

Тема 1. Загальні відомості про метрологію

Метрологія. Її задачі та функції

Метрологія – це наука про вимірювання, методи і засоби забезпечення єдності вимірювань та способи досягнення потрібної точності. Під **єдністю вимірювань** розуміють такий їх стан, при якому результати вимірювань виражаються в узаконених одиницях, а їх похибки відомі з заданою ймовірністю.

Предметом метрології є отримання кількісної та якісної інформації про властивість фізичних об'єктів та процесів, встановлення та застосування наукових і організаційних основ, правил та норм, необхідних для досягнення єдності та необхідної точності.

Методи метрології – сукупність фізичних та математичних методів, що використовуються для одержання вимірювальної інформації із заданими точністю та достовірністю (методів вимірювальних перетворень, методів вимірювань та опрацювання результатів спостережень, планування вимірювального експерименту).

Засоби метрології – це сукупність засобів вимірювальної техніки та засобів контролю, які вдосконалюються і розвиваються на основі об'єктивних законів

Основні задачі метрології: створення еталонів та мір, вимірювальних приладів і вимірювальних інформаційних систем, розроблення методів вимірювальних перетворень, методів оцінювання точності результатів вимірювань тощо.

Стандартизація – це діяльність, що полягає у розробленні та встановленні вимог, правил та норм з метою досягнення оптимальної узгодженості в певній галузі, результатом чого є підвищення ступеня відповідності продукції її функціональному призначенню.

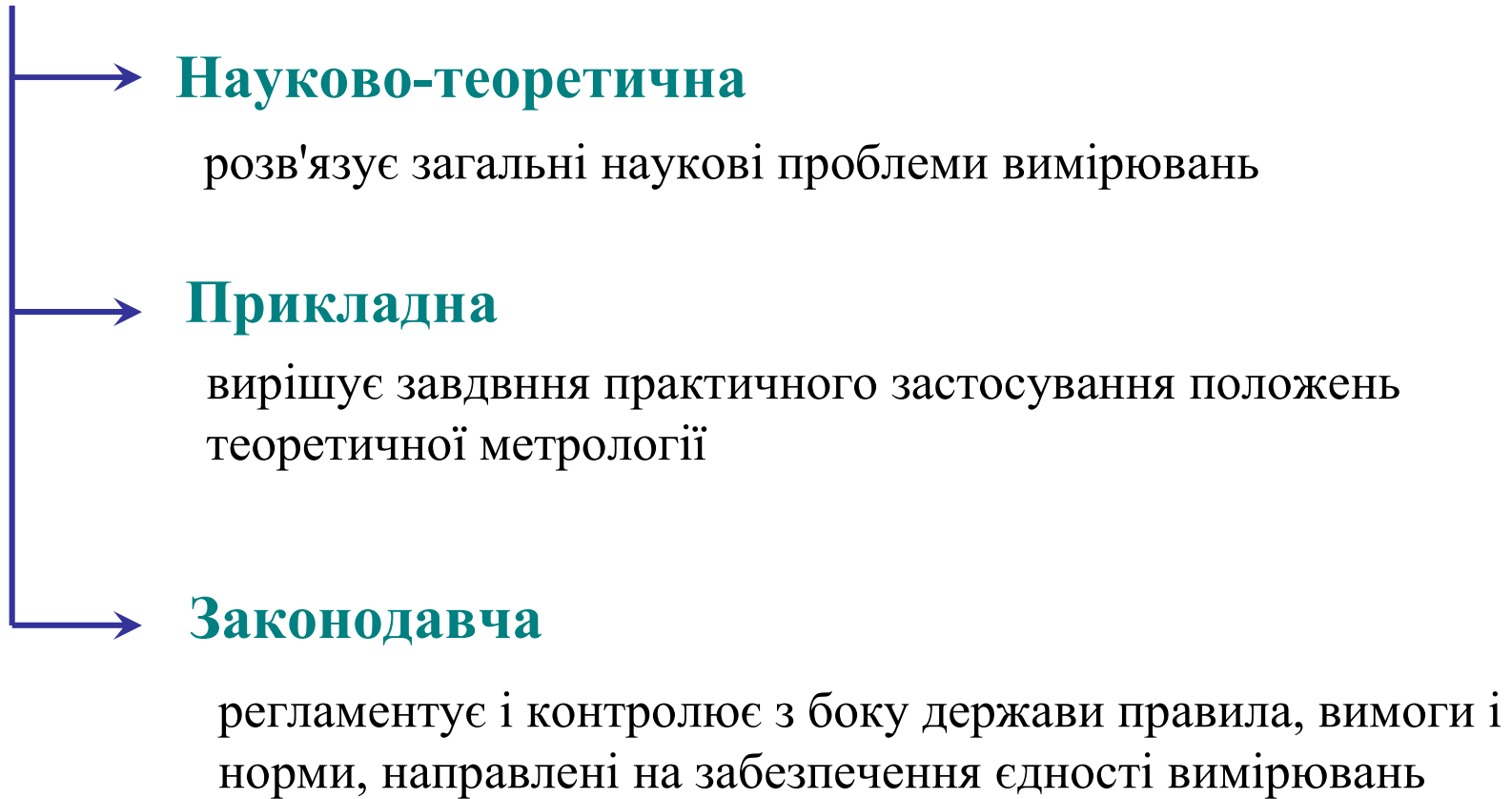
Взаємозв'язок метрології та стандартизації проявляється в тому, що вимірювання, з одного боку, пронизані стандартами, а, з іншого боку, стандарти забезпечуються методами та засобами контролю їх виконання.

