Причини виникнення:

Випадкові похибки обумовлені як випадковим характером прояву фізичних процесів у засобах вимірювання, так і випадковими змінами умов вимірювань, що практично неможливо врахувати. Серед основних причин виникнення випадкових похибок можна виділити:

- конструктивні та технологічні недосконалості вузлів та деталей приладів;
- випадкові коливання зовнішніх впливних величин – температури, вологості повітря, атмосферного тиску, напруженості зовнішніх електричних та магнітних полів тощо;
- нестабільність живлення електронних приладів;
- суб'єктивні помилки оператора;
- вібрації;
- теплові шуми в електронних приладах;
- просторова (неоднорідність) та часова нестабільність об'єкта вимірювання.

Характерні особливості:

1. Імовірність виникнення великих випадкових похибок менша за імовірність появи малих.
2. Імовірність появи однакових за модулем, але протилежних за знаком випадкових похибок однакова.

Методи виявлення та зменшення випадкових похибок вимірювання:

Оскільки випадкова похибка змінюється під час проведення повторних вимірювань навіть за однакових умов, то це призводить до мінливості результатів вимірювань. Таким чином, випадкова похибка може бути виявлена на основі статистичного аналізу результатів повторних вимірювань, проведених

за умов збіжності (за одних і тих самих умов).

Непрогнозований характер мінливості випадкових похибок призводить до практичної неможливості коригування результатів вимірювань, тобто до внесення поправок на величину випадкової похибки, оскільки для конкретного результату її значення лишається невідомим. Тим не менше, часто існує необхідність зменшити випадкову похибку результату вимірювання, наприклад, якщо вона перевищує прийнятне значення. Для цього можуть бути використані такі методи:

1. Усунення причин виникнення випадкових похибок.

Наприклад, якщо відомо, що джерелом істотної випадкової похибки є випадкові коливання напруги в мережі живлення приладу, можна його живлення здійснювати через стабілізатор напруги. Зрозуміло, що усунення всіх ефектів, які призводять до появи випадкової похибки неможливе або через фізичні фактори, або через економічні причини.

2. Математична обробка результатів повторних вимірювань, спрямована на зменшення випадкової похибки.

Усереднення результатів повторних вимірювань завдяки другій властивості випадкових похибок дозволяє зменшити випадкову похибку кінцевого результату вимірювання. В ідеалі, за нескінченно великої кількості вимірювань, усереднення дозволило б звести випадкову похибку до нуля, оскільки однакові за модулем, але протилежні за знаком випадкові похибки, які за другою властивістю зустрічаються однаково часто, при усередненні себе повністю б компенсували. На практиці, звичайно, через обмежену кількість результатів вимірювань повної компенсації добитися не вдається (слід зазначити, що і практичної потреби в цьому немає), однак все ж випадкова похибка середнього значення зменшується зі зростанням кількості результатів повторних спостережень.

Вибір методу зменшення випадкової похибки результату вимірювання залежить як від можливості впливу на ті чи інші джерела виникнення випадкових похибок, так і від економічних чинників, оскільки і заходи з усунення причин, і проведення повторних вимірювань вимагають додаткових

затрат часу та ресурсів.

Математичний опис та алгоритм оцінювання випадкових похибок.

Найповніше випадкова похибка як випадкова величина може бути описана з допомогою закону розподілу. В термінах теорії ймовірності випадкова похибка (ε) – це відхилення похибки вимірювання (Δ) від її математичного очікування (M_x):

$$\varepsilon = \Delta - M_x. \quad (3.5)$$

Таким чином, випадкова похибка є центрованою випадковою величиною, отже, її математичне сподівання рівне нулю.

Встановлення закону розподілу випадкової похибки вимагає значних затрат часу та ресурсів, тому на практиці часто замість встановлення закону розподілу оцінюють певні її характеристики – середнє квадратичне відхилення (точкова характеристика) або довірчі границі (інтервальна характеристика). Вказані характеристики можуть бути оцінені за менших затрат в порівнянні із затратами на встановлення закону розподілу.

Статистично середнє квадратичне відхилення випадкової похибки ($\sigma(x)$) результату вимірювання (x) може бути наближено оцінено за результатами повторних вимірювань ($x_1, x_2, \dots, x_n$), одержаними в умовах збіжності, за наступною формулою:

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3.6)$$

де $\bar{x}$ – середнє значення ряду повторних спостережень.

Як видно із аналізу формули (3.6) величина $(x_i - \bar{x})$ фактично є оцінкою випадкової похибки (ε_i) результату $i^{\text{го}}$ вимірювання.

Середнє квадратичне відхилення (с.к.в.) використовується не лише як характеристика похибки, але і як проміжний параметр під час розрахунку

довірчих границь випадкової похибки. Якщо випадкова похибка розподілена за нормальним законом розподілу, то довірчі границі похибки ($\varepsilon(P)$) для довірчої ймовірності (P) можуть бути оцінені за формулою:

$$\varepsilon(P) = \pm t(P, n-1) \cdot \sigma(x), \quad (3.7)$$

де $t(P)$ – коефіцієнт Стьюдента.

Випадкова похибка середнього арифметичного.

Як уже зазначалося, усереднення результатів повторних вимірювань дозволяє зменшити випадкову похибку. Зв'язок середнього квадратичного відхилення випадкової похибки середнього арифметичного $\sigma(\bar{x})$ з середнім квадратичним відхиленням випадкової похибки результату одиничного вимірювання $\sigma(x)$ визначається залежністю:

$$\sigma(\bar{x}) = \frac{\sigma(x)}{\sqrt{m}}, \quad (3.8)$$

де m – число результатів повторних вимірювань, для яких розраховувалося середнє значення.

Таким чином, випадкова похибка середнього арифметичного у раз $\sqrt{m}$ менша від випадкової похибки результату одиничного вимірювання. Наприклад, якщо випадкову похибку необхідно зменшити в 2 рази, то число результатів повторних вимірювань, за якими буде розраховано середнє значення, необхідно збільшити в 4 рази.

Розрахунок довірчих границь випадкової похибки середнього арифметичного проводиться за вказаними вище для випадкової похибки результату одиничного вимірювання формулами з відповідною заміною середнього квадратичного відхилення. Причому, дані формули для середнього арифметичного справедливі навіть у тому випадку, коли результати одиничних вимірювань не розподілені за нормальним законом. Це обумовлено тим, що

відповідно до центральної граничної теореми теорії ймовірності незалежно від розподілу результатів одиничних вимірювань середнє арифметичне буде розподілене приблизно за нормальним законом. Розподіл середнього арифметичного тим ближчий до нормального, чим більша кількість результатів використовується під час розрахунку середнього значення.

Отже, збільшення числа повторних вимірювань в умовах збіжності та наступна їхня спільна математична обробка (усереднення) дозволяє зменшити випадкову похибку до як завгодно малого значення. Однак, насправді, зменшувати випадкову похибку є сенс лише в тому випадку, якщо вона в сумі з систематичною перевищує допустиму величину. По-друге, навіть коли сумарна похибка перевищує прийнятне значення або необхідно досягти максимально можливої точності, немає сенсу зменшувати випадкову похибку, якщо вона неістотна в порівнянні з систематичною. Неістотною вважається випадкова похибка, яка в три чи більше разів менша від систематичної. В такому разі зменшення випадкової похибки вже не буде впливати на точність результату вимірювання, оскільки домінувати буде систематична похибка.

Випадкова похибка опосередковано вимірюваних величин.

Випадкова похибка опосередковано вимірюваної величини (y), значення якої знаходять за відомою залежністю через інші величини як $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, може бути оцінена за значеннями випадкових похибок цих інших (вхідних) величин. Середнє квадратичне відхилення випадкової похибки результату вимірювання $\sigma(y)$ можна знайти за формулою:

$$\sigma(y) = \sqrt{\sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_k} \cdot \sigma(x_k) \right)^2}. \quad (3.9)$$

Вказана формула (3.9) показує, як випадкові похибки вхідних величин вводяться у похибку величини, що залежить від них, тому її часто називають законом поширення випадкових похибок.

Довірчі границі випадкової похибки опосередковано вимірюваної

величини розраховують через середнє квадратичне відхилення її випадкової похибки за формулами, аналогічними до формул для прямих вимірювань.

3.4 Обробка результатів вимірювань із багаторазовими спостереженнями

При багаторазовому вимірюванні одержують ряд результатів спостережень (експериментальних даних) $x_1, x_2, \dots, x_n$. Результат будь-якого $i^{\text{го}}$ спостереження x_i може відрізнитись від дійсного значення X_0 вимірюваної ФВ, тобто містити похибку Δ_i . У залежності від характеру зміни похибки поділяють на систематичні й випадкові. Підсумкова похибка результату вимірювання складається з систематичної та випадкової складових. Систематична похибка обов'язково повинна бути виявлена та виключена з результатів спостережень із використанням спеціальних методів або в результати спостережень слід внести виправлення. Наявність випадкових похибок виявляється при повторних спостереженнях незмінної (постійної) ФВ і визначається в тому, що результати спостережень змінюються випадково та не збігаються один з одним.

Результат багаторазового вимірювання та випадкову складову похибки результату оцінюють статистичними методами. Оцінка вимірюваної ФВ, що отримана при обробці експериментальних даних, вважається найкращою, якщо вона спроможна, незміщена й ефективна. Оцінка є спроможною, якщо при збільшенні кількості експериментальних даних вона наближається до дійсного значення вимірюваної ФВ. При незміщеній оцінці її математичне очікування дорівнює вимірюваній величині. Оцінка вважається ефективною, якщо її середнє квадратичне відхилення (с.к.в.) менше ніж с.к.в. будь-якої іншої оцінки цієї вимірюваної ФВ.

Результати спостережень багаторазового вимірювання, що отримані експериментально в n незалежних дослідах, при аналізі розглядають як реалізації деякої випадкової ФВ, що найчастіше відповідають нормальному закону розподілу ймовірностей. Найкращими оцінками для дійсного значення вимірюваної ФВ та випадкової похибки вважаються оцінки максимальної

правдоподібності: а) для вимірюваної ФВ – середнє арифметичне результатів спостережень, б) для випадкової похибки – с.к.в. (дисперсія). Нижче викладені основні положення обробки результатів прямих багаторазових вимірювань із застосуванням оцінок максимальної правдоподібності.

1. При нормальному розподілі результатів спостережень прямого багаторазового вимірювання за результат вимірювання (тобто за оцінку дійсного значення вимірюваної ФВ) приймають середнє арифметичне результатів спостережень (експериментальних даних), із яких виключені систематичні похибки:

$$\overline{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i. \quad (3.10)$$

Якщо в процесі виконання спостережень систематична похибка залишається постійною, можна спочатку обчислити середнє арифметичне $\overline{X}$, а потім виключити з нього систематичну похибку.

