

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Д. Є. Петрукович

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

з навчальної дисципліни

“Методи та засоби вимірювань”

для студентів галузь знань 15 “Автоматизація та приладобудування”
напрямок підготовки 152 “Метрологія та інформаційно – вимірювальна
техніка”

Частина I

Харків 2019

ТЕМА № 1

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

ЛЕКЦІЯ № 1

ОСНОВНІ ТЕРМІНИ ТА ВИЗНАЧЕННЯ В ГАЛУЗІ МЕТРОЛОГІЇ ТА МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.

1. Зміст і основні визначення процесу вимірювань

Процес вимірювання – це складне, багатогранне явище, яке охоплює ряд елементів; його можна вважати складною ергатичною системою.

Якість результатів вимірювань, одержаних у процесі вимірювання, визначається низкою основних елементів, кожен з яких є невід’ємною частиною цього процесу. До таких елементів слід віднести: об’єкт вимірювання, вимірювану фізичну величину (ВВ) і одиницю цієї фізичної величини, метод вимірювання, засіб (або засоби) вимірювальної техніки, умови вимірювання, методику виконання вимірювань та оператора (суб’єкта), що здійснює вимірювання.

Підсумком процесу вимірювання є результат вимірювання, який одержують з певною похибкою. Взаємозв’язок елементів процесу вимірювання показаний у вигляді умовної структурної схеми на рис. 1.1.

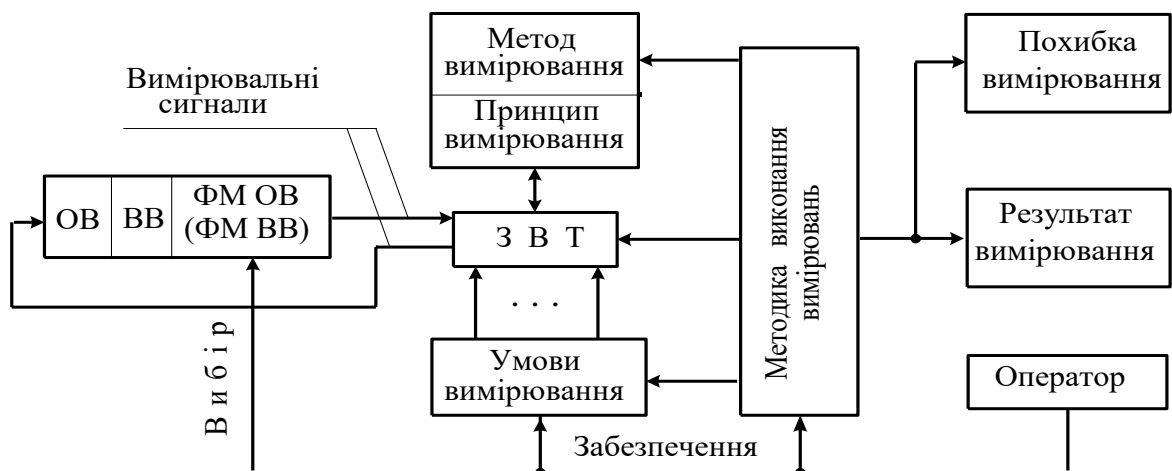


Рисунок 1.1 - Структура процесу вимірювання

На початковому етапі процесу вимірювання необхідно прийняти *фізичну модель об'єкта вимірювання* (ФМ ОВ), а точніше вимірюваної величини (ФМ ВВ). Вона вибирається, виходячи з мети вимірювання, і мусить відображати з множини властивостей реального ОВ тільки ті з них, які підлягають вимірюванню відповідно до поставленої технічної задачі і мети вимірювання. При цьому фізична модель об'єкта вимірювання (вимірюваної величини), як правило, не збігається з самим об'єктом вимірювання (вимірюваною величиною). У галузі електрорадіовимірювань вимірюваними величинами є характеристики і параметри електричних кіл і сигналів.

Приклад 1.1. Об'єкт вимірювання - довільне джерело змінної напруги, мета вимірювання – оцінка вихідної напруги джерела.

Вимірювана величина – середнє квадратичне значення вихідної напруги джерела; фізична модель об'єкта вимірювання (вимірюваної величини) може бути представлена різними варіантами. Наприклад, одна, найбільш загальна, модель – випадковий сигнал; інша, конкретна, модель – синусоїдний сигнал.

Приклад 1.2. Об'єкт вимірювання – електронний вольтметр, мета вимірювання – оцінка складових його вхідного опору в заданому частотному діапазоні.

Вимірювана величина – вхідний опір електронного вольтметра, фізична модель об'єкта вимірювання (вимірюваної величини) – повний опір, який складається із зосереджених активної і ємнісної складових.

Один і той самий ОВ може бути поданий різними фізичними моделями (зважаючи на режим його роботи), що відбивається на характеристиках вимірюваної величини і на необхідному ступені наближення до неї фізичної моделі ОВ. Наприклад, опір резистора можна розглядати, по-перше, як лінійний у вузькому діапазоні значень струму, що проходить через нього, так і нелінійний у широкому діапазоні значень струму, а по-друге, – як активний опір у колах постійного і низькочастотного струму, так і повний опір у високочастотних колах, де починає впливати поверхневий ефект.

На другому етапі процесу вимірювання, після визначення ФМ ОВ, виконується вибір і обґрунтування методу вимірювання і засобу (засобів) вимірювальної техніки, виходячи з необхідності забезпечення потрібної похибки вимірювання.

Метод вимірювання – це сукупність способів використання засобів вимірювальної техніки та принципу вимірювання для створення вимірювальної інформації.

Принцип вимірювання визначається суттю явища, на якому ґрунтується вимірювання. Наприклад: принцип вимірювання електричних величин на основі перетворення енергії електромагнітного поля в механічну, принцип вимірювання тиску на основі його перетворення в переміщення, принцип вимірювання температури на основі термоелектричного ефекту, тепловий принцип вимірювання потужності надвисоких частот і т.д.

Вимірювання здійснюються за методиками виконання вимірювань.

Методика виконання вимірювань – сукупність процедур і правил, виконання яких забезпечує одержання результатів вимірювань з потрібною точністю.

Методики виконання вимірювань підлягають атестації.

Атестація методики виконання вимірювань – процедура встановлення відповідності методики метрологічним вимогам, що ставляться до неї.

Взаємодія між ОВ і ЗВТ здійснюється за допомогою вимірювальних сигналів, причому залежно від задачі вимірювання (або контролю) вимірювальний сигнал може не тільки подаватися на вхід ЗВТ з виходу ОВ, але й навпаки – з виходу ЗВТ на вхід ОВ.

Вимірювання виконуються, як правило, людиною-оператором (суб'єктом вимірювання), психофізіологічні якості котрої можуть вносити в результат вимірювання специфічну похибку через суб'єктивне сприймання показів ЗВТ. Вплив суб'єктивного фактора виключається при автоматизації знімання та оцінки результату вимірювання.

Процес вимірювання виконується за певних умов, під якими розуміють комплекс факторів, що впливають на метрологічні характеристики ЗВТ. Такі фактори об'єднуються поняттям "впливні величини".

Впливна величина – це фізична величина, що впливає на результат вимірювання через засоби вимірювальної техніки, але не є вимірюваною величиною.

До впливних величин можуть належати, наприклад, температура, вологість і тиск навколишнього середовища, механічні дії, зовнішнє електромагнітне поле, напруга живлення та ін. Таким чином, на ЗВТ діють як вимірювана величина, так і впливні величини. Засіб

вимірювальної техніки з усієї множини діючих на нього величин мусить виділяти тільки вимірювану величину і не повинен реагувати на всі інші величини. Проте будь-який ЗВТ чутливий більшою чи меншою мірою до невимірюваних (впливних) величин, що впливають на його покази, а отже, і на результат вимірювання. Вплив цих величин на результат вимірювання мусить бути вивчений і врахований. До впливних величин належать також неінформативні параметри вхідних сигналів ЗВТ (див. підп. 1.3.3). Кожна з впливних величин, взагалі кажучи, може бути виміряна окремо і врахована, але в реальних умовах вимірювань їх дія призводить до похибки вимірювання.

Таким чином, процес вимірювання передбачає виконання таких основних етапів: визначення фізичної моделі об'єкта вимірювання; обґрунтований і взаємозв'язаний вибір методу вимірювання і засобу (засобів) вимірювальної техніки; виявлення впливних величин і, якщо потрібно, забезпечення їх допустимих значень; проведення експерименту для одержання результату вимірювання (з допустимою похибкою) за певною методикою виконання вимірювань, що включає в разі необхідності математичну обробку (обчислення) експериментальних даних (вимірювальної інформації).

2. Основні терміни та визначення в галузі метрології та метрологічного забезпечення

Метрологія – це наука про вимірювання, яка включає теоретичні і практичні аспекти вимірювань в усіх галузях науки і техніки. Головним завданням метрології є забезпечення єдності і заданої (потрібної) точності вимірювань.

Поняття "метрологічне забезпечення" виникло порівняно недавно і викликано необхідністю встановлення єдиного підходу до організації і проведення вимірювань, а також до єдиного розуміння їх результатів.

У широкому значенні під *метрологічним забезпеченням* розуміють установлення і застосування метрологічних норм і правил, а також розробку, виготовлення та застосування технічних засобів, необхідних для досягнення єдності і потрібної точності вимірювань.

Метрологічне забезпечення перетворилося в самостійну галузь техніки, яка має важливе практичне значення. Головними сферами його застосування є підвищення ефективності наукових досліджень і

дослідно-конструкторських робіт, технічного обслуговування різних фізичних об'єктів і підтримання їх працездатного стану, зберігання матеріальних цінностей і енергетичних ресурсів, медицина, охорона навколишнього середовища і контроль умов життєдіяльності людей, підвищення вірогідності випробувань і контролю якості продукції тощо.

З визначення метрологічного забезпечення випливає, що центральне місце в ньому посідає поняття "вимірювання". Проте перед тим, як дати визначення "вимірюванню", введемо поняття "об'єкт вимірювання", "фізична величина" та "одиниця вимірювань", або "одиниця фізичної величини"(ОФВ).

Єдність вимірювань – стан вимірювань, при якому їхні результати виражаються в узаконених одиницях вимірювань, похибки вимірювань відомі та з заданою ймовірністю не виходять за встановлені границі.

Забезпечення єдності вимірювань є необхідним для зіставлення результатів вимірювань, виконаних у різний час, у різних місцях, різними методами і засобами, різними експериментаторами.

Об'єкт вимірювання – матеріальний об'єкт, одна або декілька властивостей якого підлягають вимірюванню.

Кожному об'єкту матеріального світу, до якого, зокрема, належать технічні об'єкти (елементи, пристрої, прилади, агрегати, системи, комплекси), речовини, явища і процеси (фізичні, хімічні, біологічні, технологічні та ін.), а також люди, притаманна безліч різних властивостей, на підставі яких можуть бути одержані певні відомості про стан об'єкта вимірювання (ОВ). Сукупність цих відомостей називається узагальненим поняттям *інформація*.

Властивості ОВ відрізняються якісними і кількісними ознаками, які відображаються в понятті "фізична величина" (рис.2.1).

Під **фізичною величиною (ФВ)** розуміють властивість, загальну в якісному відношенні для багатьох об'єктів вимірювань, але в кількісному відношенні індивідуальну для кожного з них. Отже, якісні ознаки мають узагальнений характер, вони об'єднують однорідні властивості найрізноманітніших ОВ. Так, до фізичних величин належать, наприклад, маса, довжина, температура, струм, електрична напруга, частота тощо. Якісна ознака ФВ відображається в понятті "*рід ФВ*".

Фізичні величини, що підлягають вимірюванню, називають *вимірюваними величинами*. Інколи використовують термін

"контрольовані параметри". Наприклад, вимірюваними величинами, або контрольованими параметрами, можуть бути напруга і частота джерела живлення, температура, тиск і вологість повітря атмосфери, частотні характеристики технічного об'єкта і т.д.

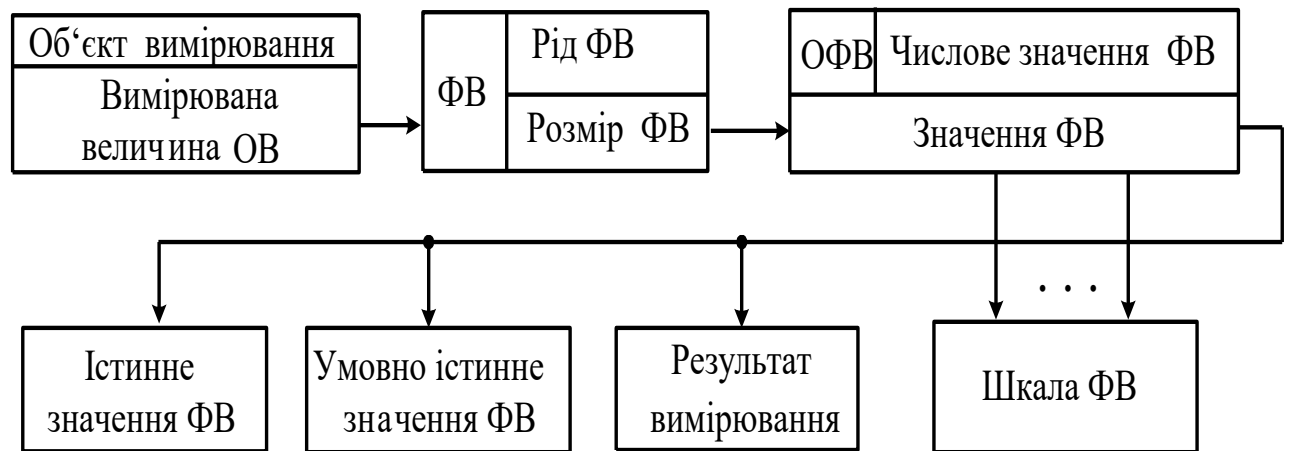


Рисунок 2.1. - Фізична величина та її характеристики

Найважливішими є відомості про кількісні характеристики властивостей ОВ, які одержують за допомогою вимірювань. Такі відомості розширюють наші знання, тобто знижують якоюсь мірою невизначеність знань про ОВ. Таким чином, вимірювання служать для одержання інформації про явища, технічні процеси, об'єкти тощо, тому вони вважаються інформаційним процесом. Основним інструментом одержання кількісної інформації є засоби вимірювальної техніки. Отже, вимірювальна техніка призначена для одержання експериментальної кількісної інформації про властивості різноманітних об'єктів матеріального світу. Таку інформацію одержують за допомогою процесів вимірювання, контролю, обліку, розпізнавання, виявлення, діагностики.

Інформацію про вимірювані величини та залежності між ними називають **вимірювальною інформацією**. Вона виникає під час взаємодії, принаймні, двох матеріальних об'єктів – об'єкта вимірювання і засобу вимірювальної техніки (ЗВТ). Отже, **засіб вимірювальної техніки** є джерелом вимірювальної інформації.

Індивідуальність фізичної величини в кількісному відношенні відображається в поняттях "розмір" і "значення фізичної величини".

Під **розміром фізичної величини** розуміють кількісний вміст фізичної величини в даному об'єкті вимірювання.

Значення фізичної величини – це відображення розміру фізичної величини у вигляді числового значення величини з позначенням одиниці вимірювання.

Числове значення фізичної величини – число, яке дорівнює відношенню розміру вимірюваної фізичної величини до розміру одиниці вимірювань (одиниці цієї фізичної величини) або кратної (часткової) одиниці.

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

Вимірювання – це відображення фізичних величин їхніми значеннями за допомогою експерименту (а іноді обчислень) із застосуванням спеціальних технічних засобів.

Відрізняють істинне і умовно істинне (дійсне) значення ФВ.

Істинне значення фізичної величини – це значення фізичної величини, що ідеально відображає в якісному і кількісному відношенні відповідну властивість даного об'єкта вимірювання.

Проте через недосконалість вимірювань і ЗВТ істинне значення ФВ, яке існує об'єктивно, незалежно від його пізнання нами, визначити експериментально в принципі неможливо. Тому для значення фізичної величини, знайденого шляхом вимірювання, застосовують терміни "умовно істинне (дійсне) значення" і "результат вимірювання".

Умовно істинне (дійсне) значення фізичної величини – це значення фізичної величини, знайдене експериментально і настільки наближене до істинного значення, що може бути використано замість нього для даної мети.

Результат вимірювання – це значення фізичної величини, одержане шляхом її вимірювання. Результати вимірювань знаходять за показами засобів вимірювань (ЗВ) безпосередньо або після додаткових обчислень.

Показ засобу вимірювань – значення вимірюваної величини, відтворене за допомогою засобу вимірювань і подане сигналом вимірювальної інформації.

При практичних вимірюваннях поняття "умовно істинне значення ФВ" і "результат вимірювання" вважаються ідентичними, і тільки при порівнянні показів двох ЗВ, на чому ґрунтується повірка та метрологічна атестація ЗВ, вони розрізняються. За умовно істинне (дійсне) значення

приймають показ більш точного, зразкового ЗВ, а за результат вимірювання – показ ЗВ, що повіряється (атестується).

Сказане вище можна сформулювати у вигляді трьох постулатів вимірювань.

1. Існує істинне значення ФВ, яке підлягає вимірюванню. Це значення якнайкраще відображає в кількісному відношенні розмір відповідної властивості ОВ.

2. Істинне значення ФВ визначити неможливо через недосконалість різних елементів процесу вимірювання. Тому вимірюють умовно істинне (дійсне) значення ФВ, яке відрізняється від її істинного значення.

3. Істинне значення ФВ є постійним.

Математично результат вимірювання X (значення фізичної величини) в загальному вигляді подають у формі запису, названого *основним рівнянням вимірювання*:

$$X = \{X\}[X] = N_X X, \quad (2.1)$$

де $\{X\} = N_X$ – числове значення вимірюваної фізичної величини (показ ЗВ);

$[X]$ – одиниця вимірювань (одиниця фізичної величини).