Метрологія і стандартизація в Україні об'єднані в єдину державну службу, якою є Державний комітет України зі стандартизації, метрології та сертифікації.

Функції метрології:

- розроблення теорії фізичних величин, їх одиниць і систем;
- експериментальне відтворення одиниць з допомогою еталонів і передача розмірів одиниць для практичних вимірювань;
- розроблення загальної теорії вимірювань, зокрема теорії похибок і нових методів особливо точних вимірювань;
- визначення фізичних констант і стандартних довідкових даних про властивості речовин і матеріалів і розроблення стандартних зразків;
- нормування метрологічних характеристик засобів вимірювання;
- нормування стандартних вимірювальних процесів;
- метрологічний нагляд за засобами вимірювання.

Метрологія



Напрямки науково-теоретичної метрології:

1. **Розроблення та удосконалення теоретичних основ метрології**, в тому числі загальної теорії вимірювань, теорії похибок, теорії надійності засобів вимірювальної техніки, теорії вимірювальних перетворень та теорії передавання вимірювальної інформації.
2. **Розроблення нових принципів та методів вимірювань**, в тому числі фізичні дослідження з метою використання найновіших досягнень науки для створення нових методів вимірювань та засобів вимірювальної техніки, підвищення точності вимірювань.
3. **Створення та удосконалення наукових основ єдності мір та вимірювань**, в тому числі удосконалення еталонів, удосконалення мір фізичних величин та засобів вимірювань, створення наукових основ державних випробувань вимірювальних засобів, розроблення та удосконалення нормативної документації в галузі вимірювальної техніки.

Напрямки науково-теоретичної метрології:

4. **Створення та удосконалення наукових основ державної служби стандартних довідкових даних та стандартних зразків**, в тому числі розроблення методик експериментального визначення найбільш достовірних значень фізичних констант, розроблення і удосконалення системи збору, апробації, зберігання та розповсюдження стандартних довідкових даних.

5. **Створення та удосконалення наукових основ державної служби атестації якості продукції**, в тому числі критеріїв оцінки якості продукції.

Напрямки законодавчої метрології

1. Узаконенні (стандартизації) термінів та їх означень, систем чи сукупності одиниць, системи еталонів, мір фізичних величин та засобів вимірювань.

2. Узаконенні класів точності засобів вимірювальної техніки та методик оцінювання їх точності.

3. Узаконенні стандартних довідкових даних, методик повірки та контролю вимірювальних засобів, методик контролю та атестації якості продукції.