2. В якості характеристики випадкового розсіювання результатів спостережень (експериментальних даних) приймають оцінку с.к.в. результатів спостережень, що обчислюється за наступною формулою:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \overline{X})^2}. \quad (3.11)$$

3. Результат багаторазового вимірювання $\overline{X}$ обчислений із використанням обмеженого ряду експериментальних даних, обтяжений випадковою похибкою та його значення може змінюватись в деяких межах при переході від одного ряду спостережень до іншого. Випадкову похибку результату багаторазового вимірювання (середнього арифметичного результатів спостережень $\overline{X}$), як випадкової величини, характеризує с.к.в. середнього арифметичного (с.к.в. результату вимірювання):

$$S(\bar{X}) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} = \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (3.12)$$

Якщо в якості результату багаторазового вимірювання прийняти середнє арифметичне $\bar{X}$, то випадкову похибку цього результату характеризує с.к.в. $S(\bar{X})$; якщо ж за результат вимірювання приймається результат будь-якого спостереження x_i , то випадкова складова похибки такого результату зростає і її характеризує СКВ результатів спостережень S . Отже, багаторазове вимірювання з осередненням результатів спостережень дозволяє значно підвищити точність результату вимірювання за рахунок зменшення впливу на нього випадкової похибки.

Середні квадратичні відхилення називають точковими оцінками випадкових похибок результатів спостережень і середнього арифметичного (результату вимірювання), відповідно. Якщо отриманий результат багаторазового вимірювання планується використати для подальших розрахунків або для порівняння з іншими результатами вимірювань, його доцільно надавати із застосуванням точкових оцінок у наступному вигляді:

$$Q = \bar{X}, \quad S(\bar{X}) = \dots, \quad n = \dots$$

Якщо ж результат вимірювання остаточний, його доцільно надавати у вигляді інтервальної оцінки, яку характеризує розмір довірчого інтервалу, що накриває дійсне значення вимірюваної величини із заданою (довірчою) ймовірністю P . Відомо, що при нормальному розподілі результатів спостережень, із яких попередньо виключені систематичні похибки, дійсне значення вимірюваної величини з довірчою ймовірністю P знаходиться в межах інтервалу: $[\bar{X} - t \cdot S(\bar{X}), \bar{X} + t \cdot S(\bar{X})]$.

Отже, результат вимірювання в цьому випадку надають у наступному вигляді:

$$\bar{X} \pm \varepsilon(P), \quad P = \dots, \quad n = \dots$$

4. Вище зазначалось, що результат будь-якого спостереження може містити як випадкову (Δ), так і систематичну (Δ_s) похибку. Систематичні похибки спотворюють результати спостережень найбільше істотно. Тому усуненню їх надається важливе значення. Будь-яка систематична похибка обов'язково повинна бути виявлена та виключена з результату спостережень. Це можна зробити до початку вимірювання шляхом виявлення й усунення джерел систематичних похибок (профілактика похибок) або в процесі експерименту застосуванням спеціальних методів (експериментальне виключення похибок). Якщо ж систематична похибка не може бути виключена у наведений спосіб, а існує можливість обчислити її, то в результати вимірювань (експериментальні дані) вносять виправлення – відомі поправки. Поправка за числовим значенням дорівнює систематичній похибці і протилежна їй за знаком ($\Pi = -\Delta_s$). Найбільш розповсюдженим способом внесення поправки є алгебраїчне підсумовування результату вимірювання та поправки (з урахуванням її знаку). Отже, при цьому способі виключення систематичної похибки результат вимірювань виправляють шляхом обчислення (виключення похибки обчисленням).

Результати спостережень можуть вміщувати залишки систематичних похибок вже після виключення систематичних похибок і внесення виправлень. Ці залишки складають невиключені систематичні похибки (НСП) експериментальних даних. У якості НСП результатів вимірювань найчастіше виступають інструментальні похибки (похибки ЗВ, що застосовуються), похибки методу вимірювання, похибки, що обумовлені дією зовнішніх дестабілізуючих факторів, тощо. Тобто на результат вимірювання можуть впливати декілька джерел НСП. В метрології існує правило, відповідно до якого обов'язково потрібно оцінювати межі можливих значень систематичних похибок, якщо їх виключення у будь-який спосіб виявляється неможливим. Отже, для отримання НСП результату вимірювання необхідно підсумувати

складові НСП всіх джерел. У більшості випадків, систематичні похибки – детерміновані величини, однак складові НСП від різних джерел розглядають як випадкові величини. При цьому розподіл складових НСП усередині заданих меж вважають рівномірним і довірчу межу НСП результату вимірювання оцінюють за наступною формулою:

$$\Delta_s(P) = k \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^m \Delta_{Si}^2}, \quad (3.13)$$

де k – коефіцієнт, що відповідає обраній довірчій імовірності P та залежний від кількості складових НСП (m) і від їх співвідношення; Δ_{Si} – межа $i^{\text{ї}}$ складовою НСП.

5. Подальша обробка результатів прямих багаторазових вимірювань зводиться до обчислення довірчої межі підсумкової похибки $\Delta(P)$.

Підсумкову похибку результату вимірювання можна характеризувати довірчою межею тільки випадкової похибки, якщо НСП у порівнянні з випадковою похибкою мала. Тобто, $\Delta(P) = \varepsilon(P) = t \cdot S(\bar{X})$, якщо $\frac{\Delta_s(P)}{S(\bar{X})} \leq 0,8$.

Якщо ж мала випадкова похибка, то підсумкову похибку результату вимірювання може характеризувати тільки довірча межа НСП. Тобто, $\Delta(P) = \Delta_s(P)$, якщо $\frac{\Delta_s(P)}{S(\bar{X})} \geq 8$.

Якщо виконується умова $0,8 < \frac{\Delta_s(P)}{S(\bar{X})} < 8$, то підсумкова похибка результату має враховувати обидві складові (випадкову та НСП) і для розрахунку довірчої похибки результату вимірювання використовують наступну емпіричну формулу:

$$\Delta(P) = t_{\Sigma} \cdot S_{\Sigma}, \quad (3.14)$$

$$\text{де } t_{\Sigma} = \frac{\Delta_s(P) + \varepsilon(P)}{S(\bar{X}) + S_{\theta}}, \quad S_{\Sigma} = \sqrt{S(\bar{X})^2 + S_{\theta}^2}, \quad S_{\theta} = \sqrt{\Delta_s(P)^2 / 3}.$$

У наведеній формулі довірчу межу випадкової похибки та межу НСП результату вимірювання необхідно обирати при одній довірчій імовірності P .

Результат вимірювання записують у вигляді: $\bar{X} \pm \Delta(P)$, $P = \dots$, $n = \dots$. Якщо ж він використовується для подальшого аналізу, або порівняння з іншими результатами, то потрібно вказувати окремо межу НСП і СКВ випадкової похибки: $Q = \bar{X}$, $S(\bar{X}) = \dots$, $\Delta_s(P) = \dots$, $P = \dots$, $n = \dots$.

Виявлення та виключення грубих похибок вимірювань.

Інколи результат того чи іншого окремого спостереження значно відрізняється від результатів інших спостережень, отриманих у однакових умовах. Отже, такий результат може містити грубу похибку (промах). Грубими похибками вимірювань називають такі, що істотно перевищують очікувані похибки за даних умов вимірювань. Причинами появи результатів з грубими похибками можуть бути помилки оператора, несправність засобів вимірювань, різка зміна умов вимірювань, сильна короточасна завада, тощо. Результати спостережень, що містять грубі похибки, треба визначити й виключити з розгляду. Однак визначити результат із грубою похибкою не завжди буває легко (особливо при одноразових вимірюваннях). Чим більше ряд повторних спостережень, тим легше визначити результат, що містить грубу похибку.

Похибки вимірювань, як і результати вимірювань, варто розглядати як випадкові величини, що підкоряються статистичним законам розподілу ймовірностей – найчастіше нормальному. Грубі похибки – це великі випадкові похибки. Їх поява теоретично має малу імовірність (наприклад, кілька похибок на 1 млн. спостережень), але все-таки вони можливі; і не виключена можливість, що вже один із перших результатів спостережень містить грубу похибку і не заслуговує довіри. На практиці між результатами, що містять грубі похибки, і результатами, що заслуговують довіри, зазвичай не можна встановити чітку межу. Питання про те, чи містить даний результат грубу

похибку, вирішується одним із методів перевірки статистичних гіпотез. Щодо вияву грубих похибок гіпотеза, що перевіряється, припускає, що результат спостереження x_i не містить грубої похибки і є одним зі значень випадкової величини X із визначеним законом розподілу ймовірностей (частіше – це нормальний закон). Сумнів у першу чергу викликають найбільший (x_{max}) і найменший (x_{min}) з результатів спостережень.

Перевірка гіпотези щодо вияву грубих похибок зводиться до наступного:

– для ряду результатів спостережень, що отриманий при багаторазовому вимірюванні, визначають статистичні оцінки параметрів нормального закону розподілу ймовірностей – оцінку математичного очікування:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.15)$$

та оцінку дисперсії:

$$D_x = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2. \quad (3.16)$$

– визначають допоміжні відношення:

$$\begin{cases} v_1 = \frac{X_{\max} - \bar{X}}{\sqrt{D_x}}, \\ v_2 = \frac{\bar{X} - X_{\min}}{\sqrt{D_x}}. \end{cases} \quad (3.17)$$

– за довідковою таблицею відповідно до кількості результатів спостережень n та заданою (прийнятою) довірчою імовірністю P знаходять найбільше значення V_p , яке випадкова величина V може приймати.

– якщо обчислене значення v_1 (чи v_2 , або v_1 та v_2 разом) виявляється

менше, ніж V_p , то вказана вище гіпотеза приймається і робиться висновок, що результат x_{max} (чи x_{min} , або x_{max} і x_{min} разом) не містить грубої похибки;

– якщо ж обчислене значення v_1 (чи v_2 , або v_1 і v_2 разом) виявляється більшим, ніж V_p , то результат x_{max} (чи x_{min} , або x_{max} і x_{min} разом) варто вважати таким, що містить грубу похибку. У цьому випадку результат x_{max} (чи x_{min} , або x_{max} і x_{min} разом) виключають із ряду спостережень і новий ряд, що отримують, знову перевіряють на наявність грубих похибок у спосіб, наведена вище. При повторній перевірці застосовують оцінки параметрів розподілу нового ряду, отриманого після виключення результатів, що містять грубі похибки.

Слід зазначити, що надійність кожного з можливих висновків визначає прийнята довірна імовірність P .