Основним дане рівняння названо тому, що воно повністю розкриває метрологічну суть вимірювань, яка полягає в порівнянні розміру вимірюваної ФВ X з прийнятою одиницею $[X]$ цієї ФВ.

Таким чином, результат вимірювання виражають іменованим або неіменованим числом, яке становить співвідношення розміру вимірюваної ФВ з її одиницею. Приклади: 220 В, 36 °С – іменовані числа; відношення напруг 10,0, коефіцієнт підсилення 100 – неіменовані числа.

Якісна відміна результату вимірювання та умовно істинного (дійсного) значення вимірюваної ФВ від її істинного значення характеризується *похибкою вимірювання*. Похибка властива будь-якому вимірюванню і є досить важливим показником якості вимірювань. Тому, вказуючи результат вимірювання, необхідно наводити характеристику похибки, за якою він одержаний. Адекватним похибці є інший показник якості вимірювань – *точність вимірювання*, що, як і похибка, відображає міру близькості результату вимірювання до істинного значення вимірюваної величини.

Крім похибки і точності вимірювань, для характеристики якості вимірювань використовуються й інші показники: правильність, збіжність і відтворюваність, а також невизначеність.

3. Системи фізичних величин

Вимірювання фізичних величин, що характеризують той чи інший ОВ, дозволяють установити і кількісно виразити зв'язки, які існують між цими величинами. Саме так, наприклад, було встановлено математичний зв'язок між масою тіла, прискоренням і силою, яка його створює, відомий під назвою другого закону Ньютона.

Аналітичний зв'язок між фізичними величинами, що відображає різні властивості будь-якого ОВ, виражається *рівнянням зв'язку*, яке в загальному випадку має вигляд:

$$X = A \cdot X_1^{\alpha_1} \cdot X_2^{\alpha_2} \cdot \dots \cdot X_n^{\alpha_n} = A \prod_{i=1}^n X_i^{\alpha_i}, \quad (3.1)$$

де X_i – фізичні величини, $i = \overline{1, n}$;

α_i – абстраговані додатні та від'ємні числа;

A – числовий коефіцієнт.

Сукупність фізичних величин, що розглядаються як узагальнені фізичні властивості і зв'язані між собою строгими функціональними залежностями, називається *системою фізичних величин*. Фізичні величини поділяють на основні та похідні.

Основна фізична величина – це фізична величина, що входить у дану систему фізичних величин і прийнята за незалежну від інших величин цієї системи. Наприклад, до основних величин різних систем належать довжина, маса, час.

Похідна фізична величина – це фізична величина, що входить у дану систему фізичних величин і визначається через основні величини цієї системи.

4. Системи одиниць вимірювань

Нагадаємо, що, згідно з основним рівнянням вимірювань (2.1), усі результати вимірювань подаються у загальноприйнятих одиницях вимірювань, або одиницях фізичних величин.

Для позначення одиниць вимірювань використовують їх умовні символи у вигляді літерних позначень, які можуть бути міжнародними (з латинського та грецького алфавітів) і українськими.

Наприклад: m (м) – позначення метра, kg (кг) – позначення кілограма, s (с) – позначення секунди, V (В) – позначення вольт, Ω (Ом) – позначення ома.

Одиниці вимірювань, їх найменування, позначення і правила застосування встановлюються державним стандартом.

Зв'язок між одиницями вимірювань установлює рівняння зв'язку, одержане з основного рівняння (2.1) і рівняння зв'язку (3.1) між ФВ. З урахуванням (2.1) рівняння зв'язку (3.1) записується у вигляді

$$X = A \prod_{i=1}^n \{X_i\}^{\alpha_i} [X_i]^{\alpha_i}. \quad (4.1)$$

Воно є основою для одержання іншого виду рівняння зв'язку між числовими значеннями

$$\{X\} = a \prod_{i=1}^n \{X_i\}^{\alpha_i}. \quad (4.2)$$

У цьому рівнянні символи позначають не конкретні величини (масу, довжину, силу і под.), а конкретні числа, які залежать від вибору одиниць відповідних ФВ. Наявність у формулі (4.2) числового коефіцієнта **a**, який залежить від вибору одиниць, є характерною ознакою рівнянь цього виду. До них, зокрема, належать усі емпіричні формули.

Розділивши рівняння (4.1) на (4.2), одержимо рівняння зв'язку між одиницями вимірювань:

$$[X] = b \prod_{i=1}^n [X_i]^{\alpha_i}, \quad (4.3)$$

де **b**- числовий коефіцієнт: $b = Aa^{-1}$.

Одиниці вимірювань $[X_i]$ можуть бути вибрані таким чином, щоб коефіцієнт **A** в рівнянні (1.3) дорівнював коефіцієнту **a** в рівнянні (1.4), тобто $A = a$. Тоді коефіцієнт $b = 1$. Одиниці фізичних величин, які задовольняють цій умові, називають *когерентними*. Вони утворюють когерентну систему одиниць вимірювань, для яких рівняння зв'язку (4.2) між числовими значеннями має таку саму форму (включаючи коефіцієнт), що й рівняння зв'язку (4.1) між фізичними величинами.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Доповісти предмет, основи та завдання дисципліни.
2. Дати визначення метрології, об'єкту вимірювань, результату вимірювань.

ЛЕКЦІЇ № 2

Методи прямих вимірювань.

1. Основні методи вимірювань

Різновиди методів прямих вимірювань

Методи прямих вимірювань за участю (із застосуванням) в них міри поділяють на дві групи:

- 1) методи безпосередньої оцінки
- 2) методи, які ґрунтуються на порівнянні вимірюваної фізичної величини з мірою (або просто – методи порівняння) (рис. 1.1).

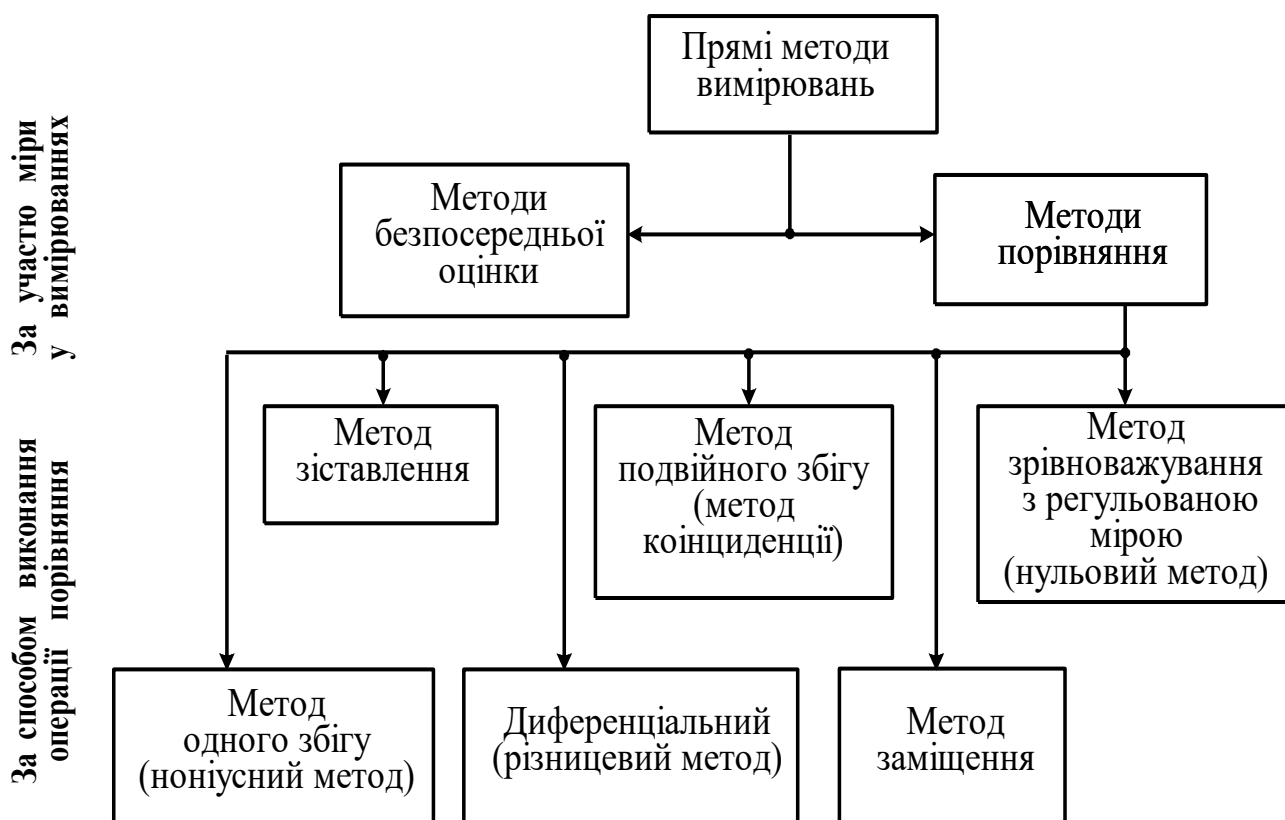


Рисунок 1.1 - Різновиди методів прямих вимірювань

Методом безпосередньої оцінки називають метод, в якому значення вимірюваної величини визначається безпосередньо за показувальним пристроєм вимірювального приладу прямої дії. Наприклад, вимірювання напруги вольтметром, частоти – частотоміром.

Методи порівняння ґрунтуються на порівнянні вимірюваної величини X з однорідною величиною X_0 , відтворюваною мірою. За способом виконання операції порівняння з мірою розрізняють такі різновиди методів прямих вимірювань: метод зіставлення, метод одного збігу (метод ноніуса), метод подвійного збігу (метод коінциденції), метод зрівноважування з регульованою мірою (нульовий метод), диференціальний (різницевий) метод і метод заміщення.

Метод зіставлення полягає в тому, що вимірювана величина одночасно (паралельно) зіставляється (шляхом порівняння) з рівномірною шкалою (сіткою) значень (рівнів) однорідної зразкової фізичної величини X_0 , які задаються багатозначною нерегульованою мірою (рис. 1.2). Прикладом методу є вимірювання довжини лінійкою.

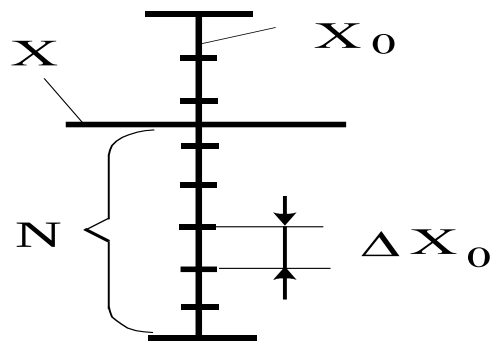


Рисунок 1.2 - До пояснення методу зіставлення

У деяких цифрових вимірювальних приладах або АЦП паралельної дії зіставлення (або порівняння) виконується автоматично за допомогою компараторів, кількість яких дорівнює кількості рівнів зразкової фізичної величини X_0 . На одні входи компараторів, що об'єднані між собою, подається вимірювана величина X , а на інші входи компараторів подаються відповідні рівні зразкової величини X_0 з багатозначної міри. Залежно від розміру вимірюваної величини X спрацьовує один з компараторів, наприклад, за номером N .

Тоді результат вимірювання визначається рівністю

$$X = N \cdot \Delta X_0,$$

де ΔX_0 – ступінь (інтервал, дискретність) задання зразкової величини X_0 .

Точність методу зіставлення визначається метрологічними характеристиками багатозначної міри і ступенем ΔX_0 . Найважливішим достоїнством методу є найвища швидкодія в порівнянні з іншими методами, а його значною вадою – велика апаратурна складність (і вартість), що обумовлена використанням багатозначної міри і значної кількості компараторів, яка зростає з підвищенням точності вимірювань, пов'язаним зі зменшенням ступеня ΔX_0 задання зразкової величини.

Метод одного збігу (ноніусний метод) полягає в одноразовому порівнянні зразкових величин двох багатозначних нерегульованих мір X_{01} і X_{02} , які мають різні ступені ΔX_{01} і ΔX_{02} , а їхні нульові позначки зсунуті між собою на вимірювану величину X (або ΔX) (рис. 1.3). Співвідношення між ступенями ΔX_{01} і ΔX_{02} мір встановлюється рівністю

$$\Delta X_{02} = \Delta X_{01} \left(1 - \frac{1}{n} \right) = \Delta X_{01} \frac{n-1}{n},$$

де n – число, яке звичайно обирають кратним 10.

Метод застосовується при вимірюванні малих розмірів фізичних величин, коли $X < \Delta X_{01}$. Під X слід розуміти або вимірюваний розмір фізичної величини, або різницю (чи похибку) ΔX між результатом грубого вимірювання $\tilde{X}$ (за допомогою однієї міри X_{01}) та істинним значенням вимірюваної величини X_i : $\Delta X = \tilde{X} - X_i$. У цьому разі вимірюване значення ΔX використовується як поправка $\Pi = -\Delta X$ до грубого результату вимірювання, уточнюючи його:

$$X_i = \tilde{X} + \Pi = \tilde{X} - \Delta X.$$

У процесі вимірювання (ручного або автоматичного) визначають номер l перших збіжних рівнів (позначок) обох мір. Тоді

$$X + l\Delta X_{02} = l\Delta X_{01},$$

звідси результат вимірювання

$$X = l\Delta X_{01} - l\Delta X_{02} = l(\Delta X_{01} - \Delta X_{02}) = l \frac{\Delta X_{01}}{n}.$$

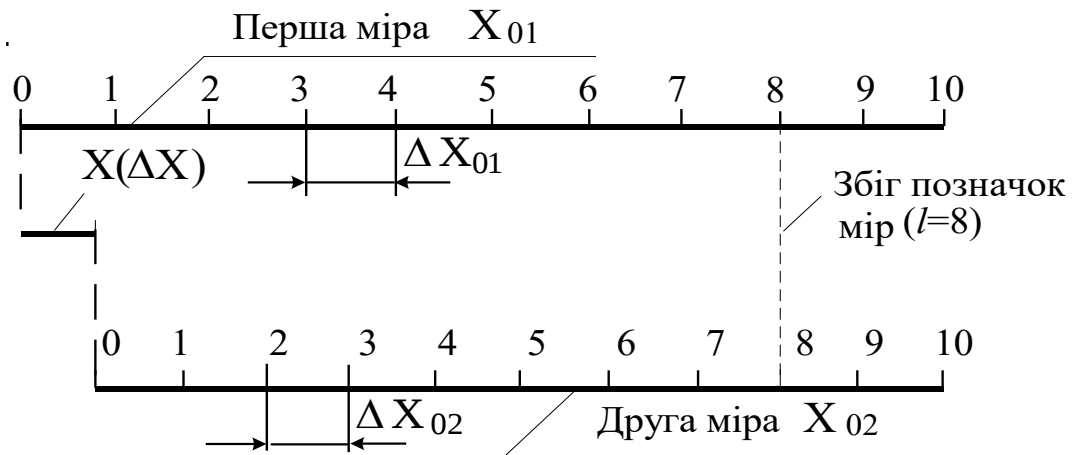


Рисунок 1.3 - До пояснення методу одного збігу (ноніусного методу)

На рис. 1.3: $X_{01} = 10$ мм; $n = 10$; $X_{02} = 9$ мм; $l = 8$ і $X = 8 \cdot 10 / 10 = 8$ мм.

Таким чином, значення ступеня ΔX_{01} першої міри, а отже, і похибка дискретності вимірювання при використанні двох мір зменшується в n разів у порівнянні з використанням тільки однієї міри. Метод застосовується в тих випадках, коли неможливо або недоцільно створювати міру зі ступенем, меншим деякого значення ΔX_0 .

Наприклад, практично неможливо створити лінійку з ціною поділки 0,1 мм або менше. Але цю задачу вирішують штангенциркуль і мікрометр, які мають дві шкали – основну і ноніусну.

Метод подвійного збігу (метод коінциденції) полягає в одноразовому порівнянні n зістикованих вимірюваних величин X одного і того самого розміру (рис. 1.4,а) із зразковою величиною X_0 , що відтворюється багатозначною нерегульованою мірою зі ступенем ΔX_0 (рис. 1.4,б).

Результат вимірювання визначається за формулою

$$X = N \frac{\Delta X_0}{n},$$

його абсолютна похибка

$$\Delta X' = N\Delta X_0 - nX.$$

При такому вимірюванні зберігається та сама максимальна абсолютна похибка дискретності $\Delta X'_{max} = \Delta X_0$, що і при вимірюванні однієї вимірюваної величини X ($\Delta X_{max} = \Delta X_0$), а це приводить до зменшення максимальної відносної похибки дискретності в n разів:

$$\delta X' = \frac{\Delta X_0}{nX} = \frac{\delta X}{n},$$

де $\delta X = \Delta X_0/X$ – максимальна відносна похибка дискретності вимірювання однієї фізичної величини X .

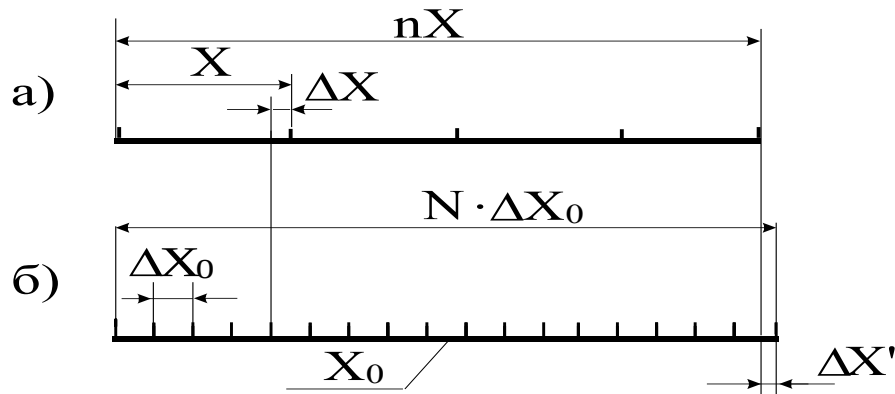


Рисунок 1.4 - До пояснення методу подвійного збігу (методу коінциденції)

Диференціальний (різницевий) метод ґрунтується на безпосередньому вимірюванні невеликої різниці розмірів ΔX вимірюваної величини X і однорідної величини X_0 , що відтворюється мірою (рис. 1.5). Тоді результат вимірювання

$$X = X_0 + \Delta X,$$

де $\Delta X = X - X_0$ – різниця величин X та X_0 на виході різницевого пристрою, яка подається на вимірювальний прилад. Диференціальний метод застосовується в тих випадках, коли розміри X і X_0 є близькими.