Атестація – офіційне підтвердження визнаним компетентним органом відповідності певних характеристик продукції встановленим кваліфікаційним ознакам

Напрямки прикладної метрології

1. **Організація державної служби єдності мір та вимірювань**, включно з організацією та здійсненням періодичної повірки засобів вимірювальної техніки, які знаходяться в експлуатації, організація та здійснення державних випробувань нових засобів вимірювальної техніки, контроль за станом вимірювального господарства підприємств.
2. **Організація державної служби стандартних довідкових даних та стандартних зразків**, в тому числі видання офіційних довідників зі значеннями констант та властивостей речовин і матеріалів, виготовлення та випуск стандартних зразків та організація служби їх атестації.
3. **Організація та здійснення служби контролю за дотриманням стандартів та технічних умов під час виробництва**, державних випробувань та атестації якості продукції.

Основні терміни та визначення з метрології

Фізична величина - це властивість, загальна в якісному відношенні у багатьох матеріальних об'єктів та індивідуальна в кількісному відношенні у кожного з них.

Формалізованим відображенням якісних відмінностей вимірюваних величин є їх *розмірність*, а кількісною характеристикою - їхній *розмір*.

Значення фізичної величини - відображення фізичної величини у вигляді числового значення величини з позначенням її одиниці

$$A = \{A\} [A],$$

Розмірністю є вираз, що відображає зв'язок фізичної величини з основними величинами системи величин

Приклад: $\dim V = L/T$

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

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

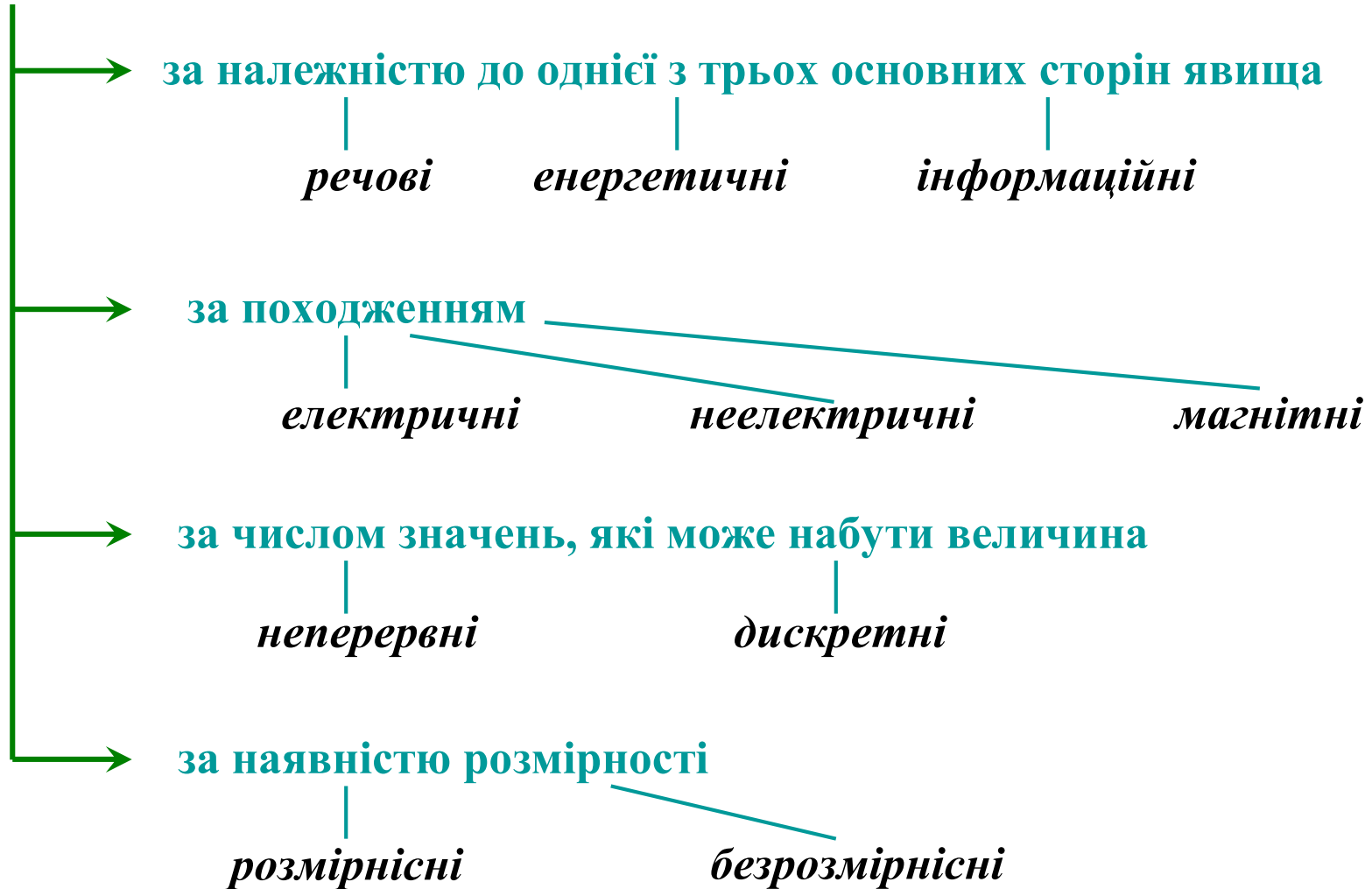
Одиницею фізичної величини є величина певного розміру, прийнята за угодою для кількісного відображення однорідних із нею величин