3.5 Оцінка результатів нерівноточних вимірювань

На практиці важко забезпечити повну відтворюваність умов повторних спостережень, якщо багаторазове вимірювання потребує значний час для його проведення. Зміна умов приводить до одержання груп результатів вимірювань із різними характеристиками похибок. Такі групи вимірювань називають *нерівноточними*. Якщо характеристики похибок груп вимірювань однакові, такі групи називають рівноточними. Як рівноточні, так і нерівноточні групи вимірювань можуть бути спільно статистично оброблені з метою оцінки результату вимірювання та його похибки.

Поява нерівноточних груп (рядів, серій) вимірювань є наслідком недотримання єдності вимірювань. При цьому, крім зміни умов вимірювань, поява нерівноточних результатів можлива з наступних причин:

а) у ряді випадків незмінну ФВ вимірюють із використанням різних засобів вимірювань, що можуть давати нерівноцінні по точності результати;

б) вимірювання можуть виконуватися кількома дослідниками чи групами дослідників різної кваліфікації; при цьому переслідується мета одержати можливо більшу кількість результатів спостережень і одночасно виключити або згладити індивідуальні похибки дослідників;

в) вимірювання, що відносяться до зразкових мір чи вимірювальних приладів, часто виконуються з деякою перервою в часі. Зрештою накопичуються ряди спостережень і виникає необхідність об'єднати всі отримані результати і на основі їх математичної обробки одержати більш достовірне значення вимірюваної ФВ. Точність рядів спостережень різна, з одного боку, через те, що для вперше проведених вимірювань характерним є більше розсіювання результатів, а з іншої сторони через те, що з часом ЗВ старіють і змінюються їх характеристики;

г) нерівноточними варто вважати і групи, у яких вимірювання однієї ФВ виконуються різними методами, що характеризуються різними похибками.

У всіх подібних випадках при оцінці результату треба дотримуватися методів обробки результатів нерівноточних рядів спостережень, задача яких у загальному випадку полягає в знаходженні найбільш імовірного значення вимірюваної ФВ. Для того, щоб виникаючі зміни умов виміру, або зміни, що вводяться свідомо, не порушували вимог теорії похибок, кожна група результатів спостережень, що відносяться до однакових умов (даний дослідник, дане ЗВ і т.д.), повинна бути оцінена з погляду ступеня довіри (її ваги) у загальній сукупності результатів, що підлягають обробці.

У випадку *обробки результатів* нерівноточного вимірювання основою для оцінки результату вимірювання та його похибки є наступні дані:

1) $\overline{X_1}, \overline{X_2}, \dots, \overline{X_m}$ – середні арифметичні значення для m груп (серій, рядів) рівноточних результатів спостережень постійної ФВ (систематичні похибки попередньо повинні бути виключені);

2) $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$ – середні квадратичні відхилення (с.к.в.) результатів спостережень (чи їх оцінки) в окремих рівноточних групах (серіях, рядах);

3) $n_1, n_2, \dots, n_m$ – кількість спостережень у кожній рівноточній групі;

4) m – кількість груп.

Отже, у випадку нерівноточного вимірювання значення вимірюваної ФВ, найбільш близьке до її дійсного значення, визначається за формулою:

$$\overline{\overline{X}} = \frac{\overline{X_1} \cdot P_1 + \overline{X_2} \cdot P_2 + \dots + \overline{X_m} \cdot P_m}{P_1 + P_2 + \dots + P_m}, \quad (3.18)$$

де $\overline{\overline{X}}$ – середнє зважене; $P_1, P_2, \dots, P_m$ – ваги груп.

Позначення ваги в (3.18) тим же символом, що й імовірності (P), не випадкове. Найбільш правильним значенням ваги для даного результату є його імовірність. Але на практиці при обробці результатів вимірювань імовірності заздалегідь зазвичай невідомі. Тому ваги груп (як оцінки відповідних ймовірностей) найчастіше обчислюють за наведеними нижче формулами (3.19) або (3.20):

$$P_1 : P_2 : P_3 = \frac{1}{\sigma_1^2} : \frac{1}{\sigma_2^2} : \frac{1}{\sigma_3^2}. \quad (3.19)$$

Відповідно до формули (3.19) ваги груп приймають обернено пропорційними дисперсіям результатів спостережень в рівноточних групах.

Іншим критерієм для визначення ваги групи результатів може бути кількість спостережень у кожній групі (наприклад при $\sigma = \text{const}$). В цьому випадку ваги груп обчислюють у такий спосіб:

$$P_1 : P_2 : P_3 = n_1 : n_2 : n_3. \quad (3.20)$$

Вага групи характеризує ступінь нашої довіри до результатів відповідної групи спостережень. Чим більше кількість спостережень у кожній даній групі і чим менше дисперсія результатів спостережень, тим більше ступінь довіри до отриманого при цьому середнього арифметичного і з тим більшою вагою воно повинно враховуватися при визначенні оцінки дійсного значення ФВ.

Випадкову похибку результату нерівноточного вимірювання (середнього зваженого) характеризує с.к.в. середнього зваженого:

$$\sigma(\overline{X}) = \frac{1}{\sqrt{\sum_{j=1}^m \left[\frac{1}{\sigma^2(\overline{X}_j)} \right]}}. \quad (3.21)$$

де $\sigma^2(\overline{X}_j)$ – дисперсія середнього арифметичного, що обчислена для j^i групи результатів спостережень;

$$\sigma^2(\overline{X}_j) = \sigma_j^2 / n_j, \quad (3.22)$$

де σ_j^2 – дисперсія результатів спостережень; n_j – кількість результатів спостережень у відповідній групі.

При обробці результатів вимірювань зазвичай теоретичні с.к.в. $\sigma(\overline{X}_j)$ та σ_j є невідомими. Тому використовують їх статистичні оцінки:

$$\begin{cases} S_j = \sqrt{\frac{1}{n_j - 1} \sum_{i=1}^{n_j} (x_{i,j} - \overline{X}_j)^2}; \\ S(\overline{X}_j) = \sqrt{\frac{1}{n_j \cdot (n_j - 1)} \sum_{i=1}^{n_j} (x_{i,j} - \overline{X}_j)^2} = \frac{S_j}{\sqrt{n_j}}. \end{cases} \quad (3.23)$$

З формули (3.23) видно, що с.к.в. середнього зваженого менше кожного з с.к.в. середнього арифметичного окремих груп спостережень. Це означає, що при обробці нерівноточних рядів спостережень точність результату вимірювання (середнього зваженого) підвищується. В цьому і полягає доцільність застосування методики обробки нерівноточних результатів.

3.6 Нормування похибок засобів вимірювання та їх класи точності

Під нормуванням похибки засобу вимірювань (ЗВ) розуміють встановлення межі значення похибки ЗВ, що припускається. Якщо реальні

похибки ЗВ знаходяться у встановлених при нормуванні межах, то ЗВ вважається метрологічно справним, у протилежному випадку – метрологічно не справним. При нормуванні похибок для різних ЗВ використовують абсолютні, відносні та приведені значення похибки.

Нормування абсолютної похибки ЗВ. При нормуванні абсолютної похибки ЗВ межа абсолютної основної похибки ЗВ, що припускається, може бути задана наступною формулою:

$$\Delta p = \pm a. \quad (3.24)$$

Якщо абсолютна похибка ЗВ у всьому робочому діапазоні обмежена постійною межею a , що не залежить від значення вимірюваної величини X (тобто, абсолютна похибка ЗВ у всьому робочому діапазоні залишається майже незмінною). Така похибка зветься адитивною або похибкою нуля.

Якщо похибка ЗВ росте пропорційно росту вимірюваної ФВ X та при $X=0$ похибка $\Delta=0$, то така похибка зветься мультиплікативною або похибкою чутливості.

Слід зазначити, що не існує приладів з чисто мультиплікативною похибкою, тому що неможливо створити ЗВ з похибкою, що дорівнює нулю при $X=0$. Можливість існування такого ЗВ означала б можливість вимірювання зі скінченою (дуже малою) інструментальною похибкою будь-які, як завгодно малі, значення відповідної фізичної величини. Крім того, у будь-якому ЗВ існують адитивні похибки від власного шуму, дрейфу, наведень, тертя, люфтів та ін. Тому в реальних ЗВ абсолютна похибка на початку діапазону вимірювання (Δ_n) зазвичай менша від похибки наприкінці діапазону вимірювання (Δ_k), а підсумкова похибка містить одночасно і адитивну, і мультиплікативну складові.

При нормуванні абсолютної похибки ЗВ в цьому випадку межа абсолютної основної похибки, що припускається, задається наступною формулою:

$$\Delta p = \pm(a + b \cdot X). \quad (3.25)$$

У такому випадку постійна a характеризує абсолютну адитивну складову похибки ЗВ та b – відносну мультиплікативну складову похибку, X – результат вимірювання.

Нормування приведеної похибки ЗВ. При нормуванні приведеної похибки ЗВ межу приведеної основної похибки ЗВ, що припускається, задають наступною формулою:

$$\gamma_p = \pm P, \quad (3.26)$$

де число P вибирається з ряду $P=(1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6) \cdot 10^n$, $n=1;0;-1;-2$ і т.д.

Нормування відносної похибки ЗВ. При нормуванні відносної похибки ЗВ межа відносної основної похибки ЗВ, що припускається, може бути задана наступною формулою:

$$\delta_p = \pm q, \quad (3.27)$$

де постійне число q вибирається з того ж ряду, що і P в формулі (3.26).

Слід мати на увазі, що у аналогових вимірювальних приладів зі стрілочним покажчиком кратність піддіапазонів вимірювань дорівнює 3,16 (тобто 10 Дб). При застосуванні такого приладу діапазон вимірювань слід обирати так, щоб не використовувалась перша третина шкали його покажчика, а результат вимірювання знаходився у другій чи третій третині шкали. Якщо у аналогового вимірювального приладу зі стрілочним покажчиком адитивна складова похибки значно перевищує мультиплікативну складову навіть при $X=X_{max}$, то для такого ЗВ нормують приведену похибку із застосуванням формули (3.26). Якщо ж зовні першої третини шкали ЗВ мультиплікативна складова похибки значно переважає адитивну, то для такого ЗВ нормують відносну похибку із застосуванням формули (3.27).

У вимірювальних приладах із цифровим відліком кратність піддіапазонів вимірювань зазвичай обирається такою, що дорівнює 10 (20 Дб). На цифровому показнику при перемиканні діапазонів вимірювань переміщується кома. Для цифрових вимірювальних приладів (ЦВП) зазвичай нормується відносна похибка та межа відносної основної похибки, що припускається, задається наступною формулою:

$$\delta_p = \pm \left[c + d \cdot \left(\frac{X_k}{X} - 1 \right) \right], \quad (3.28)$$

де X – результат вимірювання; X_k – кінцеве значення застосованого піддіапазону вимірювання; c – коефіцієнт, що чисельно дорівнює відносній похибці наприкінці діапазону вимірювання у % (приведена похибка наприкінці діапазону); d – коефіцієнт, що чисельно дорівнює похибці на початку діапазону вимірювань, виражений у % від верхньої межі вимірювань на даному діапазоні (приведена похибка наприкінці діапазону).