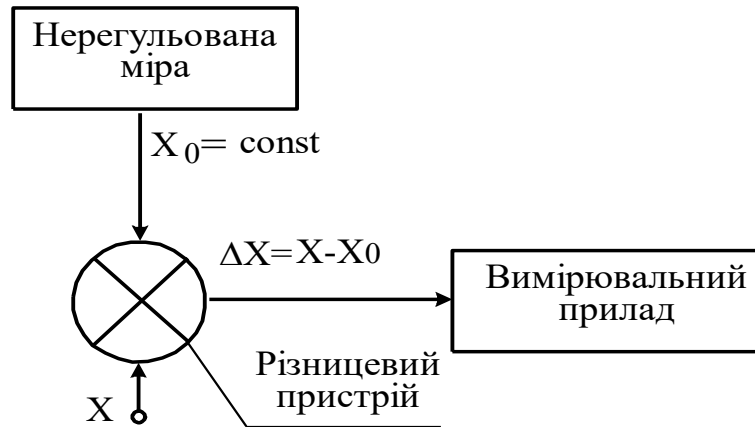


Рисунок 1.5 - До пояснення диференціального різницевого методу

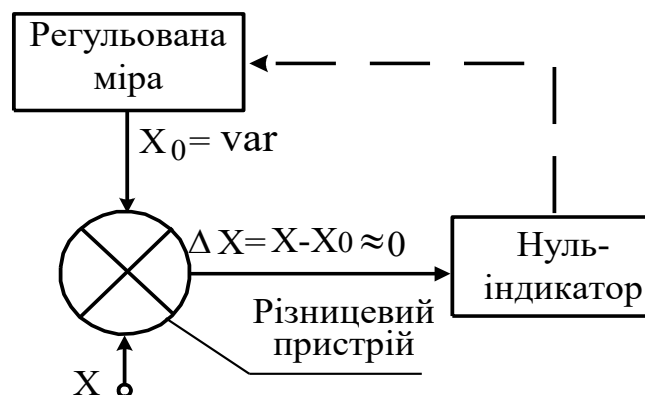
Метод зрівноважування з регульованою мірою (або нульовий метод) полягає в тому, що вимірювана величина X порівнюється із зразковою величиною X_0 , що відтворюється багатозначною мірою, яка регулюється до повного зрівноважування розмірів вимірюваної величини і зразкової величини (рис. 1.6,а).

Для фіксації моменту зрівноважування, тобто виконання умови $\Delta X = X - X_0 = 0$, на виході різницевого пристрою використовується компаратор або нуль-індикатор. Регулювання міри може здійснюватися вручну оператором за показами нуль-індикатора або автоматично (показано пунктиром).

Результат вимірювання $X = X_0$.

Приклади застосування методу: вимірювання маси на рівноплечих терезах із зрівноважуванням набором гир; вимірювання електричної напруги компенсатором.

а)



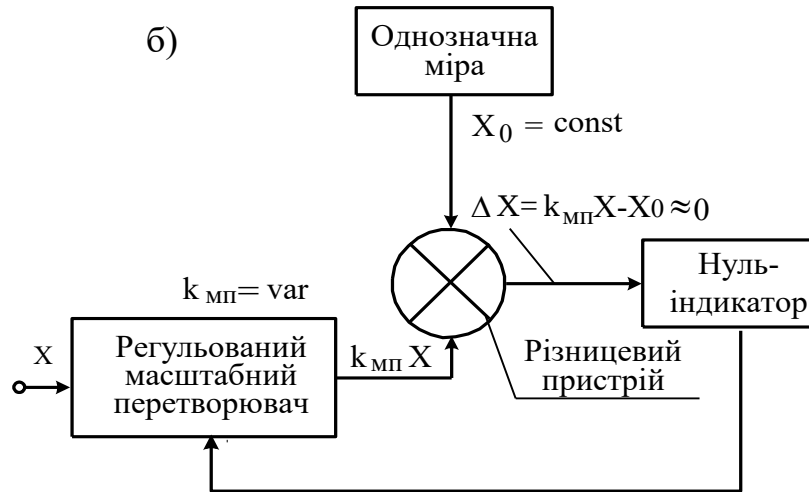


Рисунок 1.6 - До пояснення методу зрівноважування: а) - з регульованою мірою; б) - з регульованим масштабним перетворювачем

Другий варіант нульового методу (рис. 1.6,б) полягає в тому, що в процесі вимірювання використовується однозначна нерегульована міра X_0 ($X_0 = \text{const}$), а розмір вимірюваної величини X змінюється за допомогою регульованого масштабного вимірювального перетворювача, змінювання коефіцієнта перетворення $k_{\text{мп}}$ якого відбувається до досягнення нульового ефекту на виході різницевого пристрою:

$$\Delta X = k_{\text{мп}} X - X_0 \approx 0.$$

Тоді результат вимірювання $X = X_0 / k_{\text{мп}}$.

Нульовий метод характеризується не тільки малими апаратними витратами, але й значно меншою швидкістю у порівнянні з методом зіставлення, що обумовлено неминучими витратами часу на регулювання міри або масштабного перетворювача. Точність вимірювань цим методом визначається похибками міри (і масштабного перетворювача в іншому варіанті) та чутливістю різницевого пристрою (або компаратора). Іноді нульовий метод розглядають як різновид диференціального методу.

Метод заміщення – це метод порівняння, в якому вимірювана величина X заміщується величиною X_0 , що відтворюється регульованою мірою (рис.1.7).

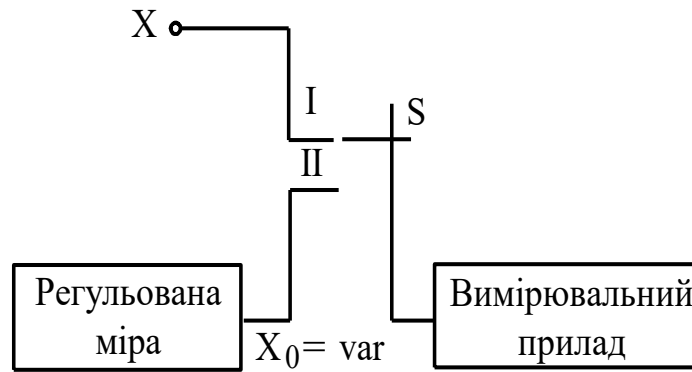


Рисунок 1.7 - До пояснення методу заміщення

Вимірювання здійснюється за два етапи. На першому етапі до входу вимірювального приладу перемикачем S (положення I) вмикається величина X і фіксується показ вимірювального приладу. На другому етапі вимірювань перемикачем S (положення II) до приладу вмикається вихід міри X_0 і її регулюванням домагаються того самого показу вимірювального приладу, що й на першому етапі. Результат вимірювання одержують з відлікового пристрою міри:

$$X = X_0.$$

Точність методу заміщення залежить тільки від похибки міри і практично не залежить від систематичної похибки вимірювального приладу, що є суттєвим достоїнством методу заміщення. Метод використовується у ЗВТ високої точності, в тому числі в еталонах.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як розділяють прямі методи вимірювань? Поясніть фізичну суть усіх різновидів прямого методу вимірювань.
2. Назвіть основні етапи процесу вимірювання.

ЛЕКЦІЇ № 3

ЗАСОБИ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

1. Класифікація засобів вимірювань

Різновиди засобів вимірювальної техніки за функціональним призначенням

1.1 За функціональним призначенням розрізняють три різновиди ЗВТ:

- засоби вимірювань,
- вимірювальні пристрої,
- еталони.

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

Вимірювальний пристрій - засіб вимірювальної техніки, в якому виконується лише одна із складових частин процедури вимірювань (вимірювальна операція).

Засоби вимірювань поділяють на:

- вимірювальні прилади,
- кодові засоби вимірювань,
- реєструвальні засоби вимірювань,
- вимірювальні канали,
- вимірювальні системи
- вимірювальні інформаційні системи.

Вимірювальний прилад - засіб вимірювань, в якому створюється візуальний сигнал вимірювальної інформації.

Кодовий засіб вимірювань (аналога-цифровий перетворювач) - засіб вимірювань, в якому створюється кодовий сигнал вимірювальної інформації.

Реєструвальний засіб вимірювань - засіб вимірювань, в якому реєструється сигнал вимірювальної інформації.

Реєструвальні ЗВ забезпечують можливість автоматичного документування результатів вимірювань шляхом їх запису в аналоговій формі (наприклад сейсмографи).

Вимірювальний канал - сукупність засобів вимірювальної техніки, засобів передавання і зберігання інформації та інших технічних засобів, функціонально об'єднаних для створення сигналу вимірювальної інформації про одну вимірювану фізичну величину.

Вимірювальна система - сукупність вимірювальних каналів, окремих засобів вимірювальної техніки, засобів збирання, передавання і зберігання інформації та інших технічних засобів, функціонально об'єднаних для створення сигналів вимірювальної інформації про декілька вимірюваних фізичних величин.

Вимірювальна інформаційна система - сукупність вимірювальних каналів, окремих засобів вимірювальної техніки, контролю і діагностики, засобів збирання, передавання, зберігання і обробки інформації, інших технічних засобів, функціонально об'єднаних для створення сигналів вимірювальної та інших видів інформації.

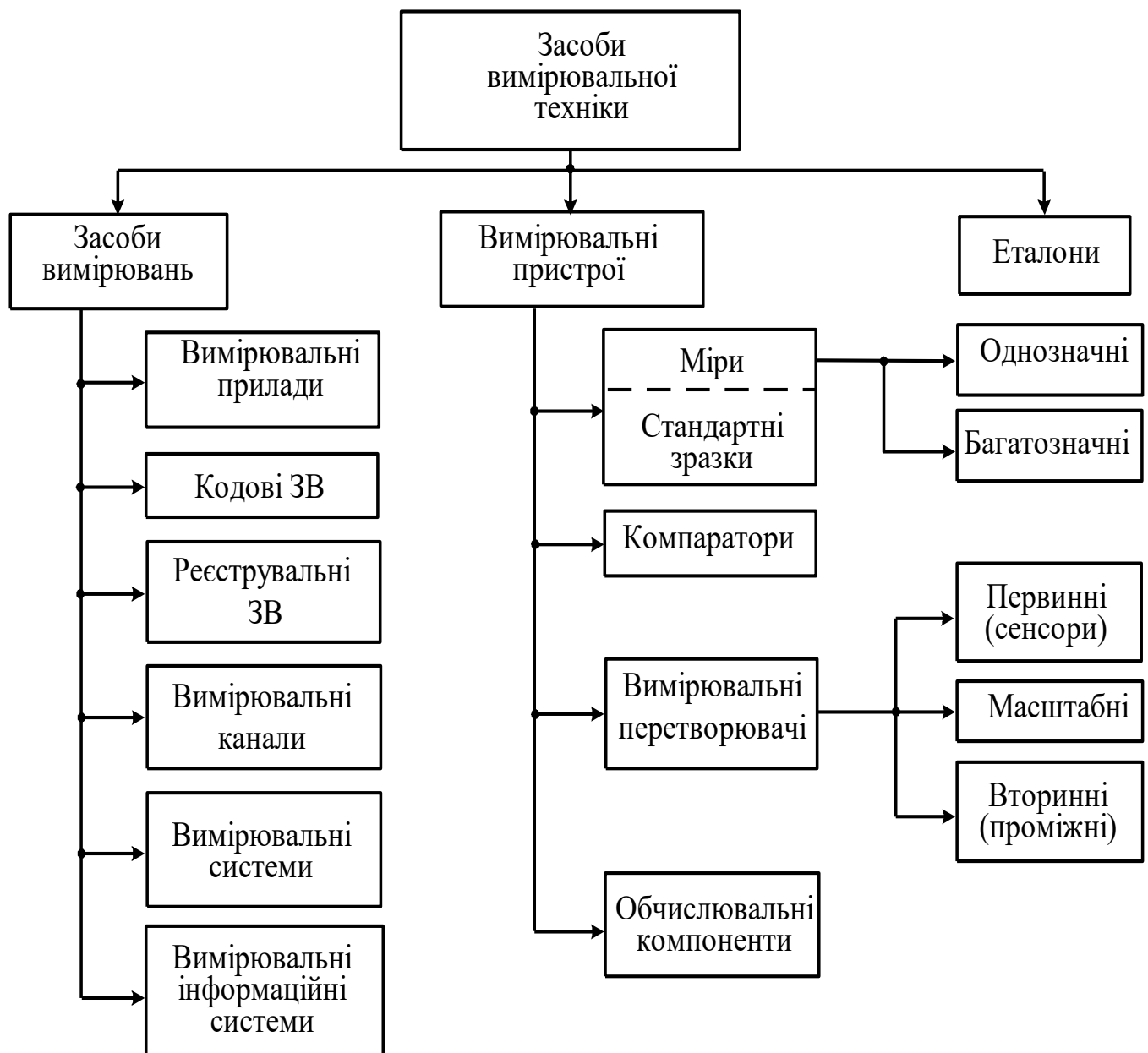


Рисунок 1.1 - Класифікація засобів вимірювальної техніки

1.2 Вимірювальні пристрої за функціональним призначенням поділяють на:

1. міри,
2. компаратори,
3. вимірювальні перетворювачі
4. обчислювальні компоненти.

Міра фізичної величини - вимірювальний пристрій, що реалізує відтворення та зберігання фізичної величини одного або декількох заданих значень.

Розрізняють однозначні і багатозначні міри.

Однозначною називається міра, яка відтворює фізичну величину одного значення (наприклад, нормальний елемент, зразкова котушка опору).

Багатозначна міра забезпечує відтворення фізичної величини декількох значень (наприклад, штрихова міра довжини, конденсатор змінної ємності).

Окремим видом мір є стандартні зразки.

Стандартний зразок - міра у вигляді речовини або матеріалу зі встановленими в результаті метрологічної атестації значеннями однієї або декількох фізичних величин, що характеризують властивості або склад цієї речовини чи матеріалу.

Компаратор - вимірювальний пристрій, що реалізує операцію порівняння однорідних фізичних величин.

Компаратори не є класичними ЗВТ, тому вони не мають загальноприйнятих метрологічних характеристик. Їх основною характеристикою є чутливість або поріг чутливості. Компаратори конструктивно можуть виконуватися у вигляді автономних приладів. У цьому випадку їм надають букво-цифрове позначення, наприклад, компаратор частоти типу Ч7-12.

Вимірювальний перетворювач – вимірювальний пристрій, що реалізує операцію вимірювального перетворення.

Поняття вимірювального перетворення використовується в усіх без винятку галузях вимірювальної техніки, ставши одним з основних початкових положень. Вимірювальні перетворення складають етапи вимірювального процесу - від сприйняття фізичної величини до формування і подання її числового значення в тій чи іншій формі. Виділяють основні операції одержання і передавання вимірювальної інформації:

а) первинне сприйняття і виділення вимірюваної фізичної величини з одночасним формуванням сигналу вимірювальної інформації;

б) функціональне перетворення сигналу вимірювальної інформації;

в) подання вимірювальної інформації у тій чи іншій формі сповіщення.

Вимірювальні перетворювачі поділяються на різновиди за двома ознаками:

1. за місцем у вимірювальному ланцюзі
2. за видом здійснюваного перетворення.

За першою ознакою розрізняють первинні й вторинні (проміжні) вимірювальні перетворювачі.

Первинний вимірювальний перетворювач (сенсор) – вимірювальний перетворювач, який першим взаємодіє з об'єктом вимірювання.

Вимірювальні перетворювачі, що здійснюють проміжні перетворення вимірювальної інформації, тобто розташовані у вимірювальному каналі після первинного перетворювача, називають *вторинними вимірювальними перетворювачами*.

За видом перетворення сигналів вимірювальної інформації вимірювальні перетворювачі розділяють на

1. аналогові,
2. аналого-цифрові
3. цифро-аналогові перетворювачі

Аналогові вимірювальні перетворювачі перетворюють аналоговий сигнал в інший аналоговий сигнал, однорідний або різнорідний з початковим сигналом (наприклад, амплітудний детектор перетворює амплітуду змінної напруги в пропорційну постійну напругу).

АЦП здійснює перетворення аналогового сигналу в цифровий код.

ЦАП служить для зворотної операції перетворення – цифрового коду в безперервну напругу або струм.

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

Для технічної реалізації процесу вимірювання звичайно потрібні не тільки ЗВТ, а й інші технічні засоби, їх іноді називають допоміжними. Серед них виділяють вимірювальне приладдя, яке

безпосередньої участі в одержанні числового значення результату вимірювання не бере, але опосередковано впливає на похибки вимірювання. До приладдя, наприклад, належать пристрої для контролю і підтримки певних умов вимірювання (температури, тиску, газового складу), проти вібраційні фундаменти, пристрої екранування від електромагнітних полів тощо.

1.3. Різновиди засобів вимірювальної техніки за метрологічним призначенням

За метрологічним призначенням ЗВТ розділяють на:

1. робочі ЗВТ,
2. зразкові ЗВТ
3. еталони.

Робочий засіб вимірювальної техніки – засіб вимірювальної техніки, що застосовується для вимірювань, не зв'язаних з передаванням розміру одиниці вимірювань іншим засобом вимірювальної техніки.