У країнах світу загальноприйнята Міжнародна система одиниць (Systeme Internationale d'unites, SI), яка була прийнята XI Генеральною конференцією з мір та ваги у жовтні 1960 року

Система складається з **7 основних** і **2 додаткових одиниць**, а також **113 похідних одиниць**, в тому числі одиниць електричних і магнітних величин - 40.

Систематизація фізичних величин

Фізичні величини



Вимірювання – відображення фізичних величин їх значеннями за допомогою експерименту та обчислень із застосуванням спеціальних технічних засобів.

Результат вимірювання – значення фізичної величини, знайдене шляхом її вимірювання.

Похибка вимірювання – відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірювальної величини.

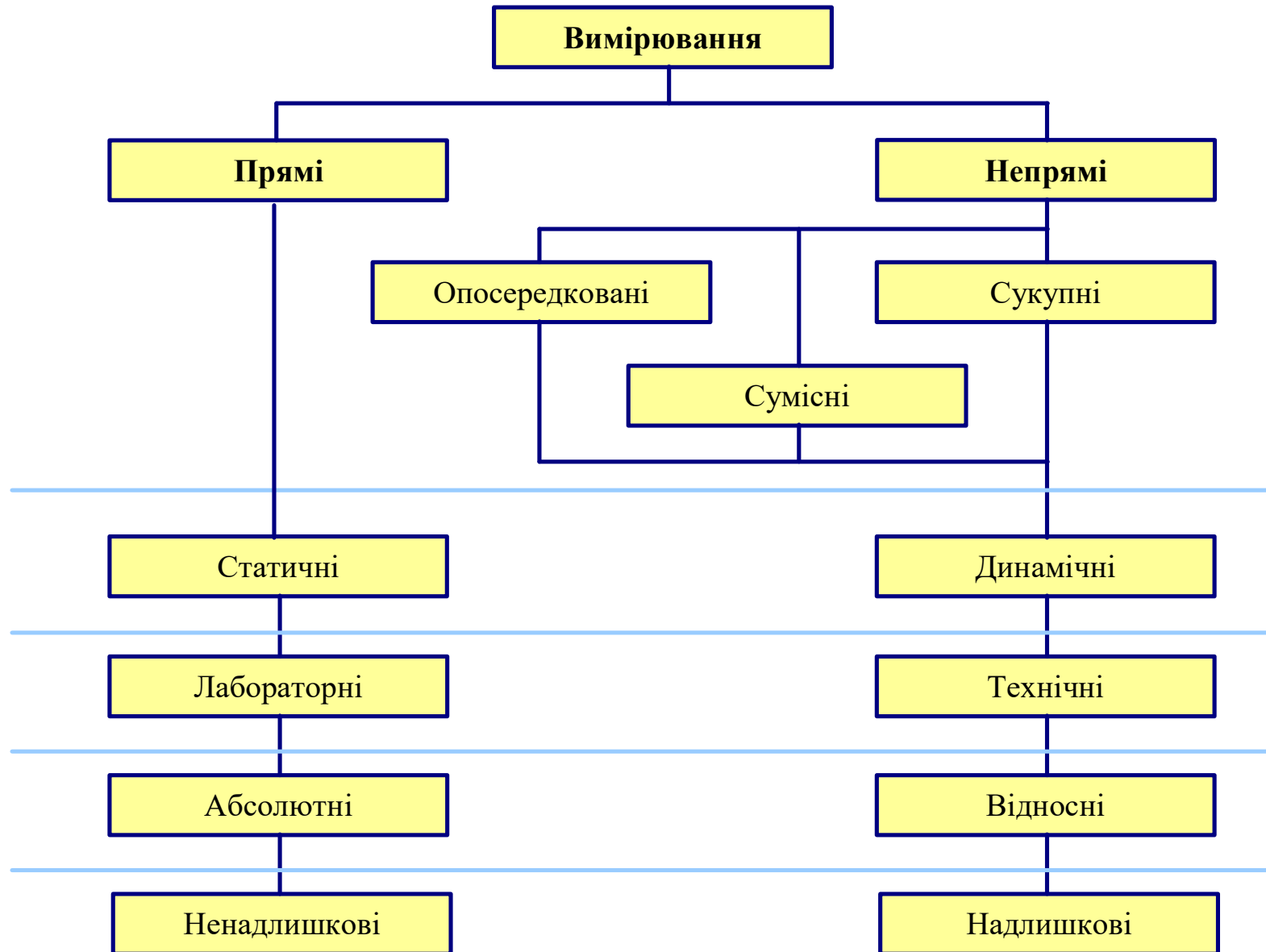
Принцип вимірювання – сукупність фізичних явищ, на яких засноване вимірювання.

Засоби вимірювання – технічні засоби, що використовуються при вимірюваннях і мають нормовані метрологічні властивості (котрі впливають на результат та похибку вимірювання).

Метод вимірювання – сукупність прийомів використання принципів та засобів вимірювання.

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

Класифікація вимірювань



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

Непряме вимірювання – вимірювання, у якому значення однієї чи декількох вимірюваних величин знаходять після перетворення роду величини чи обчислення за відомими залежностями їх від декількох величин аргументів, що вимірюються прямо