Коефіцієнти c і d у формулі (3.28) вибираються з того ж ряду, що і число P у формулі (3.26).

Нормування похибки за формулою (3.28) дозволяє істотно сповільнити зростання відносної похибки ЗВ до початку діапазону. З формули (3.28) також видно, що чим ближче вимірюване значення X до X_k , тим менше відносна похибка δ . Значить при роботі з ЦВП діапазон вимірювань варто обирати таким чином, щоб результат вимірювання X був максимально ближче до X_k (при цьому кома на цифровому показнику – по можливості, «лівіше»).

Інколи при нормуванні відносної похибки ЦВП формулу (3.28) записують у наступному вигляді (якщо $c > d$):

$$\delta_p = \pm \left[a + b \cdot \left(\frac{X_k}{X} \right) \right], \quad (3.29)$$

де $b=d$ та $a=c-d$.

В обґрунтованих випадках межу похибки ЗВ (абсолютної, приведеної або відносної), що припускається, можна нормувати і іншими формулами, ніж (3.24)...(3.29), або навіть у формі таблиць, графіків та інше.

Клас точності – це узагальнена характеристика точності ЗВ, що обумовлена межею похибки, що припускається. Класи точності не встановлюються на ЗВ, для яких:

а) передбачаються роздільні норми на систематичну і випадкову складові похибки;

б) також на ЗВ, для яких істотне значення має динамічна похибка.

Позначення класу точності ЗВ залежить від способу нормування похибки ЗВ, а спосіб нормування, як встановлено вище, визначається головним чином залежністю похибки ЗВ від вимірюваної величини.

Клас точності ЗВ, для якого нормується відносна похибка формулою (3.27), позначають однією цифрою, що обирається з ряду чисел P , вираженою у відсотках і розміщеною в колі. Так, клас точності ЗВ з $\delta_p = \pm 0,005 = \pm 0,5 \%$ позначають як « $\textcircled{0,5}$ ».

Клас точності ЦВП, відносна похибка якого нормується формулою (3.28), позначають як « c/d », де числа c і d вибирають з ряду P . Так, наприклад, для ЦВП класу точності 0,02/0,01 межа відносної похибки, що припускається, розраховується за наступною формулою:

$$\delta_p = \pm \left[0,02 + 0,01 \cdot \left(\frac{X_k}{X} - 1 \right) \right].$$

Клас точності ЗВ, для якого нормується приведена похибка позначають однією цифрою, що обирається з ряду чисел P вираженою у відсотках. Наприклад, якщо $\gamma_p = \pm 0,005 = \pm 0,5\%$, то клас точності позначається як «0,5».

Якщо шкала вимірювального приладу нерівномірна, а значення X_k , що нормує прийнято таким, що дорівнює не якомусь номінальному значенню в одиницях вимірюваної ФВ, а дорівнює довжині всієї шкали ЗВ або довжині

якого-небудь її інтервалу, то клас точності позначається як «0,5».

Клас точності ЗВ, для якого нормується абсолютна похибка, позначається прописними буквами латинського алфавіту або римських цифрами. Класи точності, яким відповідають менші похибки, позначають буквами, що знаходяться ближче до початку алфавіту, або цифрами, що позначають менші числа.

ЗВ декількох ФВ або з декількома діапазонами вимірювань можуть мати два і більше класів точності. Наприклад, приладу для вимірювання електричної напруги і електричного опору можуть бути привласнені два класи точності: один – як вольтметра, інший – як омметра.

Клас точності присвоюють ЗВ при їхній розробці. При експлуатації метрологічні характеристики ЗВ, зазвичай, погіршуються. При метрологічній атестації і повірці ЗВ його клас точності може бути підтверджений або допускається зниження класу точності.

Контрольні питання:

1. У чому полягає різниця між похибкою вимірювання та оцінкою похибки вимірювання?
2. Назвіть найбільш розповсюджені ознаки, за якими класифікують похибки вимірювання.
3. Наведіть формули для абсолютної, відносної та приведеної похибок вимірювання.
4. Які бувають види похибок вимірювання за джерелом виникнення?
5. Які бувають види похибок вимірювання за закономірностями виникнення та прояву?
6. Дайте визначення терміну «систематична похибка» та назвіть основні причини їх виникнення.
7. Назвіть основні шляхи виявлення та усунення систематичних похибок вимірювання.
8. Дайте визначення терміну «випадкова похибка» та назвіть основні

причини їх виникнення.

9. Назвіть основні шляхи виявлення та зменшення випадкових похибок вимірювання.

10. Наведіть математичний опис та алгоритм оцінки випадкових похибок вимірювання.

11. Наведіть формулу для розрахунку випадкової похибки опосередкованого вимірювання.

12. Назвіть основні етапи процедури обробки результатів вимірювань із багаторазовим спостереженням.

13. Назвіть основні етапи процедури обробки результатів нерівноточних вимірювань.

14. Що таке клас точності засобу вимірювання?

15. Які метрологічні показники засобів вимірювання можуть підлягати процедурі нормування?

Рекомендована література:

1. Тартаковский, Д.Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений: учеб. для вуз. / Д.Ф. Тартаковский, А.С. Ястребов. – М.: Высш. шк., 2001. – 205 с.

2. Bewoor, A.K. Metrology & measurement / A.K. Bewoor, V.A. Kulkarni. – Noida: McGraw-Hill Education, 2009. – 558 p.

3. Селиванов, М.Н. Качество измерений. Метрологическая справочная книга / М.Н. Селиванов, А.Э. Фридман, Ж.Ф. Кудряшова. – Л.: Лениздат, 1987. – 295 с.

4. Тайманов, Р. Научно-технические основы повышения достоверности измерений / Р. Тайманов, К. Сапожникова // Метрологія та прилади. – 2014. – № 2 (46). – С. 3 – 8.

ТЕМА 4 ТЕОРЕТИЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ ОСНОВИ ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

4.1 Вимірювання електричних величин

Вимірювання постійної напруги та сили постійного струму аналоговими й цифровими приладами. При виборі приладів для проведення вимірювань очевидно, що границя вимірювання приладу має бути не меншою від значення вимірюваної величини. Тому перед вимірюванням слід оцінити орієнтовне значення вимірюваної напруги чи струму, наприклад, шляхом спрощених розрахунків на основі відомих параметрів об'єкта.

Для еквівалентної схеми споживача, яку наведено на рисунку 4.1, з параметрами R_1 , R_2 , $U_{ж}$ орієнтовні значення струму I_X та напруги U_X знаходять, використовуючи відомі закони електротехніки.

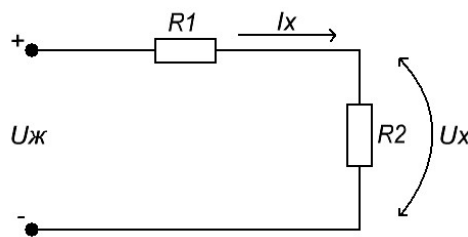


Рисунок 4.1 – Еквівалентна схема споживача електричної енергії

У цьому випадку для послідовного з'єднання отримуємо:

$$\begin{cases} I_X = \frac{U_{ж}}{R_1 + R_2}; \\ U_X = I_X \cdot R_2. \end{cases} \quad (4.1)$$

Отже, відповідно до розрахованих орієнтовних значень струму I_X та напруги U_X вибираються границі вимірювань: $I_k > I_X$, $U_k > U_X$. Вибираємо наявні амперметри та вольтметри для проведення вимірювань в заданому діапазоні струмів і напруг.

Методична похибка вимірювання напруги. Важливою характеристикою приладів є їх споживання енергії з вимірювального кола. Для приведення в рух відлікового механізму зі стрілкою необхідна енергія, що споживається з вимірювального кола, змінюючи при цьому його режим. Для амперметрів і вольтметрів нормують не споживання, а вхідний опір (R_A або R_V) приладу.

Ввімкнення електромеханічного приладу в малопотужну схему може суттєво змінити струм у її гілках та падіння напруг на її елементах, у результаті показання приладу не відповідатиме значенню вимірюваної величини, тобто виникає похибка, що залежить від вхідного опору приладу.

Наприклад, в колі, яке наведено на рисунку 4.1, з параметрами R_1 , R_2 напруга на резисторі R_2 (при знехтовно малому внутрішньому опорі джерела енергії):

$$U_2 = I \cdot R_2 = \frac{U}{R_1 + R_2} \cdot R_2 = \frac{U}{\frac{R_1}{R_2} + 1}. \quad (4.2)$$

Якщо паралельно до R_2 ввімкнути вольтметр з вхідним опором R_V , як показано на рисунку 4.2, то показання вольтметра розраховуються за формулою:

$$U_V = \frac{U}{R_1 + \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_V}}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_V}} = \frac{U}{\frac{R_1(R_2 + R_V)}{R_2 + R_V} + 1}. \quad (4.3)$$

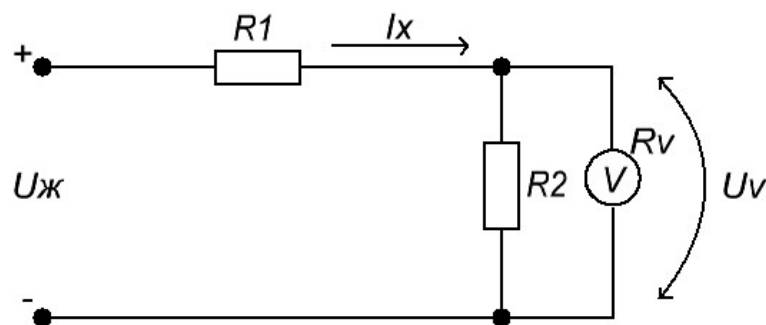


Рисунок 4.2 – Розрахунок методичної похибки вимірювання напруги

У результаті отримаємо, $U_V < U_2$, тобто показання вольтметра є заниженим через присутність методичної похибки, що виникла внаслідок зменшення опору кола (вольтметр зашунтував резистор R_2).

Абсолютна методична похибка:

$$\Delta U_M = U_V - U_2. \quad (4.4)$$

Відносна методична похибка:

$$\delta U_M = \frac{\Delta U_M}{U_2} \cdot 100 \%. \quad (4.5)$$

Для вимірювань у високоомних колах (наприклад, у електронних схемах) для зменшення методичної похибки необхідно брати вольтметри з великим вхідним опором так, щоб $R_2/R_V \rightarrow 0$.