Залежно від області застосування робочі ЗВТ можуть бути лабораторними, виробничими і польовими. Лабораторні ЗВТ використовуються при наукових дослідженнях. Виробничі ЗВТ застосовуються для вимірювання і контролю параметрів технологічних процесів та технічного стану виробничого обладнання, для контролю показників якості готової продукції тощо. Польові ЗВТ використовуються для експлуатаційних вимірювань і контролю параметрів таких технічних об'єктів, як літаки, автомобілі, кораблі та ін.

Зразковий засіб вимірювальної техніки – засіб вимірювальної техніки, призначений для перевірки інших засобів вимірювальної техніки і затверджений як зразковий.

Зразковий засіб вимірювальної техніки, що має метрологічні характеристики, які відповідають найвищому ступеню даної повірочної схеми, називають вихідним зразковим засобом вимірювальної техніки.

Засобами вимірювальної техніки найвищої точності є еталони одиниць вимірювань (одиниць фізичних величин).

Еталон одиниці (надалі еталон) – засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці вимірювань одного чи декількох значень, а також передавання розміру цієї одиниці засобам вимірювальної техніки.

Відтворення одиниці вимірювань (одиниці фізичної величини) – відтворення одиниці шляхом створення фіксованої за розміром фізичної величини відповідно до визначення одиниці вимірювань.

Передавання розміру одиниці вимірювань (одиниці фізичної величин) – зведення (доставка) розміру одиниці вимірювань (одиниці фізичної величини), яка відтворюється або зберігається засобом вимірювальної техніки, що повіряється, до розміру тієї самої одиниці, яка відтворюється або зберігається еталоном чи зразковим засобом вимірювальної техніки, при їх звіренні (повірці).

За призначенням і метрологічними характеристиками еталони розділяють на державні, робочі та вихідні.

Державний еталон – офіційно затверджений еталон, який забезпечує відтворення одиниці вимірювань та передавання її розміру іншим еталонам з найвищою в країні точністю.

Робочий еталон – еталон, призначений для перевірки або калібрування засобів вимірювальної техніки.

Вихідний еталон – еталон, який має найвищі метрологічні властивості серед еталонів, що є на підприємстві чи в організації.

Еталони можуть бути одиничними і груповими.

До складу групового еталона входить декілька (група) одиничних еталонів або (та) зразкових засобів вимірювальної техніки тієї самої фізичної величини.

Еталонна база створюється та вдосконалюється згідно з державними науково-технічними програмами, які розробляються Держстандартом України з метою забезпечення потреб науки, економіки і оборони.

1.4 Класифікація вимірювальних приладів

Вимірювальні прилади є найбільш розповсюдженим видом ЗВ. У систему їх класифікації покладені такі основні ознаки:

- рід вимірюваної фізичної величини,
- призначення,
- елементна база,
- спосіб одержання значення вимірюваної величини,
- спосіб обробки вимірювальної інформації,
- захищеність від впливу зовнішніх умов.

Залежно від вимірюваних фізичних величин вимірювальні прилади, як і вимірювання, розділяють на види. Кожний вид вимірювальних приладів об'єднує прилади, призначені для

вимірювання величин, які близькі за фізичною природою або належать до певної галузі науки і техніки. Наприклад: вимірювальні прилади для вимірювання електричних величин (електровимірювальні прилади), для вимірювання радіотехнічних величин (радіовимірювальні прилади) і т.д.

У межах виду вимірювальні прилади розділяють на типи. Вимірювальні прилади даного типу можуть мати модифікації, які відрізняються, наприклад, діапазоном вимірювань. Вид вимірювального приладу може включати декілька типів.

За призначенням вимірювальні прилади розділяють на:

- амперметри,
- вольтметри,
- частотоміри,
- фазометри, та ін.

За елементною базою, вимірювальні прилади розділяють на електромеханічні та електронні.

Електромеханічні вимірювальні прилади ґрунтуються на перетворенні енергії електромагнітного поля в механічну енергію переміщення рухомої частини приладу за допомогою електромеханічних перетворювачів.

До електронних належать вимірювальні прилади, в яких перетворення сигналів у вимірювальних каналах здійснюється за допомогою електронних вузлів, виконаних на електронних і напівпровідникових приладах, а також на інтегральних мікросхемах різного ступеня інтеграції, у тому числі на мікропроцесорах.

За методом вимірювання (або за участю міри у вимірюваннях) розрізняють вимірювальні прилади прямої дії і вимірювальні прилади порівняння.

Вимірювальні прилади прямої дії (або безпосередньої оцінки) ґрунтуються на одному або декількох послідовних перетвореннях вимірювального сигналу в одному напрямку. Такі прилади обов'язково потребують градування шкали показувального пристрою, під яким розуміють нанесення на шкалу позначок, що відповідають одному або декільком значенням вимірюваної фізичної величини.

У *вимірювальних приладах порівняння (або зрівноважування)* результат вимірювання одержують порівнянням розміру вимірюваної величини з розміром величини, що відтворюється мірою (вмонтованою або зовнішньою). Достоїнством вимірювальних

приладів порівняння є те, що їх похибка визначається в основному похибкою застосованої міри, а отже, удосконалення мір приводить до підвищення точності приладу в цілому.

За формою відліку показів вимірювальні прилади розподіляють на аналогові і цифрові.

Аналогові вимірювальні прилади – це вимірювальні прилади, показання яких є безперервною функцією часу, а точніше – функцією змінювання вимірюваної величини в часі. В їхньому вимірювальному каналі може здійснюватися перехід від безперервного сигналу до дискретного і навпаки. Візуальний сигнал вимірювальної інформації в них подається за допомогою шкали та вказівника.

Цифрові вимірювальні прилади – це вимірювальні прилади, що автоматично виробляють дискретні сигнали вимірювальної інформації і покази яких подані у цифровій формі. Ці покази є дискретною функцією часу і змінювання вимірюваної величини за рівнем.

Для зменшення впливу зовнішніх факторів у вимірювальних приладах передбачається захист від кліматичних і механічних дій. За ступенем захищеності ці прилади виготовляють звичайними, пило-, водо-, брызкозахищеними, герметичними, віброударостійкими і т.д.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Як розділяють прямі методи вимірювань? Поясніть фізичну суть усіх різновидів прямого методу вимірювань.
2. Назвіть основні етапи процесу вимірювання.

ЛЕКЦІЯ № 4

МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ (ЗВТ).

1. Визначення, суть, мета і задачі нормування метрологічних характеристик засобів вимірювальної техніки

Засоби вимірювальної техніки є одним з найважливіших компонентів вимірювального процесу, що значною мірою обумовлює якість вимірювань. У свою чергу, для оцінки якості ЗВТ використовується широка номенклатура показників, серед яких центральне місце посідають метрологічні характеристики.

Метрологічні характеристики ЗВТ – це характеристики ЗВТ, які нормуються для визначення результату вимірювання та його похибок.

Таким чином, усі метрологічні характеристики ЗВТ підлягають нормуванню, причому можна виділити два підходи до задання нормованих метрологічних характеристик (НМХ) ЗВТ:

- а) для робочих і зразкових ЗВТ широкого використання;
- б) для унікальних і високоточних ЗВТ.

При першому підході використовуються НМХ для типу ЗВТ, тобто НМХ відображають властивості всієї сукупності екземплярів ЗВТ, які належать до даного типу. В цьому випадку нормування метрологічних характеристик полягає в заданні норм, яким повинні задовольняти метрологічні характеристики всієї сукупності ЗВТ даного типу, а не властивості одного, окремо взятого екземпляра ЗВТ. Водночас реальні метрологічні характеристики кожного окремого екземпляра ЗВТ з цієї сукупності можуть бути будь-якими в границях, заданих нормами, і повинні розглядатися як випадкові величини. При другому підході – для особливо точних (унікальних, одиночних) ЗВТ, наприклад еталонів, проводиться індивідуальне нормування метрологічних характеристик. Проте суть його зберігається – це задання норм метрологічних характеристик, але для окремого екземпляра ЗВТ.

Реальні значення НМХ визначаються при проектуванні і зберігаються при виготовленні ЗВТ, а потім вони періодично перевіряються і підтримуються в процесі експлуатації ЗВТ. При

відхиленні хоча б однієї НМХ від норми даний ЗВТ регулюється, ремонтується або бракується і виводиться з експлуатації.

Основна мета нормування метрологічних характеристик ЗВТ полягає в тому, що з його допомогою забезпечується,

- 1) по-перше, взаємозамінність ЗВТ,
- 2) по-друге, єдність вимірювань не тільки в державному, але й міждержавному масштабах.

Більш того, ЗВТ допускаються до застосування тільки тоді, коли встановлені їх НМХ, відомості про які знаходяться в технічній документації на ЗВТ, причому в цих документах, згідно з існуючими стандартами, наводяться відомості про метрологічні характеристики типів ЗВТ. Лише в тих випадках, коли даних про типові НМХ недостатньо для правильного використання ЗВТ, експериментально досліджують конкретні екземпляри ЗВТ з метою визначення їхніх індивідуальних метрологічних характеристик. Проте цей шлях задання НМХ ЗВТ є винятковим, можливим лише в рідкісних випадках. Відсутність відомостей про НМХ ЗВТ чи не досить вірогідні їх оцінки повністю або частково знецінюють одержану за допомогою цих ЗВТ інформацію про властивості досліджуваних об'єктів і процесів.

На підставі НМХ ЗВТ здійснюється розв'язання таких важливих задач:

- 1) визначення результатів вимірювань, які виконуються із застосуванням будь-якого ЗВТ даного типу;
- 2) розрахункове визначення характеристики інструментальної складової похибки вимірювань, яке виконується будь-яким ЗВТ даного типу;
- 3) розрахунок метрологічних характеристик вимірювальних каналів різних вимірювальних установок, систем і комплексів, до складу яких входять ЗВТ;
- 4) оптимальний вибір ЗВТ для виконання вимірювань;
- 5) оцінка метрологічної справності ЗВТ при їх випробовуваннях і повірці.

Мета і задачі нормування метрологічних характеристик ЗВТ підкреслюють важливість вибору номенклатури і способів відображення НМХ ЗВТ, оскільки ними користуються і споживачі вимірювальної інформації, і розробники ЗВТ.

Увесь комплекс НМХ ЗВТ розподілений на дві групи:

1) НМХ, призначені для визначення результату вимірювання (без уведення поправок);

2) НМХ, які визначають інструментальну складову похибки вимірювання.

Загальний підхід до нормування метрологічних характеристик ЗВТ полягає в тому, що для функцій, які нормуються, і окремих значень НМХ установлюються номінальні функції і номінальні значення (наприклад, номінальна градувальна характеристика, номінальна функція перетворення, номінальна функція впливу, номінальне значення інформативного параметра, номінальне значення сталої часу і т.д.), а також границі їх допустимих відхилень. Для інших НМХ установлюються тільки границі допустимих значень (наприклад, границі допустимої основної похибки, границі допустимої додаткової похибки, границі допустимої похибки від гістерезису або варіації і т.д.).

2. Нормовані метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки, призначені для визначення результату вимірювання

При нормуванні метрологічних характеристик цієї групи, як правило, вказують номінальні характеристики ЗВТ. Виняток становить нормування індивідуальних характеристик окремих екземплярів ЗВТ, коли встановлюються границі (граничні характеристики), в яких повинна знаходитися індивідуальна характеристика в заданих умовах застосування ЗВТ.

До метрологічних характеристик даної групи належать такі номінальні характеристики:

- градувальна характеристика засобу вимірювань (ЗВ);
- функція перетворення вимірювального перетворювача (ВП);
- значення однозначної або багатозначної міри;
- ціна поділки шкали аналогового вимірювального приладу або багатозначної міри;
- вид вихідного коду, число розрядів коду, ціна одиниці найменшого (молодшого) розряду коду цифрових вимірювальних приладів і аналого-цифрових перетворювачів.

Градувальна характеристика засобу вимірювань – це функціональна залежність між значеннями сигналу вимірювальної

інформації на виході засобу вимірювань та відповідними їм значеннями вимірюваної величини на вході засобу вимірювань.

Функція перетворення вимірювального перетворювача – це функціональна залежність інформативного параметра вихідного сигналу вимірювального перетворювача від інформативного параметра його вхідного сигналу (або вхідних сигналів). Інформативні параметри вхідного і вихідного сигналів вимірювального перетворювача можуть не збігатися.

Градувальну характеристику ЗВ і функцію перетворення ВП задають в аналітичній, табличній або графічній формах, вони можуть мати лінійний і нелінійний характер. Їх представлення у вигляді графіка обов’язково повинно супроводжуватися відповідною формулою або таблицею. При аналітичній формі запису градувальна характеристика ЗВ і функція перетворення ВП у загальному випадку описуються рівнянням

$$Y = F(X), \quad (2.1)$$

де X , Y – інформативні параметри вхідного і вихідного сигналів ЗВ (і ВП) відповідно.

Для (2.1) іноді використовують термін “статична характеристика”. Надалі, розглядаючи функцію перетворення ВП як її окремий випадок, будемо користуватися терміном “градувальна характеристика” ЗВ.

Наявність похибок ЗВ призводить до того, що багаторазово зняті експериментально градувальні характеристики одного ЗВ або групи однотипних ЗВ відрізняються одна від одної і створюють при графічному зображенні деяку смугу, названу *смугою похибок даного типу або даного екземпляра ЗВ*. Певним чином проведена детермінована середня лінія цієї смуги приймається за *номінальну градувальну характеристику ЗВ* цього типу. Різниця між реальною і номінальною градувальними характеристиками при заданому значенні інформативного параметра вхідного сигналу X або при заданому значенні параметра вихідного сигналу Y являє собою *абсолютну похибку ЗВ*.

Для аналогових вимірювальних приладів під вихідною величиною або сигналом вимірювальної інформації розуміють лінійне або кутове переміщення вказівника, яке виражено в цілому числі поділок

шкали, а для цифрових вимірювальних приладів – число одиниць молодшого розряду вихідного коду.

Номінальні градувальні характеристики $Y_H = F_H(X)$ ЗВ звичайно мають лінійний характер в межах кінцевих значень X_K та Y_K , але реальні градувальні характеристики $Y_P = F_P(X)$ можуть відрізнятися від лінійних (рис. 2.1), що призводить до *похибки нелінійності* $\Delta_{\text{нел}}$. Як правило, ця похибка несуттєва у порівнянні з іншими складовими похибки ЗВ і її не враховують. Проте для ряду ВП (і ЗВ), особливо в області неелектричних вимірювань, похибка нелінійності є значною і для її зменшення використовують методи лінеаризації градувальної характеристики або методи корекції похибки, враховуючи, що вона має систематичний характер для даного конкретного екземпляра ВП.

З градувальною характеристикою ЗВ (і ВП) пов'язана така характеристика, як чутливість.

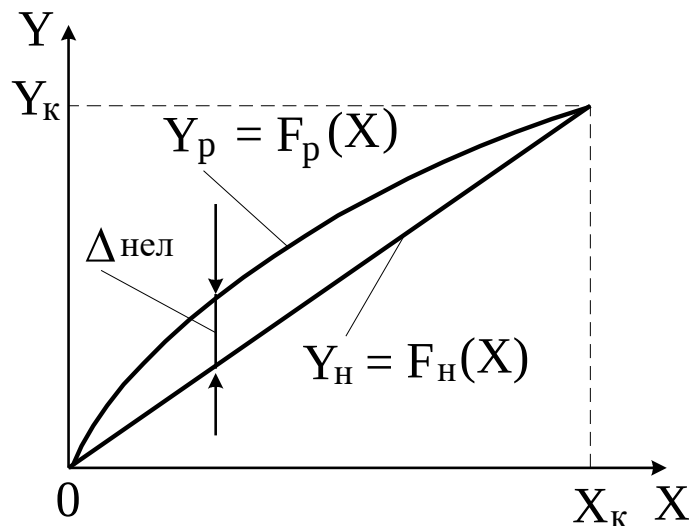


Рисунок 2.1 - Градувальні характеристики засобів вимірювань (або функції перетворення вимірювальних перетворювачів)

Чутливість ЗВ (і ВП) – це відношення зміни вихідної величини ЗВ (і ВП) ΔY до зміни вхідної величини ЗВ (і ВП) ΔX , що викликає зміну ΔY :

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \lim_{\Delta X \rightarrow 0} \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{dY}{dX}.$$

Отже, математично чутливість ЗВ (і ВП) являє собою похідну його вихідної величини по вхідній. Таку чутливість називають *абсолютною*. В окремих випадках застосовують поняття *відносної*

чутливості $ЗВ$ (і $ВП$), яку визначають як відношення зміни його вихідної величини ΔY до відносної зміни вхідної величини $\Delta X/X$:

$$S_B = \frac{\Delta Y}{\Delta X/X}.$$

Для $ЗВ$ (і $ВП$) з лінійною градуовальною характеристикою чутливість постійна і не залежить від розміру вимірюваної величини, вона може бути визначена як відношення вихідної величини до вхідної: $S = Y/X$. Вимірювальні прилади з лінійною градуовальною характеристикою мають рівномірну шкалу, для якої характерні рівномірне розташування позначок і однакова довжина всіх поділок шкали.

Позначка шкали – риска або інший знак на шкалі, що відповідають одному або декільком значенням вимірюваної величини. Позначки шкали, біля яких проставлені числові значення, називають числовими (або оцифрованими).

Поділка шкали – це частина шкали між двома сусідніми позначками шкали.

Ціна поділки шкали – це модуль різниці значень вимірюваної величини, що відповідають двом сусіднім позначкам шкали.

Ціна найменшого розряду цифрового вимірювального приладу (кодового засобу вимірювань) – різниця між двома найближчими показами цифрового вимірювального приладу (кодового засобу вимірювань).

Для $ЗВ$ (і $ВП$) з нелінійною градуовальною характеристикою чутливість залежить від вимірюваної величини, а шкала вимірювального приладу – нерівномірна (нелінійна).

Розмірність чутливості $ЗВ$ (і $ВП$) являє собою відношення одиниці його вихідної величини до одиниці вхідної величини.

За фізичною суттю до поняття “чутливість” близькі поняття “поріг чутливості” та “роздільна здатність” $ЗВ$, але вони не співпадають з нею.

Поріг чутливості засобу вимірювань – це найменше значення вимірюваної величини, яке може бути виявлено цим засобом вимірювань, а **роздільна здатність** – це мінімальна зміна вимірюваної величини, яку можна розпізнати за показом засобу вимірювань. Поріг чутливості та роздільна здатність мають розмірність вимірюваної величини.

Діапазон вимірювань ЗВ – це інтервал значень вимірюваної величини, в межах якого прономовані похибки ЗВ. Його граничні значення називають найбільшим і найменшим значеннями (верхньою і нижньою межею вимірювань). Для забезпечення більш високої точності діапазон ЗВ розбивають на піддіапазони, кожен з яких може мати різні похибки вимірювань. З діапазоном вимірювань не обов'язково збігається діапазон показів ЗВ – інтервал значень вимірюваної величини, який обмежений кінцевим і початковим її значеннями.

Діапазон вимірювань може бути меншим від діапазону показів, оскільки на окремих ділянках шкали (здебільшого на початковій і кінцевій) номована похибка не гарантується.

3. Експлуатаційні характеристики засобів вимірювальної техніки

До основних експлуатаційних характеристик ЗВТ належать показники надійності, стійкості до кліматичних і механічних дій, електрична міцність і опір ізоляції.

Під надійністю ЗВТ розуміють його здатність зберігати метрологічні й інші характеристики в установлених границях за певних умов експлуатації і протягом заданого часу. Здатність зберігати тільки номовані метрологічні характеристики називають метрологічною надійністю.

Фізично надійність ЗВТ виявляється через два типи відмов: раптові і поступові. При раптових відмовах ЗВТ повністю втрачає свою працездатність внаслідок різкої зміни одного або кількох його параметрів. Поступові, так звані параметричні відмови, проявляються в тому, що НМХ ЗВТ з часом виходять за встановлені межі. Надійність ЗВТ закладається в процесі розробки і виробництва, а підтримується в процесі експлуатації суворим виконанням порядку зберігання, транспортування і застосування, проведенням планового технічного обслуговування (в тому числі періодичних повірок) і ремонту. Дослідження показують, що до 30 % відмов ЗВТ виникають через неправильність їх експлуатації.

Надійність ЗВТ впливає на надійність технічних об'єктів, де вони застосовуються. Надійність умонтованих ЗВТ повинна бути вища за

надійність цих об'єктів. Тому підвищення надійності ЗВТ є однією з першочергових проблем в області удосконалення метрологічного забезпечення складних технічних комплексів і систем.

Для ЗВТ здебільшого характерні поступові відмови, які визначають метрологічну надійність і вносять невизначеність у результат вимірювань, оскільки вони найчастіше мають прихований характер і можуть бути виявлені при періодичних повірках. Визначення метрологічної надійності становить великі труднощі, але в теперішній час зроблені перші кроки для її нормування. Для ЗВТ, крім поняття “справність у фізичному розумінні”, введені поняття “метрологічна справність” і “метрологічна відмова”.

Метрологічна справність ЗВТ – це стан ЗВТ, при якому всі його НМХ відповідають установленим вимогам.

Метрологічна відмова ЗВТ – це вихід будь-якої НМХ ЗВТ за встановлені границі, тобто втрата його метрологічної справності.

Безвідмовністю називають властивість ЗВТ виконувати потрібні функції в певних умовах протягом заданого інтервалу часу чи наробітку.

Як показники безвідмовності ЗВТ частіш за все застосовують імовірність безвідмовної роботи і середній наробіток на відмову (між відмовами), рідше – середній наробіток до відмови і гамма-відсотковий наробіток на відмову.

Імовірність безвідмовної роботи ЗВТ визначається як імовірність того, що протягом заданого наробітку ЗВТ його відмова не виникає.

Середній наробіток ЗВТ на відмову – це відношення сумарного наробітку відновлюваного ЗВТ до математичного сподівання числа його відмов протягом цього наробітку.

Середній наробіток ЗВТ до відмови - це математичне сподівання наробітку ЗВТ до його першої відмови.

Гамма-відсотковий наробіток ЗВТ на відмову – це наробіток ЗВТ, протягом якого його відмова не виникне із заданою ймовірністю γ , вираженою у відсотках.

Довговічністю ЗВТ називають його властивість виконувати потрібні функції до переходу у граничний стан при встановленій системі технічного обслуговування та ремонту.

Граничний стан ЗВТ – це такий стан ЗВТ, за яким його подальша експлуатація неприпустима чи недоцільна, або відновлення його працездатного стану неможливе чи недоцільне.

Як показники довговічності ЗВТ використовують технічний ресурс, термін служби, гамма-відсотковий ресурс та гамма-відсотковий термін служби.

Технічним ресурсом ЗВТ називають його сумарний наробіток від початку експлуатації чи поновлення після ремонту до переходу в граничний стан.

Термін служби – це календарна тривалість експлуатації ЗВТ від початку чи її поновлення після ремонту до переходу в граничний стан цього ЗВТ.

Технічний ресурс ЗВТ визначають, як правило, у годинах, а термін служби - у роках. Кількісно ці показники довговічності задають у вигляді усереднених значень для кожного типу ЗВТ.

Таким чином, технічний ресурс зв'язаний з безвідмовним функціонуванням ЗВТ у ввімкненому стані, а термін служби – з календарним часом функціонування ЗВТ до переходу в граничний стан, коли використовувати засіб економічно недоцільно. Показники ресурсу дозволяють планувати термін ремонту ЗВТ, показники терміну служби – тривалість експлуатації ЗВТ до списання. В окремих випадках показники терміну служби і ресурсу ЗВТ можуть збігатися.

Під гамма-відсотковим ресурсом ЗВТ розуміють сумарний наробіток ЗВТ, протягом якого він не досягне граничного стану із заданою ймовірністю, вираженою у відсотках. Наприклад, ресурс 3000 годин при $\gamma = 95 \%$ означає, що після 3000 годин наробітку працездатними повинні залишитися 95 % ЗВТ, а 5 % цих ЗВТ можуть відмовити.

Гамма-відсотковим терміном служби ЗВТ називають календарну тривалість експлуатації ЗВТ, протягом якої він не досягне граничного стану із заданою ймовірністю γ , вираженою у відсотках.

Ремонтопридатністю ЗВТ називають його властивість бути пристосованим до підтримання та відновлення працездатного стану, в якому він здатний виконувати потрібні функції за допомогою технічного обслуговування і ремонту.

Як показники ремонтпридатності ЗВТ використовують середню тривалість відновлення та гамма-відсоткову тривалість відновлення.

Середня тривалість відновлення ЗВТ – це математичне сподівання часу відновлення працездатного стану ЗВТ після відмови з урахуванням часу пошуку місця відмови.

Гамма-відсотковою тривалістю відновлення ЗВТ називають інтервал часу, протягом якого відновлення працездатного стану ЗВТ здійснюється із заданою ймовірністю γ , вираженою у відсотках.

Збережуваність ЗВТ – це його властивість зберігати в заданих межах значення параметрів, що характеризують здатність виконувати потрібні функції під час і після зберігання та (чи) транспортування. Як показники збережуваності ЗВТ використовують середній термін збережуваності та гамма-відсотковий термін збережуваності.

Середній термін збережуваності ЗВТ – це математичне сподівання його терміну збережуваності.

Під гамма-відсотковим терміном збережуваності розуміють термін збережуваності, що його досягає ЗВТ із заданою ймовірністю γ , вираженою у відсотках.

На шкалу ЗВТ наносять ряд знаків, які важливі при експлуатації. Зокрема, до таких знаків належить умовний знак нормального положення ЗВТ при вимірюваннях (вертикальне, горизонтальне, під певним кутом), умовний знак наявності високої напруги та ін. Наведемо зміст знаку ! : “УВАГА! Дивись додаткові вказівки або у паспорті, або в інструкції з експлуатації”.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Дайте визначення та сформулюйте мету і задачі нормування метрологічних характеристик ЗВТ.
2. На які групи розділяється комплекс НМХ ЗВТ? Перелічіть метрологічні характеристики, які входять до складу кожної з груп.
3. Дайте визначення і поясніть метрологічні характеристики ЗВТ, призначені для визначення результату вимірювань.
4. Що таке похибка ЗВТ? Поясніть фізичну суть похибки для різних видів ЗВТ.
5. Наведіть класифікацію похибок ЗВТ.
6. Дайте визначення систематичної і випадкової похибок ЗВТ, охарактеризуйте їх.
7. Дайте визначення основної і додаткової похибок ЗВТ, охарактеризуйте їх.
8. Як розраховується сумарне значення додаткових похибок ЗВТ? Назвіть шляхи їх зменшення.

ЛЕКЦІЯ № 5

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ.

1. Загальна характеристика методів підвищення точності засобів вимірювальної техніки

У процесі розробки та модернізації ЗВТ найважливішим завданням є підвищення їх точності як найбільш важливого показника якості вимірювань. Воно досягається зменшенням всіх складових похибки ЗВТ, причинами яких є внутрішні впливні величини та зовнішні впливні величини, до яких належать умови вимірювань (або умови експлуатації ЗВТ) і неінформативні параметри вхідних (вимірюваних) сигналів.

Відомо багато методів підвищення точності ЗВТ, які розділяють на дві групи:

- методи, що забезпечують усунення або зведення до мінімуму причин виникнення окремих складових похибки ЗВТ. Ці методи називають також *консервативними*;

- методи, які направлені на зниження рівня похибок ЗВТ. Їх називають також *методами корекції похибок*.

Консервативні методи запобігають появі тих чи інших похибок ЗВТ або не припускають перевищення ними допустимих значень. Вони відрізняються простотою реалізації, оскільки не потребують суттєвого структурного ускладнення ЗВТ.

До консервативних методів належать конструктивно-технологічні та захисно-запобіжні методи.

Конструктивно-технологічні методи підвищення точності ЗВТ полягають у використанні при їх побудові матеріалів, деталей та елементів з більш високими якісними показниками, зокрема з високостабільними параметрами, та у забезпеченні більш високої якості збирання та регулювання на етапі виробництва ЗВТ. Прикладами таких методів є використання високостабільних за температурою резисторів для зменшення температурної похибки або частотно-незалежних резисторів – для зменшення частотної похибки, використання котушок індуктивності з високою добротністю та конденсаторів з малим кутом втрат у функціональних електрорадіотехнічних вузлах ЗВТ, більш якісних мікросхем тощо.

Захисно-запобіжні методи підвищення точності ЗВТ направлені на зменшення похибок від зовнішніх впливних величин за рахунок зменшення діапазону їх змінювання у внутрішньому просторі ЗВТ, де розташовані їх частини, елементи та функціональні вузли, найбільш чутливі до впливу цих величин. Прикладами таких методів є використання термостатування – для зменшення температурних похибок, екранування – для зменшення похибок від впливу зовнішніх електромагнітних полів, амортизації – для зменшення впливу вібрацій тощо. Як різновид захисно-запобіжних методів підвищення точності ЗВТ можна розглядати використання в ЗВТ фізичних ефектів, які мають низьку чутливість до тих чи інших впливних величин.

Відомо багато методів корекції похибок ЗВТ, але найбільш поширеними є структурні, статистичні й алгоритмічні методи.

Структурні методи підвищення точності ЗВТ ґрунтуються на використанні принципу інваріантності (нечутливості), згідно з яким ЗВТ виконуються так, щоб зменшити їх чутливість до певної впливної величини або їх сукупності, що призводять до тих чи інших похибок ЗВТ.

Сутність структурних методів полягає в такому виконанні структурних схем ЗВТ, яке забезпечує зменшення впливу похибок окремих елементів на вихідний сигнал введенням коригувальних електричних кіл ланцюгів, наприклад, кіл від'ємного зворотного зв'язку, додаткових вимірювальних каналів і мікропроцесорів для визначення та введення поправок у результати вимірювань, примусовим змінюванням структури, параметрів і зв'язків у часі тощо.

Структурні методи підвищення точності ЗВТ класифікують за різними ознаками. Розглянемо основні з них.

1. За впливом оператора на корекцію похибок ЗВТ розрізняють два її види:

- корекція похибок ЗВТ за впливом оператора;
- корекція похибок ЗВТ без впливу оператора (автоматична корекція).

2. За видом корекції похибок ЗВТ залежно від числа вимірювальних каналів або від числа тактів чи сигналів розрізняють два види корекції похибок:

- просторова корекція похибок, що досягається апаратною надлишковістю;

– часова корекція похибок, що досягається часовою надлишковістю.

3. За способом уведення коригувальних впливів у вимірювальні канали ЗВТ розрізняють три види корекції похибок:

- адитивна корекція похибок;
- мультиплікативна корекція похибок;
- комбінована корекція похибок, яка представляє одночасне використання адитивної та мультиплікативної видів корекції.

Алгоритмічні методи підвищення точності ЗВТ ґрунтуються на використанні таких алгоритмів обробки декількох результатів вимірювань, які дозволяють зменшити похибку вимірювань.

На цей час найбільш розвинутими та розповсюдженими є структурні методи підвищення точності ЗВТ.

2. Принцип інваріантності у вимірювальній техніці

Під інваріантністю у вимірювальній техніці розуміють компенсацію впливних величин ЗВТ, тобто досягнення повної або часткової незалежності результатів вимірювань від цих величин (дестабілізуючих факторів).

Для відносної похибки ЗВТ можна визначити два способи зменшення їх похибок:

- зменшення впливу величин $\bar{\xi}$, $\bar{\eta}$, $\bar{v}$, $\bar{\eta}$;
- зменшення коефіцієнтів впливу ψ_i .

Обидва ці способи реалізують принцип інваріантності ЗВТ до впливних величин, що призводять до тих чи інших похибок. Для того щоб ЗВТ з постійною структурою були інваріантними (або нечутливими) до впливних величин $\bar{\xi}$, $\bar{\eta}$, $\bar{v}$ і $\bar{\eta}$ необхідно:

- або передбачити створення компенсаційних сигналів, протилежних за знаком сигналам похибок (або завад);
- або здійснити виділення та виключення похибок з результатів вимірювань шляхом відповідної обробки.

Вибір тієї чи іншої структурної схеми ЗВТ визначається характером змінювання вимірюваної величини, потрібною точністю вимірювання, простотою схеми та рядом інших факторів. Тому принцип інваріантності та умови, що з нього витікають, самі по собі ще не дають можливості здійснювати синтез інваріантного ЗВТ, а допомагають відібрати ті схеми, які забезпечують досягнення інваріантності.

Спочатку отримаємо узагальнену математичну модель статичної похибки вимірювальних перетворювачів, а з неї виділимо основну та додаткову похибки.

Для цього скористаємося поняттями розрахункової номінальної та номінальної функції перетворення (ФП) вимірювальних перетворювачів, аналогічними відповідним поняттям ГХ ЗВТ. При експлуатації вимірювальних перетворювачів, у тому числі в складі ЗВТ, має місце не номінальна ФП, а реальна ФП, яка відрізняється від номінальної ФП із-за впливу на вимірювальні перетворювачі множини впливних величин, або дестабілізуючих факторів. Запишемо реальну ФП довільного вимірювального перетворювача в узагальненому вигляді:

$$Y = f[X, \bar{q}, \bar{v}, \bar{\xi}, \bar{q}(\bar{\eta})], \quad (2.1)$$

де $\bar{q}$ – вектор (множина) параметрів вимірювального перетворювача;

$\bar{v}$ – вектор внутрішніх впливних величин вимірювального перетворювача;

$\bar{\xi}$ – вектор зовнішніх впливних величин вимірювального перетворювача;

$\bar{q}(\bar{\eta})$ – залежність вектора параметрів $\bar{q}$ вимірювального перетворювача від вектора його внутрішніх впливних величин $\bar{\eta}$.

Для наочності покажемо всі величини, що входять до ФП (2.1) вимірювального перетворювача, на рис. 2.1, де прямокутником позначено вимірювальний перетворювач.

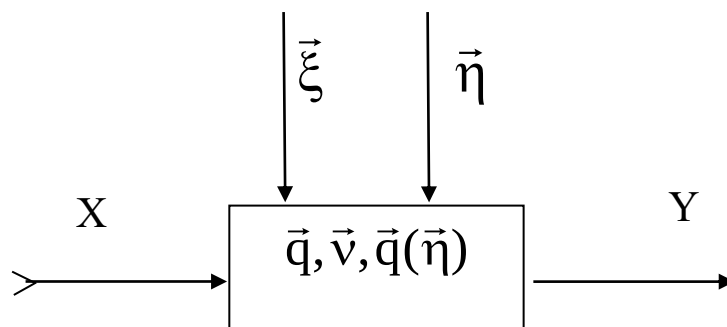


Рисунок 2.1 - До пояснення функції перетворення вимірювального перетворювача

Всі векторні величини (або фактори) $\vec{q}, \vec{v}, \vec{\xi}, \vec{q}(\vec{\eta})$ призводять до відповідних похибок вимірювальних перетворювачів ЗВТ.

3. Корекція похибок засобів вимірювальної техніки за впливом оператора

Ця корекція може здійснюватися з ручним впливом і без впливу оператора на ЗВТ.

3.1. Корекція похибок засобів вимірювальної техніки з ручним впливом оператора

Ручна корекція похибок ЗВТ поділяється на адитивну та мультиплікативну.

Адитивна корекція (або установка нуля) направлена на виключення адитивної похибки ЗВТ. Вона здійснюється регулюванням „Установка 0”, яким градуовальна характеристика ЗВТ зміщується паралельно самій собі. У стрілочних вимірювальних приладах таке регулювання виконується оператором зміщенням вказівника приладу на нульову відмітку при нульовому значенні вимірюваної величини ($X=0$).