Методична похибка вимірювання сили струму. Методична похибка виникає також і при вимірюванні сили струму. До ввімкнення амперметра в коло (див. рис. 4.1) сила струму дорівнює:

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}. \quad (4.6)$$

А після ввімкнення амперметра, як показано на рисунку 4.3, сила струму визначається, як:

$$I_A = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_A}. \quad (4.7)$$

Методична похибка вимірювання сили струму в цьому випадку зумовлена збільшенням опору кола внаслідок вмикання амперметра:

$$\Delta I_M = I_A - I. \quad (4.8)$$

Відносна методична похибка:

$$\delta I_M = \frac{\Delta I_M}{I} \cdot 100 \%. \quad (4.9)$$

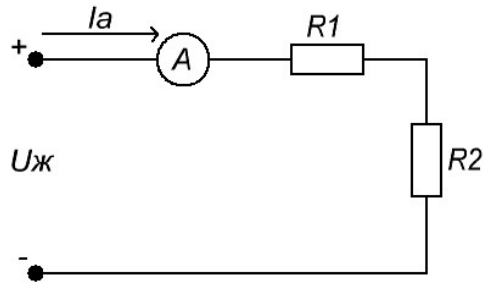


Рисунок 4.3 – Розрахунок методичної похибки вимірювання сили струму

Під час вимірювань слід кількісно оцінити методичні похибки, щоб переконатися, що результати не є спотвореними.

Найменше споживання серед електромеханічних приладів для вимірювання струмів чи напруг мають магнітоелектричні прилади. Споживання електронних приладів значно менше, ніж електромеханічних, завдяки використанню підсилювачів, що отримують енергію не від вимірювального кола, а від додаткових джерел живлення. Тому вхідний опір електронних вольтметрів значно більший, а опір амперметрів значно менший, ніж електромеханічних.

Непряме вимірювання сили струму. Крім прямих вимірювань (напруги – вольтметром, сили струму – амперметром), у певних випадках застосовують непрямі вимірювання. Наприклад, вимірювання струму за спадом напруги, що вимірюється на відомому опорі резистора R_N та визначається за законом Ома (див. рис. 4.4). Опір R_N вибирають виходячи із умови не перевищення методичної похибки вимірювання сили струму (за рахунок послідовного ввімкнення опору в коло), а також з умови, щоб потужність на резисторі P_{RN} не перевищувала його допустимої потужності.

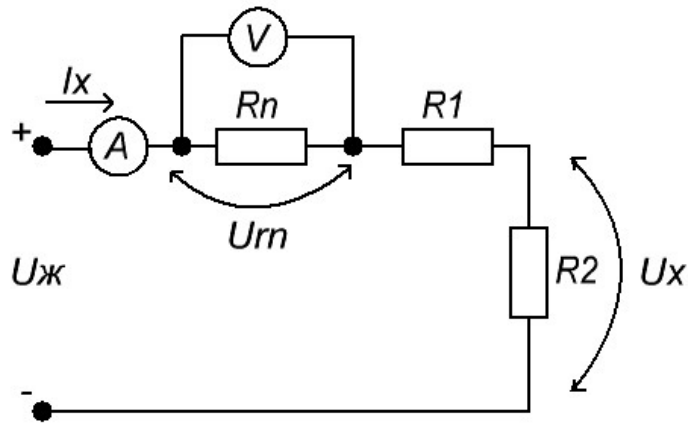


Рисунок 4.4 – Схема непрямого вимірювання сили струму

Якщо опір вольтметра значно більший за опір резистора, то показання вольтметра визначаються, як:

$$U_V = U_{RN} = I_X \cdot R_N. \quad (4.10)$$

Звідси отримуємо:

$$I_X = \frac{U_{RN}}{R_N} = \frac{U_V}{R_N}. \quad (4.11)$$

Абсолютна похибка вимірювання струму має дві складові, що зумовлені похибками резистора та вольтметра.

Вимірювання електричного опору різними методами. Величини опорів, що зустрічаються в практиці, лежать в межах від 10^{-6} до 10^{+12} Ом. У практиці електричних вимірювань всі опори поділяються на три групи:

- малі опори: від 1 Ом та нижче;
- середні опори: від 1 до 10^5 Ом;
- великі опори: від 10^5 Ом та вище.

Широке застосування отримали наступні методи вимірювань опорів: мостовий метод; метод амперметра і вольтметра; метод омметра.

1. *Мостовий метод.* Цей метод застосовується для вимірювання малих, середніх та великих опорів, коли необхідна велика точність вимірювання.

Найчастіше використовуються мости постійного струму (див. рис. 4.5). Магазини резисторів R_1 , R_2 , R_3 та вимірюваний резистор R_x утворюють плечі моста, в одну діагональ якого включене джерело живлення, в іншу – гальванометр.

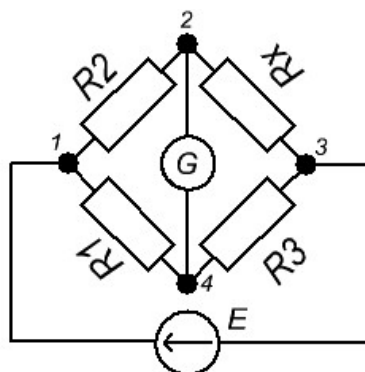


Рисунок 4.5 – Мостова схема вимірювання електричного опору

Вимірювання опорів мостом засноване на принципі врівноваження його плечей. Підбираючи опір плечей так, щоб в ланцюзі гальванометра не було струму, добиваються рівноваги моста. При рівновазі моста потенціали точок 2 і 4 однакові, отже:

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 \quad \text{та} \quad I_x R_x = I_3 R_3. \quad (4.12)$$

Оскільки: $I_1 = I_x$ та $I_2 = I_3$, то $R_x = R_3 \cdot R_1 / R_2$.

Зазвичай, плече R_3 називають плечем порівняння, а плечі R_1 та R_2 – плечима відношення.

2. Метод амперметра і вольтметра. Такий метод застосовується для вимірювання малих і середніх опорів. Точність вимірювання при цьому методі визначається точністю використовуваних приладів. Вимірювання опорів за методом амперметра та вольтметра можливе за однією з двох схем вмикання приладів, які наведено на рис. 4.6.

У схемі на рис. 4.6,а вольтметр вимірює падіння напруги на резисторі R_x , а амперметр – силу струму I , рівну сумі струмів, що проходять через резистор

та обмотку вольтметра.

$$I = I_x + I_v = \frac{U}{R_x} + I_v. \quad (4.13)$$

При цьому дійсна величина вимірюваного опору визначається, як:

$$R_x = \frac{U}{I - I_v} = \frac{U}{1 - \frac{U}{R_v}}. \quad (4.14)$$

У схемі, яку наведено на рис. 4.6,б амперметр вимірює силу струму I , що проходить через резистор R_x , а вольтметр вимірює падіння напруги, яке дорівнює сумі падінь напруги на вимірюваному резисторі та на амперметрі:

$$U_v = I \cdot R_x + I \cdot R_A = U_x + U_A. \quad (4.15)$$

У такому випадку дійсна величина вимірюваного опору визначається, як:

$$R_x = \frac{U_x}{I} = \frac{U_v - U_A}{I} = \frac{U_v}{I} - R_A. \quad (4.16)$$

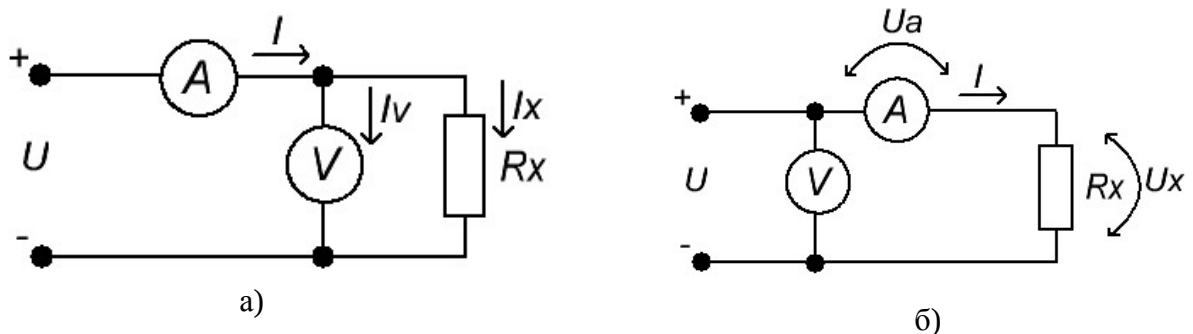


Рисунок 4.6 – Схеми вимірювання електричного опору методом амперметра і вольтметра

Якщо величину вимірюваного опору обчислити безпосередньо за

показами приладів, як це звичайно і робиться в практиці, і вважати, що:

$$R'_x = \frac{U}{I}, \quad (4.17)$$

то при цьому в обох випадках буде допущена методична похибка.

Величина абсолютної похибки в першому випадку дорівнює:

$$\Delta R_{x1} = R'_x - R_x = \frac{R_x^2}{R_x - R_v}, \quad (4.18)$$

а в другому:

$$\Delta R_{x1} = R'_x - R_x = R_A. \quad (4.19)$$

Відносні похибки при цьому відповідно дорівнюють:

$$\begin{aligned} \delta_{R_{x1}} &= \frac{R_x}{R_x - R_v} \cdot 100 \%, \\ \delta_{R_{x2}} &= \frac{R_A}{R_x} \cdot 100 \%. \end{aligned} \quad (4.20)$$

Таким чином, при вимірюванні методом амперметра і вольтметра з'являється похибка, величина якої залежить як від величини вимірюваного опору R_x , так і від опорів приладів R_A і R_v . Тому для отримання найменшої відносної похибки при виборі схеми вимірювання слід керуватися наступними міркуваннями. Якщо вимірюваний опір $R_x \leq 2$ Ом, то застосовується схема на рис. 4.6,а, оскільки при цьому можна нехтувати струмом у вольтметрі. Якщо ж вимірюваний опір $R_x > 2$ Ом, то застосовується схема на рис. 4.6,б, оскільки при цьому можна нехтувати падінням напруги на обмотці амперметра.

3. *Метод омметра.* Такий метод застосовується для вимірювання великих і середніх опорів, коли не потрібна велика точність вимірювання.

Омметрами з послідовною схемою (див. рис. 4.7,а) користуються для вимірювання великих опорів, а омметрами з паралельною схемою (див. рис. 4.7,б) – для вимірювання середніх опорів. Струми в ланцюзі омметрів визначаються відповідно рівняннями:

$$I = \frac{U}{R_X + R_B + R_{\mathcal{L}}} = C_1 \cdot \alpha,$$

$$I = \frac{U}{R_{\mathcal{L}} + \frac{R_X R_B}{R_X + R_B}} = C_1 \cdot \alpha. \quad (4.21)$$

Кути повороту рухомої частини вимірювального механізму відповідно рівні:

$$\alpha = \frac{U}{C_1} \cdot \frac{1}{R_X + R_B + R_{\mathcal{L}}},$$

$$\alpha = \frac{U}{C_1} \cdot \frac{1}{R_{\mathcal{L}} + \frac{R_X R_B}{R_X + R_B}}. \quad (4.22)$$

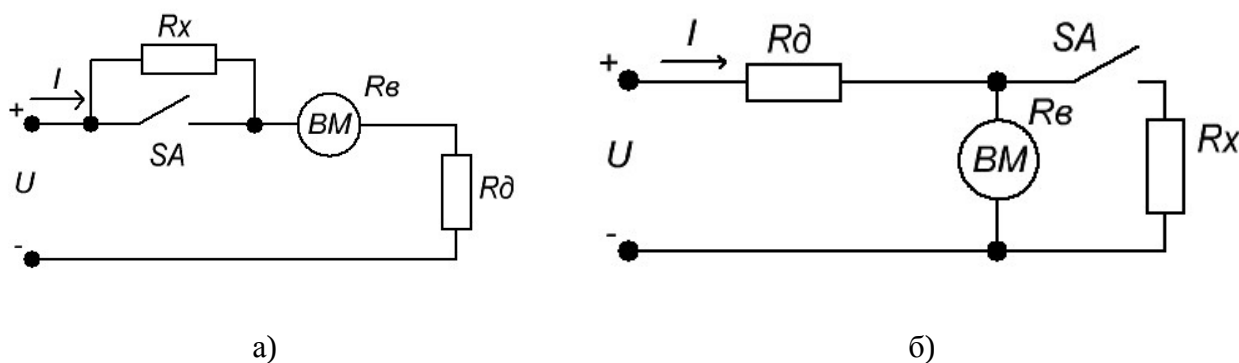


Рисунок 4.7 – Схеми вимірювання електричного опору методом омметра

Отже, при постійному відношенні U/C_1 кут повороту рухомої частини залежить лише від опору R_X , значення якого наносяться на шкалі омметра. Напруга джерела живлення не залишається незмінною, тому омметри мають пристосування для підтримки постійності напруги. Таким пристосуванням є

магнітний шунт, що дозволяє змінити магнітну індукцію в повітряному зазорі вимірювального механізму, а отже, і постійну за струмом C_1 .

Вимірювання потужності методом амперметра і вольтметра. Вимірювання потужності в колах постійного струму методом амперметра і вольтметра може бути проведено по одній зі схем, які наведено на рис. 4.8. Проте потужність, отримана як добуток показів амперметра та вольтметра, буде в обох випадках відрізнятися від дійсної потужності, споживаної навантаженням R , оскільки в першому випадку (див. рис. 4.8,а) вольтметр вимірює, окрім падіння напруги на споживачі, також і падіння напруги на амперметрі U_A , а в другому випадку амперметр вимірює силу струму I , що складається з сили струму споживача I_R та сили струму, що протікає через вольтметр I_V .

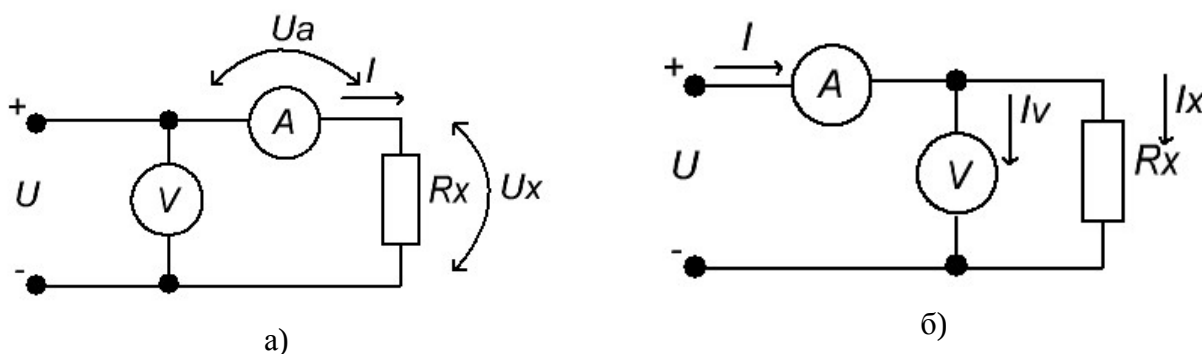


Рисунок 4.8 – Схеми вимірювання потужності методом амперметра і вольтметра

Таким чином, сам метод вимірювання дає похибку. Якщо через U та I позначити покази відповідно вольтметра та амперметра, то для схеми на рис. 4.8,а, потужність, обчислена за показами приладів, може бути представлена у вигляді:

$$P = U \cdot I = (U_{R_x} + U_A) I = U_{R_x} I + U_A I. \quad (4.23)$$

Падіння напруги на амперметрі можна виразити наступним чином:

$U_A = I \cdot R_A$, де R_A – опір амперметра. Тоді, отримуємо:

$$P = U_R I + I^2 R_A. \quad (4.24)$$

Тобто потужність, обчислена за показами приладів, більша потужності споживача $U_R \cdot I$ на величину $I^2 R_A$ (потужність, споживану амперметром). Абсолютна похибка вимірювання у такому випадку дорівнює:

$$\Delta_P = P - U_R I = I^2 R_A. \quad (4.25)$$

Відносна похибка для цієї ж схеми визначається за формулою:

$$\delta_P = \frac{I^2 R_A}{U_R I} = \frac{R_A}{R} \cdot 100 \%, \quad (4.26)$$

де R – опір споживача,

З формули (4.26) звідки видно, що відносна похибка вимірювання потужності за схемою, яку наведено на рис. 4.8,а, тим менша, чим менше значення опору R_A порівняно з опором R .

Зі схеми, яку наведено на рис. 4.8,б, виходить:

$$P = UI = U(I_R + I_V) = UI_R + UI_V, \quad (4.27)$$

де I_R – сила струму в споживачі.

Виразивши I_V через U/R_V , де R_V – опір вольтметра. Звідси отримаємо:

$$P = UI_R + \frac{U^2}{R_V}. \quad (4.28)$$

У даному випадку потужність, обчислена за показами приладів, більша

потужності споживача $U \cdot I_R$ на величину потужності U^2/R_V , що споживається у вольтметрі. Відповідно до цього, вираз для абсолютної похибки має наступний вигляд:

$$\Delta_P = P - UI_R = \frac{U^2}{R_V}. \quad (4.29)$$

Звідси виходить, що Δ_P тим менше, чим більше R_V порівняно з опором навантаження R ;

Відносна похибка описується наступним виразом:

$$\delta_P = \frac{U^2}{R_V UI_R} = \frac{R}{R_V} \cdot 100 \%. \quad (4.30)$$

Приведені формули похибок дають можливість орієнтуватися при виборі тієї чи іншої схеми включення приладів. Якщо опір приймача відносно великий, слід віддати перевагу схемі, яку зображено на рис. 4.8,а, якщо малий – схемі на рис. 4.8,б.

Слід мати на увазі, що при вимірюванні потужності генератора вирази для похибок відповідно поміняються місцями та матимуть зворотний знак в порівнянні з похибками при вимірюванні потужності споживача. При включенні приладів за схемою на рисунку 4.8а потужність генератора:

$$P_G = P + \frac{U^2}{R_V}. \quad (4.31)$$

Для схеми, яку наведено на рис. 4.8,б знаходять:

$$P_G = P + I^2 R_A. \quad (4.32)$$

4.2 Загальна структура, передавальна функція та точність вимірювальної системи

Загальна структура вимірювальної системи. У цілому можна вважати, що в загальному випадку вимірювальні системи можуть складатися з трьох основних елементів:

1. *Чутливий елемент* – засіб вимірювань, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення, обробки та/або зберігання, але не піддається безпосередньому сприйняттю спостерігачем. Датчики, виконані на основі електронної техніки, називаються електронними датчиками. Окремо взятий датчик може бути призначений для вимірювання (контролю) та перетворення однієї фізичної величини або одночасно декількох фізичних величин.

2. *Перетворювач сигналу* – структурний елемент, який отримує сигнал від чутливого елемента та перетворює його у відповідності до вимог блоку відображення інформації вимірювальної системи або системи керування. Перетворювач сигналів може складатися, у свою чергу, з трьох елементів: *формуваця сигналів*, який перетворює сигнал від чутливого елемента в фізичний вигляд, зручний для відображення; *сигнального процесору*, який покращує якість сигналу, наприклад, підсилює його, та *передатчика сигналу* для його передачі на деяку відстань до пристрою відображення інформації.

3. *Пристрій відображення* – елемент, на якому відображується вихідна інформація вимірювальної системи. Цей елемент отримує інформацію від перетворювача сигналів та представляє її у вигляді, який людина здатна ідентифікувати.

Таким чином, у загальному випадку інформаційно-вимірювальна система складається з трьох основних структурних елементів: чутливого елемента, перетворювача сигналу та пристрою відображення. Ці елементи послідовно з'єднуються один із одним у загальну структуру інформаційно-вимірювальної системи. Це може бути представлено у вигляді структурної схеми, як показано на рис. 4.9.

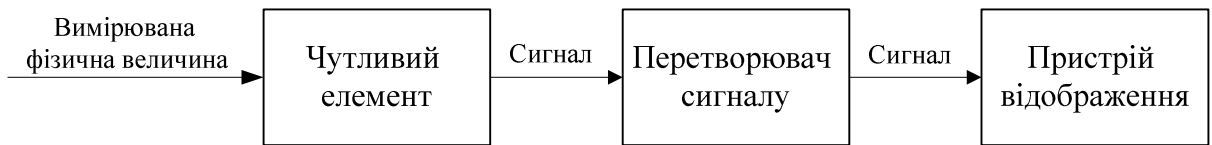


Рисунок 4.9 – Загальний вигляд вимірювальної системи

Передавальна функція вимірювальної системи. За стаціонарних умов передавальна функція системи – це відношення вихідного сигналу $\theta_{вих.}$ до вхідного $\theta_{вх.}$.

Інформаційно-вимірювальна система може складатися з чутливого елемента, перетворювача сигналу та пристрою відображення інформації, як показано на рис. 4.10. Кожний із цих елементів має власну передавальну характеристику.