Мультиплікативна корекція (або калібровка) направлена на виключення мультиплікативної ЗВТ. Вона здійснюється змінюванням його чутливості, тобто змінюванням крутості (кута нахилу) градуовальної характеристики ЗВТ, яка виконується ручним регулюванням „Калібровка”. При цьому в схемах корекції мультиплікативної похибки ЗВТ можуть використовуватися робочі еталони та зразкові зворотні перетворювачі з різницеvim пристроєм. Найбільш поширеними є схеми корекції з мірою (рис. 3.1), яка може бути внутрішньою або зовнішньою.

За наявності мультиплікативної похибки в режимі вимірювання величини X (стан І перемикача S) сигнал вимірювальної інформації α на виході вимірювального каналу ЗВТ

$$\alpha = kX, \quad (3.1)$$

де k – реальне значення коефіцієнту передачі або перетворення ЗВТ, який дорівнює

$$k = k_H + \Delta k = k_H + k_H \delta_M, \quad (3.2)$$

де k_H – номінальне значення коефіцієнту передачі ЗВТ;

$\Delta k = k_H \delta_M$ – абсолютний приріст коефіцієнту передачі ЗВТ, обумовлений відносною мультиплікативною похибкою δ_M .

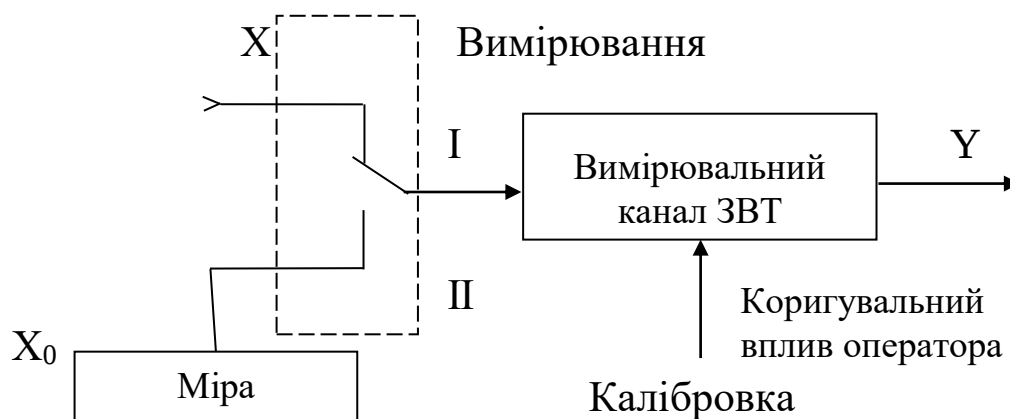


Рисунок 3.1 - Структурна схема калібрівки ЗВТ за допомогою міри

З урахуванням рівності (3.2) формула (3.1.) приймає вигляд

$$Y = k_H X + k_H \delta_M X. \quad (3.3)$$

У режимі калібрівки (стан II перемикача S) на вхід вимірювального каналу ЗВТ подається строго задане значення фізичної величини X_0 тієї самої природи, що й вимірювана величина X. У цьому випадку з урахуванням рівності (3.2)

$$Y_0 = kX_0 = k_H X_0 + k_H \delta_M X_0 = Y_H + \Delta Y_M,$$

де $Y_i = k_i \tilde{O}_0$ – номінальне значення сигналу вимірювальної інформації α , на виході ЗВТ, що відповідає заданому значенню X_0 зразкової величини міри;

$\Delta Y_M = k_H \delta_M X_0$ – абсолютна мультиплікативна похибка ЗВТ.

У процесі калібровки оператор ручним коригувальним впливом змінює коефіцієнт передачі (перетворення) ЗВТ доти, доки реальне значення α сигналу вимірювальної інформації буде дорівнювати його номінальному значенню Y_H , що відповідає умові $\Delta Y_M = 0$, тобто відсутності мультиплікативної похибки ЗВТ. При цьому коефіцієнт передачі ЗВТ буде номінальним: $k_H = Y_H / X_0$.

Мультиплікативну корекцію або калібровку ЗВТ за допомогою робочого еталона (рис.3.2) рекомендується проводити при значенні заданої входної величини X , близькому до номінального значення X_H для даного ЗВТ.

Під час калібровки оператор ручним коригувальним впливом змінює коефіцієнт передачі (перетворення) ЗВТ доти, доки значення сигналів вимірювальної інформації Y та Y_0 відповідно не співпадуть, тобто до виконання умови $Y = Y_0$.

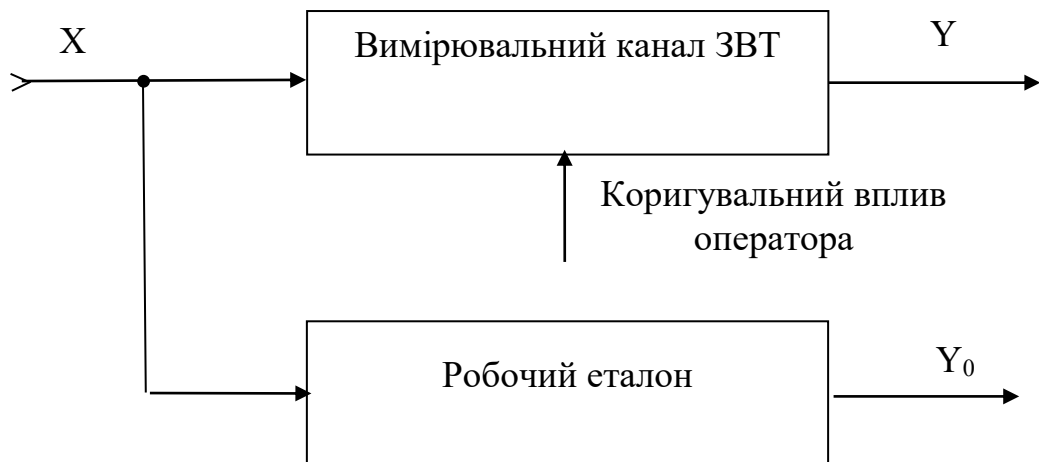


Рисунок 3.2 - Структурна схема калібровки ЗВТ за допомогою робочого еталона

Схема калібровки вимірювального перетворювача (або ЗВТ) зі зразковим зворотним перетворювачем і різницевим пристроєм наведена на рис. 3.3. У процесі калібровки оператор ручним коригувальним впливом змінює коефіцієнт перетворення вимірювального перетворювача до виконання умови

$$\Delta X = X - X_{33} = 0,$$

де $X_{зз}$ – величина на виході зразкового зворотного вимірювального перетворювача.

При цьому

$$X = X_{зз} = \frac{Y}{k_H} = \frac{kX}{k_H},$$

тобто $k = k_H$.

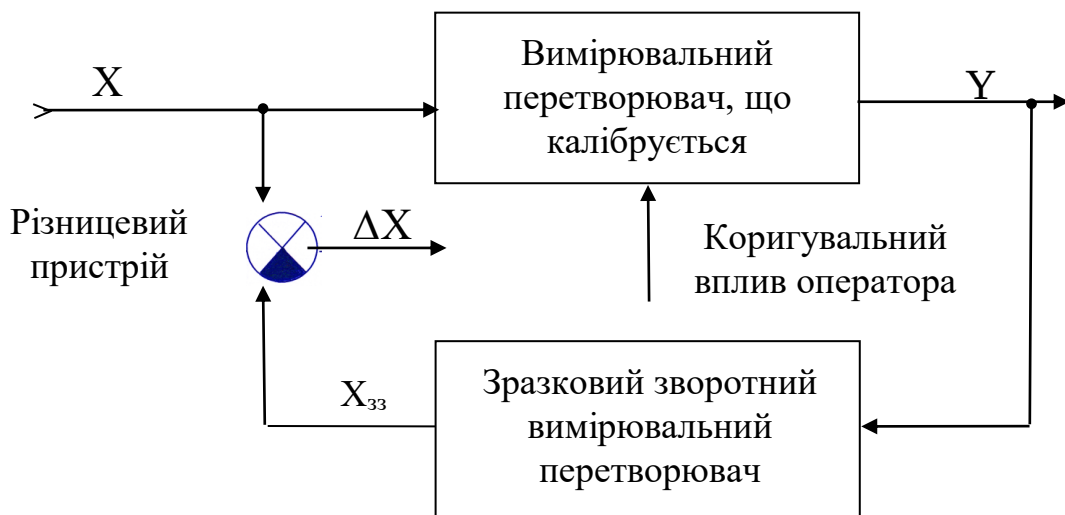


Рисунок 3.3 - Структурна схема калібровки вимірювальних перетворювачів зі зразковим зворотним перетворювачем

3.2. Корекція похибок засобів вимірювальної техніки без впливу оператора

Корекція похибок ЗВТ без впливу на нього оператора здійснюється або введенням оператором поправки в результат вимірювання, або обробкою оператором декількох результатів показів ЗВТ.

Корекція похибки результату вимірювання введенням поправки оператором дозволяє виключити систематичну складову додаткової похибки і може бути використана тільки в тому випадку, коли відома залежність між додатковою похибкою та впливною величиною, що призводить до цієї похибки. Тоді за цією залежністю оператором обраховується додаткова похибка, наприклад, від впливу температури ΔX_t і в не виправлений результат вимірювання величини

$\tilde{X}$ уводиться поправка Π_t на температурну похибку ΔX_t ($\Pi_t = -\Delta X_t$).
Отримуємо уточнений результат вимірювання

$$X = \tilde{X} + \Pi_t.$$

Корекція похибки результату вимірювання обробкою оператором декількох показів ЗВТ використовується для виключення як адитивної, так і мультиплікативної похибок.

Якщо ЗВТ має адитивну систематичну похибку $\Delta_{ад}$, то при вимірюванні величини X його невиправлений показ буде дорівнювати

$$\tilde{Y} = kX + \Delta_{ад}. \quad (3.4)$$

Для виключення адитивної похибки $\Delta_{ад}$ необхідно провести одне додаткове вимірювання при $X=0$, при якому отримаємо показ приладу $Y_{ад} = \Delta_{ад}$. Візьмемо різницю двох показів ЗВТ (або фактично введемо в результат вимірювання $\tilde{Y}$ поправку $\Pi_{ад} = -\Delta_{ад}$, маємо

$$Y = \tilde{Y} - Y_{ад} = kX,$$

тобто отримуємо уточнений (або виправлений) результат вимірювання, який не містить адитивної систематичної похибки.

Для ЗВТ з відносною мультиплікативною похибкою δ_m для її виключення проводиться два вимірювання: вимірюваної величини X і зразкової величини X_0 , заданої нерегульованою мірою. Отримують два покази ЗВТ, які згідно з формулою (3.3) дорівнюють:

$$\tilde{Y}_x = k(1 + \delta_m)X,$$

$$\tilde{Y}_{x_0} = k(1 + \delta_m)X_0.$$

Вимірювану величину X знаходять із співвідношення

$$X = \frac{\tilde{Y}_x}{\tilde{Y}_{x_0}} \cdot X_0. \quad (3.5)$$

Якщо ЗВТ має адитивну та мультиплікативну складові, то для їх виключення проводиться два додаткових вимірювання: при $X_1 = 0$ і при $X_2 = X_0$, а потім виконуються обчислення за формулами (3.4) і (3.5.).

Адитивна та мультиплікативна систематичні складові похибки ЗВТ можуть бути одночасно виключені при використанні методу заміщення, коли проводиться два цикли вимірювань. У першому циклі на вхід ЗВТ подається вимірювана величина X і його невідправлений показ буде

$$\tilde{Y} = k(1 + \delta_m)X + \Delta_{ад}. \quad (3.6)$$

У другому циклі вимірювань на вхід ЗВТ подається зразкова величина X_0 з регульованої міри, якою установлюють той самий показ ЗВТ. Якщо систематичні адитивна та мультиплікативна складові похибки ЗВТ є постійними, то цей показ (невідправлений результат вимірювань) дорівнює

$$\tilde{Y} = k(1 + \delta_m)X_0 + \Delta_{ад}. \quad (3.7)$$

Із порівняння співвідношень (3.6) і (3.7) маємо $X = X_0$. Отже, результат вимірювань не залежить від адитивної та мультиплікативної постійних систематичних складових похибки.

Метод заміщення може також використовуватися для корекції низькочастотних (повільно змінюваних) випадкових адитивних і мультиплікативних складових похибки ЗВТ.

Якщо градувальна характеристика ЗВТ є нелінійною, то для корекції адитивної та мультиплікативної похибок необхідно здійснити щонайменше три вимірювання у вузькому інтервалі, що охоплює вимірюване значення X . Вважаючи цей інтервал градувальної характеристики лінійним з тангенсом кута нахилу α , для трьох вимірювань маємо систему рівнянь для невідправлених результатів вимірювань:

$$\begin{cases} \tilde{Y}_1 = \tilde{Y}_1(X) = kX + \Delta_{\text{ад}}; \\ \tilde{Y}_2 = \tilde{Y}_2(X + \Delta X_0) = k(X + \Delta X_0) + \Delta_{\text{ад}}; \\ \tilde{Y}_3 = \tilde{Y}_3(\mu X) = k\mu X + \Delta_{\text{ад}}, \end{cases} \quad (3.8)$$

де ΔX_0 – заданий приріст вимірюваної величини X ;

μ – масштабний коефіцієнт, близький до 1;

$\Delta_{\text{ад}}$ – адитивна похибка вимірювань.

Розв’язуючи систему рівнянь (3.8) відносно вимірюваної величини X , маємо

$$X = \frac{\Delta X_0(\tilde{Y}_3 - \tilde{Y}_1)}{(\mu - 1)(\tilde{Y}_2 - \tilde{Y}_1)}, \quad (3.9)$$

звідки видно, що результат вимірювань X не містить адитивної похибки $\Delta_{\text{ад}}$ і коефіцієнта передачі k , змінювання якого пов’язане з мультиплікативною похибкою.

Ручна корекція похибок ЗВТ призводить до збільшення часу вимірювань, тому її у сучасних ЗВТ, особливо цифрових, автоматизують.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Дайте загальну характеристику методів підвищення точності ЗВТ.
2. В чому полягає принцип інваріантності у вимірювальній техніці?
3. Поясніть сутність корекції похибок ЗВТ з ручним впливом оператора та без впливу оператора.

ЛЕКЦІЯ № 6

МЕТОДИ АВТОМАТИЧНОЇ КОРЕКЦІЇ ПОХИБОК ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ.

1. Структурні методи автоматичної корекції похибок засобів вимірювальної техніки

Вибір тієї чи іншої структурної схеми інваріантних ЗВТ з автоматичною корекцією похибок визначається видом вимірюваної величини, потрібною точністю вимірювань, простотою апаратної реалізації та іншими факторами. Залежно від наявності зв'язку виходу з входом ЗВТ їх структурні схеми можуть бути розімкнутими та замкнутими (з від'ємним зворотним зв'язком).

Коригувальний вплив при реалізації структурної корекції похибок ЗВТ може утворюватися або за допомогою додаткового вимірювального каналу (просторове розділення), або додаткового циклу вимірювання (часове розділення).

Як при просторовому, так і при часовому розділенні каналів коригувальний вплив може вводитися в основний вимірювальний канал адитивно, мультиплікативно та комбіновано. Розглянемо типові структурні схеми інваріантних ЗВТ з просторовим і часовим розділенням вимірювальних каналів.

1.1. Розімкнуті структурні схеми інваріантних засобів вимірювальної техніки

Два варіанти узагальнених розімкнутих структурних схем інваріантних ЗВТ з просторовим розділенням каналів наведені на рис. 1.1. Вони мають однаковий склад функціональних блоків – по два вимірювальних канали (ВК1 і ВК2) і обчислювач (О), але відрізняються алгоритмом обробки вихідних величин вимірювальних каналів $\tilde{Y}_1$ і $\tilde{Y}_2$, які є невиправленими результатами вимірювань.

У схемі (рис. 1.1, а) вимірювана величини X подається на обидва канали (ВК1 і ВК2), а в схемі (рис.1.1, б) – на один канал (ВК1). Впливна величина ξ згідно з принципом інваріантності в обох схемах поступає на обидва вимірювальні канали. Вихідні величини $\tilde{Y}_1$ і $\tilde{Y}_2$ ВК1 і ВК2 відповідно подаються в обчислювач О, де

виключають залежність вихідної величини обчислювача $Y(X)$ від впливної величини ξ .

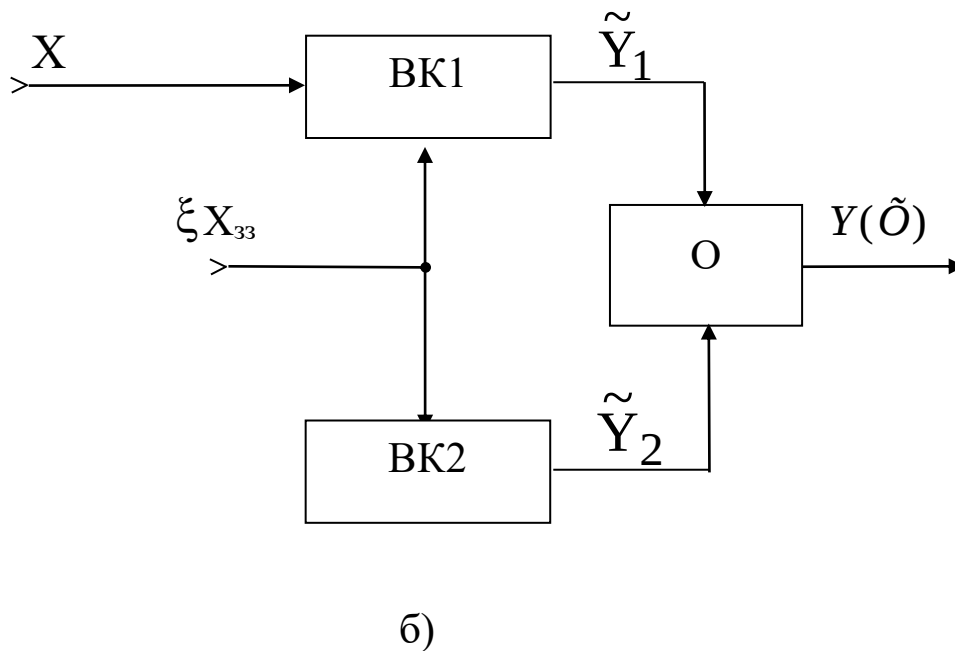
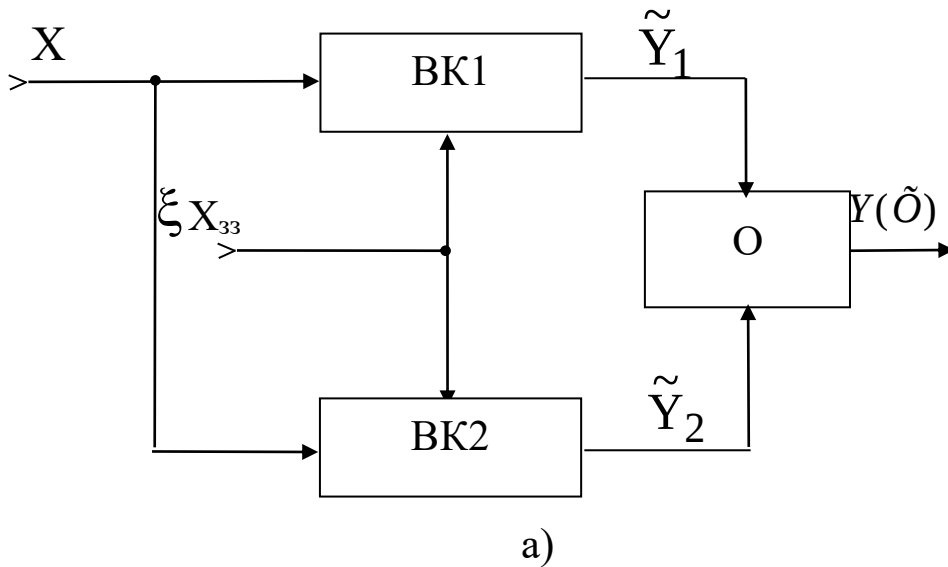


Рисунок 1.1 - Розімкнуті структурні схеми інваріантних ЗВТ з просторовим розділенням каналів, в яких вимірювана величина X подається: а – на обидва вимірювальні канали (BK1 і BK2); б – на один вимірювальний канал (BK1)

Запишемо функції перетворення вимірювальної інформації в обох схемах ЗВТ.

Для ЗВТ зі структурною схемою (рис. 1.1, а) маємо:

– для величини $\tilde{Y}_1$ на виході BK1:

$$\tilde{Y}_1 = f_1(X, \xi);$$

– для величини $\tilde{Y}_2$ на виході ВК2:

$$\tilde{Y}_2 = f_2(X, \xi);$$

– для величини Y на виході обчислювача:

$$Y = f(\tilde{Y}_1, \tilde{Y}_2) = Y(X).$$

Аналогічно для ЗВТ зі структурною схемою (рис. 1.1, б) запишемо:

$$\tilde{Y}_1 = f_1(X, \xi); \quad \tilde{Y}_2 = f_2(\xi); \quad Y = f(\tilde{Y}_1, \tilde{Y}_2) = Y(X).$$

Якщо впливних величин декілька $(\xi_1, \xi_2, \dots)$, то число вимірювальних каналів інваріантного ЗВТ залежить від вимірюваної величини X , числа впливних величин і зв'язків між каналами. Структурні схеми таких ЗВТ можуть будуватися аналогічно схемам на рис. 1.1, а також як комбінація цих схем.

Розімкнута схема інваріантного ЗВТ з часовим розділенням каналів, або циклічним у часі введенням вимірювальної інформації в обчислювач, наведена на рис. 1.2.

У цій схемі виділено третій вимірювальний канал ВК3, який об'єднує загальні елементи схеми ЗВТ, і введено перемикач S . Вимірювання виконується за два цикли: перший цикл – перемикач S у стані I, другий цикл – перемикач S у стані II. Алгоритм обробки вимірювальної інформації в обчислювачі є аналогічним алгоритму для схеми (рис. 1.1, б).

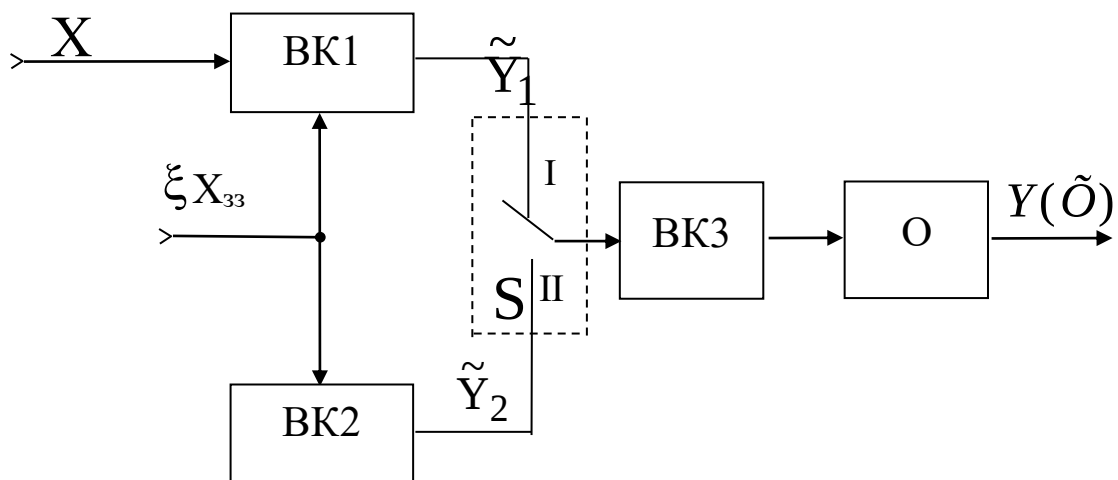


Рисунок 1.2 - Розімкнута структурна схема ЗВТ з часовим розділенням каналів

Виділення вимірювального каналу ВК3 дозволяє зменшити, по-перше, похибку від не ідентичності вимірювальних каналів ВК1 і ВК2, і, по-друге, число елементів у схемі ЗВТ.

Якщо впливна величина ξ має тільки адитивний характер або тільки мультиплікативний характер, то залишається справедливою структурна схема ЗВТ на рис. 1.1а, але в ній конкретизується обчислювач О. Так, для виключення адитивного впливу ξ (адитивна корекція) як обчислювач використовується різницевий пристрій (РП) (рис. 1.3).

Для статичного режиму вимірювань згідно з формулою $\alpha = kX$ запишемо співвідношення для вихідних величин $\tilde{Y}_1$ і $\tilde{Y}_2$ вимірювальних каналів ВК1 і ВК2:

$$\tilde{Y}_1 = k_1 X + k_{1\xi} \xi = k_1 X + \Delta_{1ад}; \quad (1.1)$$

$$\tilde{Y}_2 = k_{2\xi} \xi = \Delta_{2ад}, \quad (1.2)$$

де k_1 , $k_{1\xi}$ – відповідно коефіцієнти передачі вимірювального каналу ВК1 для вимірюваної величини X і впливної величини ξ ;

$\Delta_{1ад} = k_{1\xi} \xi$; $\Delta_{2ад} = k_{2\xi} \xi$ – адитивні похибки, обумовлені впливною величиною ξ , вимірювальних каналів ВК1 і ВК2 відповідно.

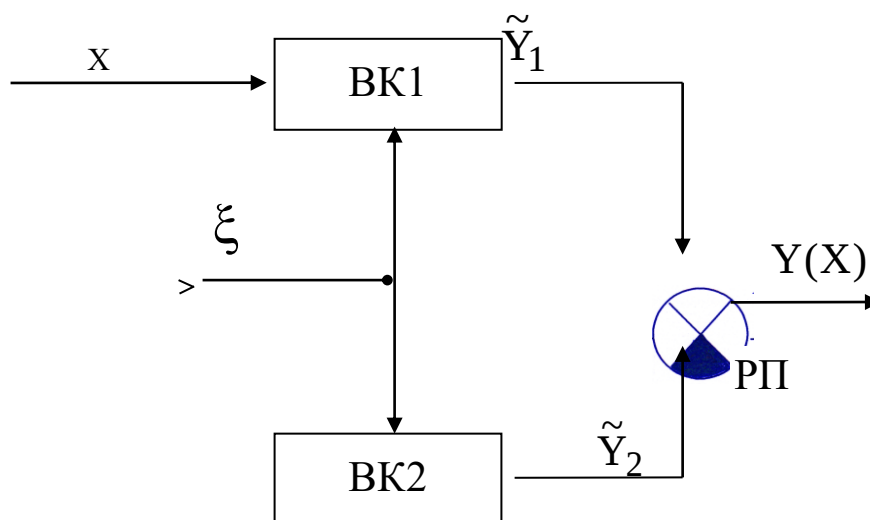


Рисунок 1.3 - Розімкнута структурна схема ЗВТ з просторовим розділенням каналів й адитивною корекцією

Як видно з рівностей (1.1) і (1.2), ЗВТ буде інваріантним до впливної величини ξ при умові $\Delta_{1ад} = \Delta_{2ад}$, або $k_{1\xi} = k_{2\xi}$, що відповідає вихідній величині різницевого пристрою РП

$$Y(X) = \tilde{Y}_1 - \tilde{Y}_2 = k_1 X + \Delta_{1ад} - \Delta_{2ад} = kX,$$

яка дійсно не залежить від впливної величини ξ .

Для виключення мультиплікативного впливу ξ (мультиплікативна корекція) як обчислювач може використовуватися або множильний пристрій (МП), або дільний пристрій (ДП) (рис. 1.4). В обох схемах вимірювана величина X поступає на вимірювальний канал ВК1, а на вимірювальний канал ВК2 подається зразкова величина X_0 . Її називають калібрувальною величиною, а операцію – калібруванням (корекцією) мультиплікативної похибки ЗВТ.

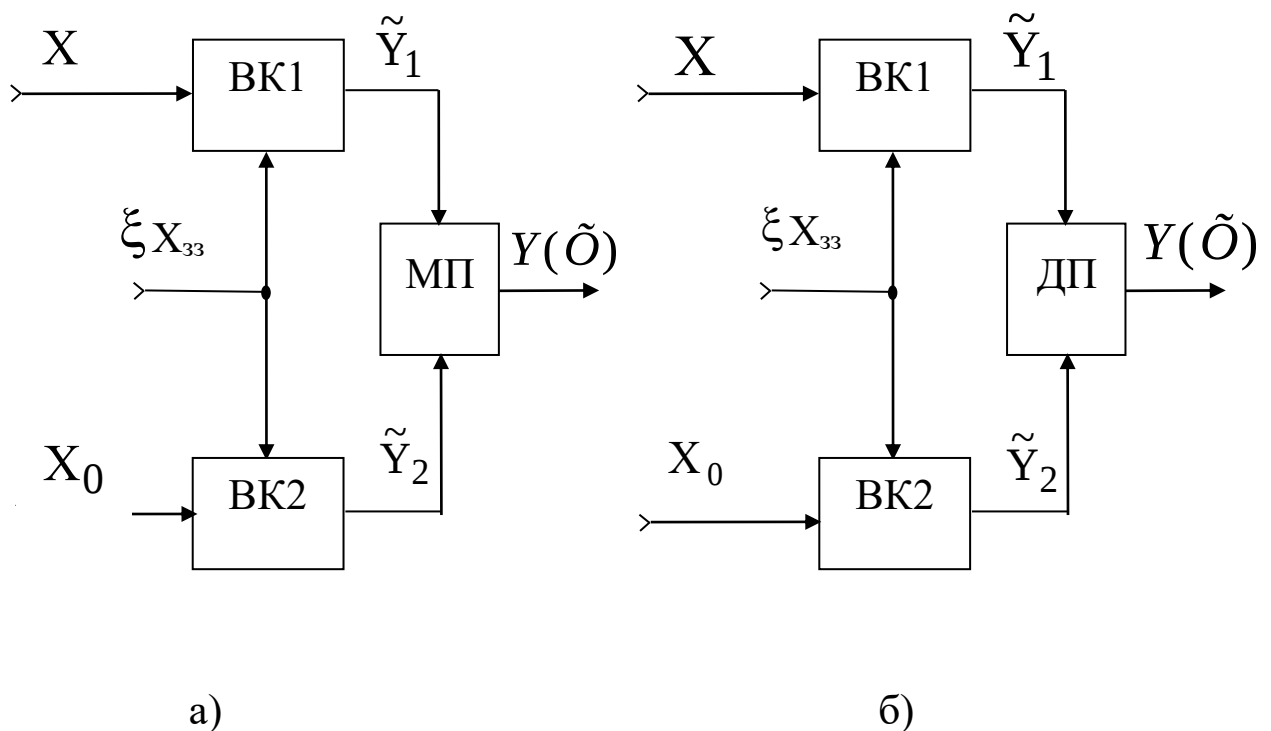


Рисунок 1.4 - Розімкнуті структурні схеми ЗВТ з просторовим розділенням каналів і мультиплікативною корекцією: а – з множильним пристроєм; б – з дільним пристроєм

Схема ЗВТ з множильним пристроєм МП (рис. 1.4а) виконується так, що впливна величина ξ на вході ВК2 інвертується. Тоді для вихідних величин $\tilde{Y}_1$ і $\tilde{Y}_2$ вимірювальних каналів ВК1 і ВК2 згідно з формулою (3.3) маємо:

$$\tilde{Y}_1 = k_1 X(1 + k_{1\xi} \xi) = k_1 X(1 + \delta_{1m});$$

$$\tilde{Y}_2 = k_2 X_0(1 - k_{2\xi} \xi) = k_2 X_0(1 - \delta_{2m}),$$

де k_1, k_2 – номінальні коефіцієнти передачі вимірювальних каналів ВК1 і ВК2 по вимірюваній величині X ;

$k_{1\xi}, k_{2\xi}$ – коефіцієнти передачі вимірювальних каналів ВК1 і ВК2 по впливній величині ξ ;

$\delta_{1m} = k_{1\xi} \xi, \delta_{2m} = k_{2\xi} \xi$ – відносні мультиплікативні похибки вимірювальних каналів ВК1 и ВК2 відповідно.

Вихідна величина $Y(X)$ на виході множильного пристрою дорівнює

$$Y(\tilde{O}) = \tilde{Y}_1 \tilde{Y}_2 = k_1 k_2 X_0 X(1 + \delta_{1i})(1 - \delta_{2i}),$$

або, нехтуючи величиною другого порядку малості $\delta_{1m} \delta_{2m}$, дістаємо

$$Y(X) = k_1 k_2 X_0 X(1 + \delta_{1m} - \delta_{2m}).$$

За умови рівності відносних мультиплікативних похибок $\delta_{1m} = \delta_{2m}$, або коефіцієнтів передачі впливної величини $k_{1\xi} = k_{2\xi}$, цей вираз приймає вигляд

$$Y(X) = k_1 k_2 X_0 X = kX, \quad (1.3)$$

де $k = k_1 k_2 X_0$ – коефіцієнт передачі ЗВТ з множильним пристроєм.

Як видно з формули (1.3), вихідна величина $Y(X)$ ЗВТ з множильним пристроєм не залежить від мультиплікативної впливної величини ξ .

Схема ЗВТ з ділильним пристроєм (рис. 1.4б) виконується так, що впливна величина ξ проходить через вимірювані канали ВК1 і ВК2 з однаковим знаком, і для вихідних сигналів $\tilde{Y}_1$ і $\tilde{Y}_2$ цих каналів запишемо:

$$\tilde{Y}_1 = k_1 X(1 + \delta_{1m});$$

$$\tilde{Y}_2 = k_2 X_0 (1 + \delta_{2M}).$$

Тоді вихідна величина $Y(X)$ на виході ділильного пристрою ДП (і ЗВТ) за умови $\delta_{1M} = \delta_{2M}$:

$$Y(X) = \frac{\tilde{Y}_1}{\tilde{Y}_2} = \frac{k_1 X (1 + \delta_{1M})}{k_2 X_0 (1 + \delta_{2M})} = \frac{k_1}{k_2 X_0} X = kX, \quad (1.4)$$

де $k = \frac{k_1}{k_2 X_0}$ – коефіцієнт передачі ЗВТ з ділильним пристроєм.

Отже, згідно з формулою (1.4) результат вимірювання $Y(X)$ ЗВТ з ділильним пристроєм не залежить від мультиплікативної величини ξ .

У тих випадках, коли впливна величина призводить до похибки ЗВТ, що містить адитивну та мультиплікативну складові, необхідно використовувати комбінацію двох попередніх схем.

1.2. Замкнуті структурні схеми інваріантних засобів вимірювальної техніки

Такі ЗВТ ґрунтуються на створенні впливу, пропорційного похибці вимірювань і направленою на її зменшення. Це забезпечується зворотним зв'язком з виходу на вхід ЗВТ і створенням різницевої величини між його вихідною та вхідною величинами.

Замкнуті структурні схеми інваріантних ЗВТ також поділяють на ЗВТ з просторовим і часовим розділенням каналів.

Розглянемо два варіанти замкнутих структурних схем інваріантних ЗВТ або ЗВТ зрівноважування: з алгебраїчним суматором C_M (рис. 1.5а) на його вході та з алгебраїчним суматором C_M на виході (рис. 1.5б).

Обидві схеми мають коло від'ємного зворотного зв'язку (КВЗЗ) з коефіцієнтом передачі β .

Вихідна величина Y у схемі ЗВТ з алгебраїчним суматором C_M на вході (рис. 1.5а) визначається за формулою

$$Y = \frac{k_1 X + (k_{1\xi} - k_1 k_2) \xi}{1 + \beta k_1}, \quad (1.5)$$

де $k_{1\xi}$ – коефіцієнт перетворення прямого ланцюга по впливній величині ξ .