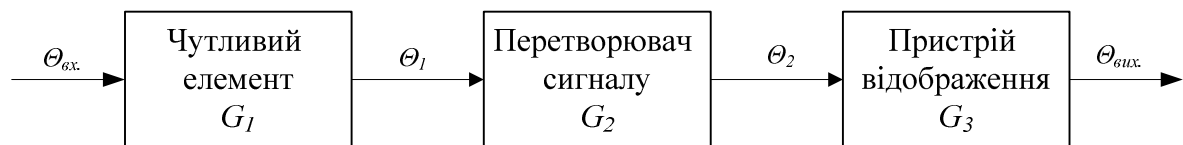


Рисунок 4.10 – Передавальна функція вимірювальної системи

Для чутливого елемента – це передавальна функція G_1 із вхідним сигналом $\theta_{вх.}$ та вихідним $\theta_{вих.}$, який у свою чергу, є вхідним для перетворювача сигналу. Отже, передавальна функція чутливого елемента знаходиться, як:

$$G_1 = \frac{\theta_1}{\theta_{вх.}}. \quad (4.33)$$

Для перетворювача сигналу – це передавальна функція G_2 із вхідним сигналом θ_1 та вихідним θ_2 , який у свою чергу, є вхідним для пристрою відображення. Отже, передавальна функція перетворювача сигналу знаходиться, як:

$$G_2 = \frac{\theta_2}{\theta_1}. \quad (4.34)$$

Для пристрою відображення – це передавальна функція G_3 із вхідним сигналом θ_2 та вихідним $\theta_{вих.}$, який у свою чергу, є вихідним для всієї вимірювальної системи. Отже, передавальна функція перетворювача сигналу знаходиться, як:

$$G_3 = \frac{\theta_{вих.}}{\theta_2}. \quad (4.35)$$

Отже, передавальна функція вимірювальної системи за умови послідовного з'єднання структурних елементів може бути записана у наступному вигляді:

$$G = \frac{\theta_{вих.}}{\theta_{вх.}} = \frac{\theta_1}{\theta_{вх.}} \times \frac{\theta_2}{\theta_1} \times \frac{\theta_{вих.}}{\theta_2}; \quad (4.36)$$

$$G = G_1 \times G_2 \times G_3.$$

Таким чином, передавальна функція вимірювальної системи дорівнює добутку передавальних функцій всіх її структурних елементів.

Точність вимірювальної системи. Якщо передавальна функція чутливого елемента – G_1 , його вхідний сигнал – $\theta_{вх.}$, а вихідний – θ_1 , то за умови відсутності похибки вимірювання: $\theta_1 = G_1 \cdot \theta_{вх.}$

Через наявність похибки вимірювання вихідний сигнал чутливого елемента потрапляє до інтервалу $(\theta_1 \pm \Delta\theta_1)$, а отже, передавальна функція бути змінюватись у деякому діапазоні і, таким чином, її потрібно записати у вигляді: $(G_1 \pm \Delta G_1)$. Отже, залежність між вхідним та вихідним сигналом чутливого елемента має бути записана в наступному вигляді:

$$\theta_1 \pm \Delta\theta_1 = (G_1 \pm \Delta G_1) \cdot \theta_{вх.} \quad (4.37)$$

Вихідний сигнал чутливого елемента є вхідним сигналом перетворювача сигналу. Через наявність похибки вимірювання передавальна функція

перетворювача сигналу повинна бути записана в наступному вигляді: $(G_2 \pm \Delta G_2)$. У такому випадку вихідний сигнал перетворювача сигналу $(\theta_2 \pm \Delta \theta_2)$ можна представити, як:

$$\theta_2 \pm \Delta \theta_2 = (G_2 \pm \Delta G_2) \cdot (\theta_1 \pm \Delta \theta_1) = (G_1 \pm \Delta G_1) \cdot (G_2 \pm \Delta G_2) \cdot \theta_{ex.} \quad (4.38)$$

Вихідний сигнал перетворювача сигналу є вхідним для пристрою відображення. Через наявність похибки вимірювання передавальну функцію пристрою відображення потрібно записати у вигляді: $(G_3 \pm \Delta G_3)$. У такому випадку вихідний сигнал вимірювальної системи можна представити в наступному вигляді:

$$\theta_{вих.} \pm \Delta \theta_{вих.} = (G_3 \pm \Delta G_3) \cdot (\theta_2 \pm \Delta \theta_2) = (G_1 \pm \Delta G_1) \cdot (G_2 \pm \Delta G_2) \cdot (G_3 \pm \Delta G_3) \cdot \theta_{ex.} \quad (4.39)$$

Якщо знехтувати малими величинами, то отримуємо:

$$\begin{aligned} \theta_{вих.} \pm \Delta \theta_{вих.} &= (G_1 G_2 G_3 \pm G_1 G_2 \Delta G_3 \pm G_1 G_3 \Delta G_2 \pm G_2 G_3 \Delta G_1) \theta_{ex.} = \\ &= G_1 G_2 G_3 \left(1 \pm \frac{\Delta G_3}{G_3} \pm \frac{\Delta G_2}{G_2} \pm \frac{\Delta G_1}{G_1} \right) \cdot \theta_{ex.} \end{aligned} \quad (4.40)$$

За умови відсутності будь-яких похибок вимірювання цей вираз можна було б представити у вигляді:

$$\theta_{вих.} = G_1 G_2 G_3 \theta_{ex.} \quad (4.41)$$

Таким чином, $G_1 G_2 G_3$ – це повний номінальний коефіцієнт підсилення вимірювальної системи.

Отже, розділивши обидві частини рівняння (4.40) на величину $\theta_{ex.}$, отримуємо наступне рівняння:

$$\begin{aligned}
1 \pm \frac{\Delta \theta_{вих.}}{\theta_{вих.}} &= 1 \pm \frac{\Delta G_3}{G_3} \pm \frac{\Delta G_2}{G_2} \pm \frac{\Delta G_1}{G_1}; \\
\frac{\Delta \theta_{вих.}}{\theta_{вих.}} &= \frac{\Delta G_3}{G_3} + \frac{\Delta G_2}{G_2} + \frac{\Delta G_1}{G_1}; \\
\delta \theta_{вих.} &= \delta G_1 + \delta G_2 + \delta G_3.
\end{aligned}
\tag{4.42}$$

де $\Delta G_i/G_i$ – відносна похибка відповідної передавальної функції; $\Delta \theta_{вих.}/\theta_{вих.}$ – відносна похибка вимірювання вихідного сигналу системи.

Таким чином, рівняння (4.42) доводить, що відносна похибка вимірювання вихідного сигналу системи дорівнює сумі відносних похибок передавальних функцій її структурних елементів.

4.3 Особливості вимірювання неелектричних фізичних величин

Характерні особливості вимірювань неелектричних величин. Про кількість та фізичну різноманітність неелектричних величин можна зробити висновки з огляду Міжнародної системи одиниць, яка містить сім основних одиниць, з них шість – неелектричної природи, дві додаткові, а також близько 150 похідних одиниць неелектричних величин. У повсякденній інженерній практиці доводиться вимірювати сотні неелектричних величин, зокрема найбільшого розповсюдження набули:

- величини, що характеризують простір та час;
- механічні величини;
- теплові величини, які характеризують тепловий стан тіл, їх зміну в просторі та часі;
- світлотехнічні та енергетичні величини, які характеризують оптичні явища;
- величини, що характеризують акустичні явища;
- величини, які характеризують фізико-хімічні властивості матеріалів та речовин;
- величини, які характеризують іонізуюче випромінювання.

Вимірювання неелектричних величин електричними вимірювальними засобами стає можливим внаслідок попереднього перетворення досліджуваних величин у функціонально пов'язані з ними електричні величини за допомогою відповідних вимірювальних перетворювачів.

Для проведення вимірювань необхідна наявність первинного вимірювального перетворювача (чутливого елементу), вторинного електричного приладу (перетворювача сигналів), а також пристроїв їх спряження. Тобто, на практиці, згідно стандартного означення, у переважній більшості для вимірювання неелектричних величин використовуються вимірювальні системи та комплекси.

Всі методи вимірювань неелектричних величин розділяються на контактні та безконтактні. За контактних методів вимірювальний перетворювач безпосередньо контактує з досліджуваним об'єктом. За безконтактних вимірювань первинний перетворювач безпосередньо не контактує з досліджуваним об'єктом та не впливає на його параметри. До основних переваг електричних вимірювань неелектричних величин належать:

- універсальність, яка полягає в можливості вимірювань декількох чи навіть багатьох неелектричних величин за допомогою одного електричного вимірювального засобу;
- простота автоматизації вимірювань внаслідок того, що в електричних засобах легко виконуються логічні та цифрові операції;
- можливість забезпечення високої чутливості, необхідної точності та швидкодії, зумовлені простотою оброблення електричних сигналів;
- дистанційність, що полягає в можливості передачі електричних сигналів за допомогою як провідних, так і безпроводних ліній зв'язку.

Характеристики та класифікація вимірювальних перетворювачів. На теперішній час використовується величезна кількість різноманітних за будовою, принципом дії та призначенням вимірювальних перетворювачів (ВП) різних фізичних величин. Розвиток науки і техніки спонукає до постійного вдосконалення існуючих ВП, та до створення нових видів. Для їх систематизації, поділу та групування використовується ряд класифікаційних

ознак. Ці ознаки повинні бути достатньо загальними, щоб враховувати вимоги як спеціалістів, які працюють в галузі дослідження та проектування перетворювачів, так і тих, хто займається їх використанням.

Найбільш повною прийнято вважати класифікацію за фізичними закономірностями, покладеними в основу принципу дії ВП. *За принципом дії* вимірювальні перетворювачі можна поділити на такі групи:

1) Механічні пружні перетворювачі. В основу принципу дії покладено залежність між вхідними механічними зусиллями і викликаними ними переміщеннями чи механічними напруженнями в матеріалі чутливого елемента, що визначаються його пружними властивостями.

2) Резистивні перетворювачі. Принцип дії полягає у зміні електричного опору чутливого елемента під дією механічних переміщень та ін.

3) Ємнісні перетворювачі. Принцип фізичного перетворення полягає у залежності ємності конденсатора від відстані між його електродами або від зміни діелектричної проникності середовища між цими електродами.

4) П'єзоелектричні перетворювачі. Принцип дії базується на використанні явища поляризації п'єзоелектрика від дії на нього механічних зусиль.

5) Індуктивні перетворювачі. В основу принципу дії покладено залежність повного електричного опору обмотки від зміни комплексного магнітного опору сердечника.

6) Взаємоіндуктивні або трансформаторні перетворювачі. В основу принципу дії покладено залежність е.р.с. вторинної обмотки від зміни комплексного магнітного опору осердя.

7) Індукційні перетворювачі. Принцип дії базується на використанні явища електромагнітної індукції.