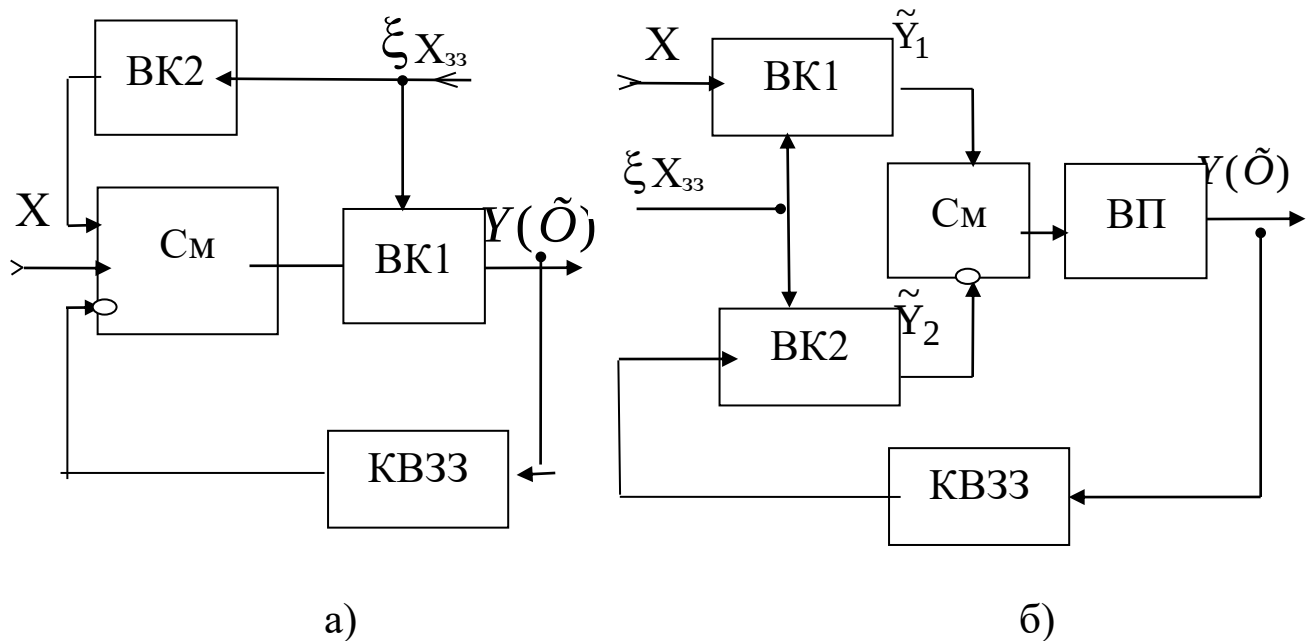


Рисунок 1.5 - Замкнуті структурні схеми ЗВТ з просторовим розділенням каналів: а – з суматором на вході; б – з суматором на виході

Якщо коефіцієнт передачі k_2 вимірювального каналу ВК2 вибрати з умови $k_2 = k_{1\xi} / k_1$, то вираз (1.5) приймає вигляд:

$$Y = \frac{k_1 X}{1 + \beta k_1}, \quad (1.6)$$

тобто вихідна величина Y ЗВТ не залежить від впливної величини ξ , а отже, ЗВТ є інваріантним до цієї величини.

У схемі ЗВТ з алгебраїчним суматором $См$ на його виході вимірювана величина X поступає у вимірювальний канал ВК1, а впливна величина ξ – у вимірювальні канали ВК1 і ВК2 (рис. 1.5б), які є ідентичними. Різниця величин $\tilde{Y}_1 - \tilde{Y}_2$ з виходу суматора $См$ подається через вимірювальний перетворювач ВП і коло від'ємного зворотного зв'язку КВЗЗ на вхід вимірювального каналу ВК2.

За рівності коефіцієнтів передачі вимірювальних каналів ВК1 і ВК2, тобто за умови $k_1 = k_2$, вихідна величина Y буде пропорційна тільки вимірюваній величині X і не буде залежати від впливної величини ξ .

Один з варіантів схеми інваріантного ЗВТ з часовим розділенням каналів наведений на рис. 1.6. Схема містить вимірювальний канал ВК, власне ЗВТ з коефіцієнтом передачі k , вхідний вимірювальний перетворювач ВВП з коефіцієнтом перетворення k_1 , суматор $См$, обчислювач $О$ і п'ять перемикачів ($S1 - S5$). У цій схемі на суматор $См$ подаються вимірювана X і зразкова (еталонна) X_0 величини. Всі перемикачі розімкнуті.

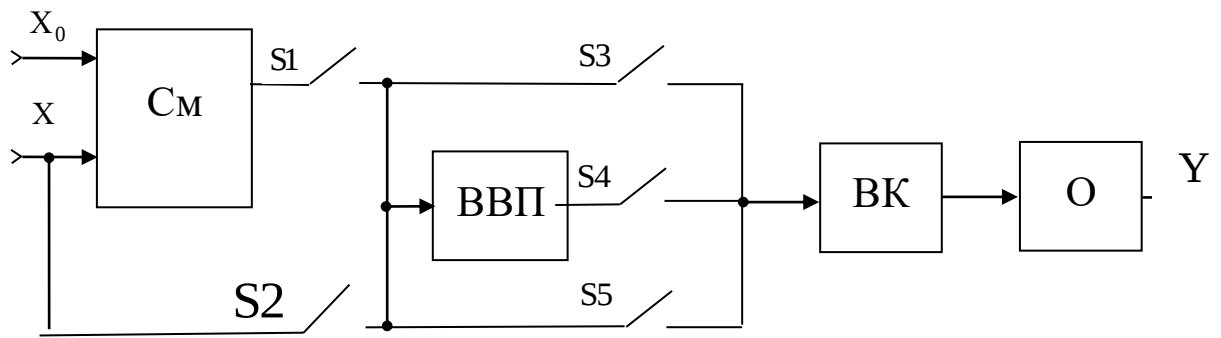


Рисунок 1.6 - Структурна схема інваріантного ЗВТ з часовим розділенням каналів

Вимірювання відбуваються за трьома послідовними тактами, в яких замикаються певні перемикачі S . В цих тактах отримують невідправлені результати вимірювань $\tilde{Y}_1, \tilde{Y}_2, \tilde{Y}_3$.

У першому такті замикаються перемикачі $S2, S5$ і вимірювана величина X безпосередньо подається на вхід вимірювального каналу ВК, а вихідна величина $\tilde{Y}_1$ вимірювального каналу ВК дорівнює:

$$\tilde{Y}_1 = bkX + \Delta_{ад}, \quad (1.7)$$

де $\Delta_{ад}$ – адитивна складова похибки ЗВТ;

b – числовий коефіцієнт, що характеризує мультиплікативну складову похибки ЗВТ.

У другому такті замикаються перемикачі $S2, S4$ (інші перемикачі розімкнуті) і вхідна величина X подається на вхід вимірювального каналу ВК через вхідний вимірювальний перетворювач ВВП, при цьому вихідна величина ВК:

$$\tilde{Y}_2 = bk_1kX + \Delta_{ад}. \quad (1.8)$$

У третьому такті замикаються перемикачі S_1 , S_3 (інші перемикачі розімкнуті) і на вхід ВК поступає величина $(X + X_0)$, а на його виході утворюється величина

$$\tilde{Y}_3 = bk(X + X_0) + \Delta_{ад}. \quad (1.9)$$

Невиправлені результати вимірювань $\tilde{Y}_1$, $\tilde{Y}_2$, $\tilde{Y}_3$ попередньо записуються в пам'ять обчислювача, а потім здійснюється обчислення виправленого результату вимірювання Y за формулою:

$$Y = \frac{\tilde{Y}_2 - \tilde{Y}_1}{\tilde{Y}_3 - \tilde{Y}_1} \cdot \frac{X_0}{k_1}.$$

Підставивши в цю формулу співвідношення (1.7), (1.8) і (1.9), дістаємо:

$$Y = X,$$

тобто результат вимірювання Y є інваріантним як до адитивної, так і до мультиплікативної складових похибки ЗВТ.

Метод корекції похибки у схемі ЗВТ (рис. 1.6) та в подібних схемах, що ґрунтуються на певних алгоритмах обробки декількох результатів вимірювань, називають алгоритмічними методами підвищення точності.

2. Статистичні методи корекції випадкових похибок засобів вимірювальної техніки

Статистичні методи корекції похибки ЗВТ призначені для зменшення випадкової складової похибки вимірювань, коли відомі статистичні характеристики похибки (оцінка інтервалу кореляції похибки, оцінка взаємної кореляційної функції похибки тощо). Методи ґрунтуються на просторовому або часовому усередненні результатів вимірювань.

Метод просторового осереднення результатів вимірювань (або метод комплектування) декількох однотипних ЗВТ, які вмикають паралельно у вимірювальний ланцюг (рис. 2.1). За результат вимірювання при такому методі приймають середнє значення (або

середнє арифметичне за ансамблем) Y_{cp} на виході суматора C_M , що визначається за формулою

$$Y_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i, \quad (2.1)$$

де Y_i – показ (і результат вимірювання) і-го ЗВТ.

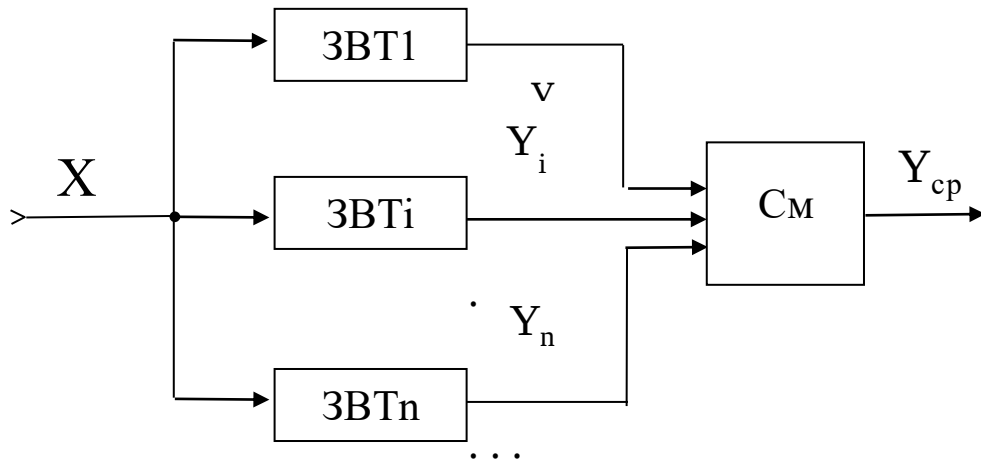


Рисунок 2.1 - До пояснення просторового осереднення результатів вимірювань

Якщо результати вимірювань Y_i , $i = \overline{1, n}$ є незалежними (некорельованими), то СКВ випадкової похибки результату вимірювань Y_{cp} визначається відомим співвідношенням

$$\sigma(Y_{cp}) = \frac{\sigma(Y)}{\sqrt{n}}, \quad (2.2)$$

де $\sigma(Y)$ – СКВ окремих результатів вимірювань Y_i .

Згідно з виразом (3.20) СКВ результату вимірювань (середнього арифметичного за ансамблем) Y_{cp} при просторовому осередненні в $\sqrt{n}$ менше від СКВ окремих результатів вимірювань Y . Крім того, при такому методі забезпечується висока швидкодія вимірювань, яка визначається приблизно часом вимірювання одним ЗВТ, та значно підвищується надійність завдяки паралельному резервуванню. Але при цьому суттєво ускладнюється апаратурна реалізація вимірювань, тобто підвищення точності вимірювань забезпечується збільшенням апаратурної збитковості. Тому просторове осереднення використовується тільки в особливо важливих випадках.

Метод часового осереднення результатів вимірювань ґрунтується на їх цифровому або аналоговому інтегруванні та використовується при умові, що інтервал кореляції похибки є значно меншим від допустимого значення часу вимірювання або перетворення.

Часове осереднення здійснюється за тією самою формулою (2.1) на основі багаторазових вимірювань фізичної величини X постійного розміру одним ЗВТ за незмінних умов і з наступним обчисленням результату вимірювань, яким є середнє арифметичне значення $\bar{Y}$ окремих результатів вимірювань Y_i , $i = \overline{1, n}$, виконаних послідовно в часі.

При цифровому інтегруванні (підсумовуванні), тобто при часовому осередненні n результатів вимірювань Y_i , яке досить широко використовується в цифрових вимірювальних приладах, СКВ $\sigma(\bar{Y})$ результату вимірювання $\bar{Y}$ визначається тим самим співвідношенням (2.1), де слід прийняти $Y_{cp} \equiv \bar{Y}$.

Отже, перевагами часового осереднення перед просторовим осередненням є мінімальні апаратурні витрати, а недоліком – збільшення часових витрат (часова збитковість) на послідовне в часі здійснення n результатів вимірювань та їх осереднення.

Покажемо переваги аналогового часового осереднення (інтегрування) на прикладі аналогового вимірювального перетворювача (АВП) (рис. 2.2).

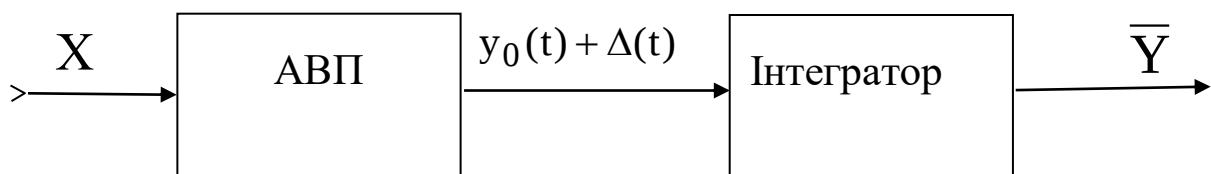


Рисунок 2.2 - До пояснення часового аналогового осереднення

Вихідна величина інтегратора в кінці інтервалу вимірювання T приймає значення:

$$\bar{Y} = \frac{1}{T} \int_0^T [y_0(t) + \Delta(t)] dt, \quad (2.3)$$

де $y_0(t)$ – вихідний сигнал ідеалізованого АВП;

$\Delta(t)$ – випадкова складова похибки АВП.

Звичайно можна прийняти умову $y_0(t) = Y_0 = \text{const}$ за час інтегрування T . Тоді співвідношення (2.3) приймає вигляд:

$$\bar{Y}_{\text{cp}} = Y_0 + \Delta_{\text{cp}},$$

де Δ_{cp} – випадкова похибка після осереднення.

Якщо прийняти досить розповсюджене припущення про те, що випадкова похибка Δ_{cp} результату вимірювання $\bar{Y}$ являє собою ергодичний випадковий процес, то дисперсія цієї похибки визначається за відомою формулою

$$D[\Delta_{\text{cp}}] = \frac{2}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) R_{\Delta_{\text{cp}}}(\tau) d\tau, \quad (2.4)$$

де $R_{\Delta_{\text{cp}}}(\tau)$ – авто кореляційна функція похибки $\Delta_{\text{cp}}(t)$.

За умови $T \gg \tau_k$, де τ_k – час кореляції похибки, формула (2.4) спрощується:

$$D[\Delta_{\text{cp}}] = \frac{2}{T} \int_0^\infty R(\tau) d\tau. \quad (2.5)$$

Кореляційна функція зв'язана з одностороннім спектром щільності потужності випадкової похибки Δ_{cp} косинус-перетворенням Фур'є:

$$S_{\Delta_{\text{cp}}}(\omega) = 4 \int_0^\infty R_{\Delta_{\text{cp}}}(\tau) \cos \omega \tau d\tau; \quad (2.6)$$

$$R_{\Delta_{\text{cp}}}(\tau) = \int_0^\infty S_{\Delta_{\text{cp}}}(\omega) \cos \omega \tau d\omega. \quad (2.7)$$

З урахуванням рівностей (2.6), (2.7) при $\omega = 0$ із співвідношення (3.23) дістаємо:

$$D[\Delta_{cp}] = \frac{S_{\Delta_{cp}}(0)}{2T}. \quad (2.8)$$

Визначимо коефіцієнт зменшення СКВ похибки результату вимірювання $\bar{Y}$ за рахунок аналогового часового осереднення:

$$\zeta = \frac{\sigma[\Delta_{cp}]}{\sigma[\Delta]} = \sqrt{\frac{D[\Delta_{cp}]}{D[\Delta]}}, \quad (2.9)$$

де $D[\Delta]$ – дисперсія випадкової похибки $\Delta(t)$.

Підставивши рівність (3.26), маємо

$$\zeta = \sqrt{\frac{S_{\Delta_{cp}}(0)}{2TD[\Delta]}}. \quad (2.10)$$

Приймаючи до уваги відомі співвідношення

$$D[\Delta] = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S_{\Delta}(\omega) d\omega,$$

а потім

$$\omega_e = \frac{1}{S_{\Delta}(0)} \int_0^{\infty} S_{\Delta}(\omega) d\omega = \frac{2\pi D[\Delta]}{S_{\Delta}(0)},$$

де ω_e – еквівалентна полоса частот похибки Δ , запишемо вираз для відношення:

$$\frac{S_{\Delta}(0)}{D[\Delta]} = \frac{2\pi}{\omega_e}.$$

З урахуванням цієї рівності формула (3.27) для коефіцієнта ζ приймає вигляд:

$$\zeta = \sqrt{\frac{\pi}{2T\omega}},$$

звідки видно, що коефіцієнт ζ , який характеризує зменшення СКВ результату вимірювань $\bar{Y}$, збільшується зі збільшенням часу осереднення T та еквівалентної полоси частот ω_e похибки Δ .

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Поясніть структурні методи корекції похибок:

а) інваріантних ЗВТ з просторовим розділенням вимірювальних каналів;

б) інваріантних ЗВТ з часовим розділенням вимірювальних каналів;

в) ЗВТ з розімкнутою структурною схемою, просторовим розділенням вимірювальних каналів й адаптивною корекцією;

г) ЗВТ з розімкнутою структурною схемою, просторовим розділенням вимірювальних каналів і мультиплікативною корекцією (з множилним і ділильним пристроєм).