8) Гальваномагнітні перетворювачі. Принцип дії базується на використанні гальваномагнітних перетворювачів Гауса або Холла.

9) Теплові перетворювачі. В основу принципу дії покладено фізичні ефекти, що визначаються тепловими процесами.

10) Електрохімічні перетворювачі. Принцип дії оснований на залежності електропровідності речовин від їх хімічних або фізичних властивостей.

11) Оптичні перетворювачі. В основу принципу дії покладено залежність параметрів оптичного випромінювання від значення перетворюваної величини.

12) Іонізаційні перетворювачі. Принцип дії оснований на перетворенні інтенсивності іонізаційного чи рентгенівського випромінювання.

Одним із перспективних напрямків розвитку первинних перетворювачів є подальше вдосконалення перетворювачів з уніфікованим вихідним сигналом. Перетворювач з уніфікованим вихідним сигналом – це первинний перетворювач (ПП) та уніфікуючий перетворювач (УП), що поєднані апаратно, конструктивно та алгоритмічно для забезпечення уніфікації вихідного сигналу.

Уніфікація здійснюється за такими основними характеристиками:

- за інформативними параметрами: напруга, струм, частота тощо;
- за робочим діапазоном, наприклад: 0–1 В; 0–5 В; 0–5 мА; 4–20 мА;
- за функціональною залежністю між значенням вимірюваної величини та інформативного параметра вихідного сигналу: лінійна, логарифмічна тощо.

4.4 Узгодження первинних перетворювачів з електричними засобами вимірювань

Як вимірювальні перетворювачі, так і пристрої спряження, що входять до складу вимірювальних систем, мають свої метрологічні, конструктивні, експлуатаційні та інші технічні характеристики. Завдання спряження цих елементів полягає у виробленні єдиних вимог, щоб забезпечити їх сумісність.

У першу чергу повинна забезпечуватись інформаційна сумісність, щоб забезпечити узгодженість їх вхідних та вихідних сигналів, зокрема, робочих діапазонів. Цього можна досягти уніфікацією сигналів первинних перетворювачів або застосуванням допоміжних узгоджувальних пристроїв. Необхідною умовою забезпечення метрологічної сумісності є методологічна сумісність аналізу, нормування, синтезу, ідентифікації та прогнозування похибок засобів, що спрягаються. Засоби вимірювань у системі повинні також задовольняти вимогам енергетичної сумісності – узгодження параметрів джерел живлення, конструктивної сумісності – можливість механічного

з'єднання, експлуатаційної – стійкість до зовнішніх чинників, а також надійнісної сумісності.

Первинні вимірювальні перетворювачі переважно мають нелінійну функцію перетворення. Досягти лінійності перетворення можна конструкторсько-технологічними прийомами, зокрема використанням спеціальних матеріалів, застосуванням відповідної технології або спеціального конструктивного виконання. Сукупність конструкторсько-технологічних, математичних, структурних та інших методів, спрямованих на забезпечення із заданою точністю лінійної функції перетворення, називають лінеаризацією функції перетворення.

Структурні методи лінеаризації є найбільш універсальними і порівняно нескладними. Найпростіша схема може бути подана у вигляді послідовного або паралельного з'єднання вимірювального та коректувального засобу (КП).

У схемі послідовного з'єднання (див. рис. 4.11,а) загальна функція перетворення має наступний вигляд:

$$Y = F_2(Y_1) = F_2[F_1(X)]. \quad (4.43)$$

Оскільки скорегована функція перетворення повинна бути лінійною, тобто $Y=k \cdot X$, то функція перетворення коректувального пристрою повинна мати наступний вигляд:

$$F_2(Y_1) = k \cdot F_1^{-1}(Y_1), \quad (4.44)$$

тобто бути оберненою до функції вимірювального перетворювача.

Сумарна похибка засобу вимірювань з послідовною схемою корекції в першому наближенні оцінюється сумою відносних похибок перетворювача та пристрою, що корегує:

$$\delta_{\Sigma} \approx \delta_{\text{ПП}} + \delta_{\text{КП}}. \quad (4.45)$$

У схемі з паралельним підключенням корегувального пристрою (див. рис. 4.11,б) вихідний сигнал засобу вимірювання визначається за наступним виразом:

$$Y = k \cdot X = Y_1 + Y_2 = F_1(X) + F_2(X). \quad (4.46)$$

Сумарна до виходу відносна похибка у цьому випадку дорівнює:

$$\delta_{\Sigma} = \delta_1 + k \cdot \delta_2. \quad (4.47)$$

де k – коефіцієнт впливу коректувального пристрою ($k \ll 1$).

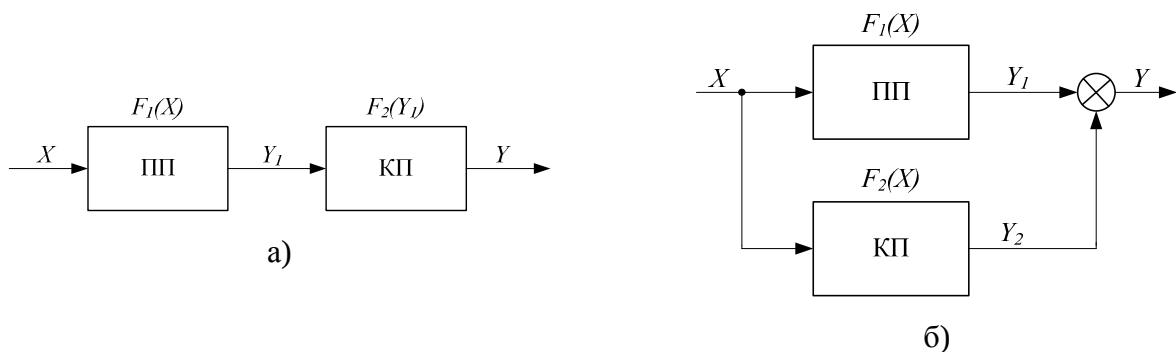


Рисунок 4.11 – Структурні схеми лінеаризації функції перетворення

Корекція динамічних похибок засобу вимірювання зводиться до корекції його передавальної функції $W(s)$ за допомогою додаткового корегувального пристрою, передавальна функція $W_k(s)$ якого визначається на основі реальної $W(s)$ та необхідної передавальної функції скорегованого засобу.

Для корекції динамічних характеристик первинних перетворювачів застосовують послідовну (див. рис. 4.12,а) або паралельну (див. рис. 4.12,б) схеми корекції.

Слід відзначити, що на практиці умови ідеальної корекції динамічних характеристик не існує. Здебільшого ставиться завдання розширити частотний діапазон засобу вимірювання.

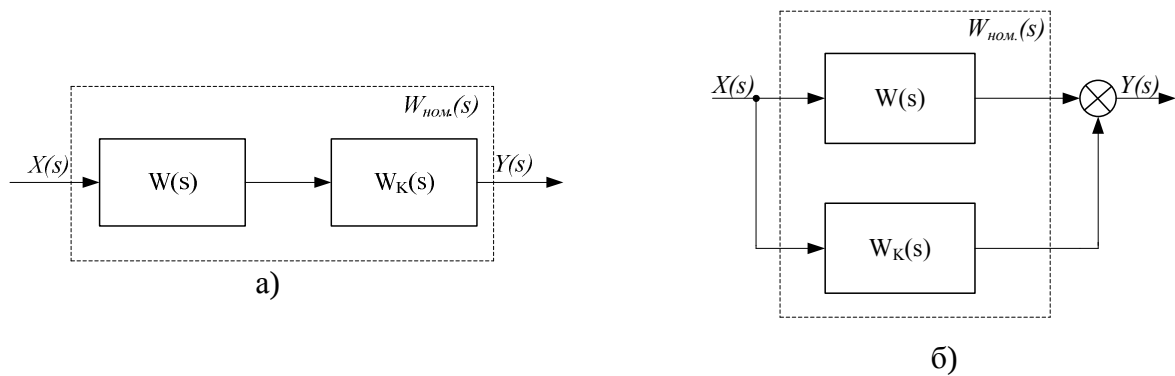


Рисунок 4.12 – Структурні схеми корекції динамічних характеристик

У сучасних умовах традиційні первинні перетворювачі розглядаються не як окремий засіб або елемент вимірювальної системи, а як складова частина вимірювального перетворювача з уніфікованим вихідним сигналом. Розвиток таких вимірювальних перетворювачів передбачає використання уніфікованих цифрових сигналів і роботу з вторинними засобами вимірювання на базі комп'ютерної техніки. Такі ВП здебільшого мають гнучкий алгоритм функціонування та називаються інтелектуальними.

Контрольні питання:

1. Назвіть характерні особливості вимірювання постійної напруги та сили постійного струму аналоговими приладами.
2. Назвіть характерні особливості вимірювання постійної напруги та сили постійного струму цифровими приладами.
3. Назвіть характерні особливості опосередкованого вимірювання сили постійного струму.
4. Надайте характеристику основним методам вимірювання електричного опору.
5. Надайте характеристику процедурі вимірювання потужності методом амперметра й вольтметра.
6. Наведіть узагальнену структуру вимірювальної системи.
7. Назвіть особливості вимірювання неелектричних фізичних величин.
8. Наведіть класифікацію та характеристику основних типів

вимірювальних перетворювачів неелектричних величин.

9. Наведіть основні структурні схеми лінеаризації функції перетворення вимірювальної системи.

10. Наведіть основні структурні схеми корекції динамічних характеристик вимірювальної системи.

Рекомендована література:

1. Лактіонов, І.С. Комп'ютеризовані вимірювачі комплексу фізичних параметрів ґрунтів та мікроклімату промислових теплиць: моногр. / І.С. Лактіонов, О.В. Вовна, А.А. Зорі. – Покровськ (Красноармійськ): ДВНЗ «ДонНТУ», 2016. — 212 с.

2. Зори, А.А. Информационно-измерительные системы. Применение интеллектуальных модулей, методов и средств повышения точности физических измерений: моногр. / А.А. Зори, С.И. Клевцов, В.Д. Коренев и др. – Донецк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011. – 206 с.

3. Пьявченко, О.Н. Информационно-измерительные системы определения параметров газожидкостных потоков: моногр. / О.Н. Пьявченко, А.А. Зори, С.И. Клевцов и др. – Таганрог: Танаис, 2013. – 244 с.

4. Володарский, Е.Т. Планирование и организация измерительного эксперимента: учеб. пособ. / Е.Т. Володарский, Б.Н. Малиновский, Ю.М. Туз. – К.: Вища шк., 1987. – 280 с.

5. Земельман, М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств / М.А. Земельман. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 199 с.

6. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия: Межгос. стандарт ГОСТ 22261–94. – Действующ. от 1998–01–01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 35 с. – (Метрология).