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

Приклад:

При опосередкованих вимірюваннях потужності постійного струму її визначають чи на основі прямих вимірювань струму та напруги за формулою

$$P = U \cdot I$$

Сукупне вимірювання – Непряме вимірювання, в якому значення декількох одночасно вимірюваних однорідних величин отримують розв'язанням рівнянь, що пов'язують різні сполучення цих величин, які вимірюються прямо чи опосередковано

Приклад сукупних вимірювань: вимірювання опору кожного з двох резисторів R_1 , R_2 , з'єднаних послідовно та паралельно.

Результат прямого вимірювання омметром послідовно з'єднаних опорів

$$R_{\text{пос}} = R_1 + R_2$$

Сумарна провідність паралельно з'єднаних резисторів

$$\frac{1}{R_{\text{пар}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Із системи з двох рівнянь із двома невідомими обчислюємо шукані значення сукупно виміряних опорів

Сумісне вимірювання – Непряме вимірювання, в якому значення декількох одночасно вимірюваних різнорідних величин отримують розв'язанням рівнянь, які пов'язують їх з іншими величинами, що вимірюються прямо чи опосередковано

Приклад:

Відомо, що опір терморезистора $R_t = R_0(1 + \alpha \cdot t)$,

де R_0 - опір резистора при температурі 0°C ,

α - температурний коефіцієнт опору.

Якщо значення R_0 та α не можна знайти прямими чи опосередкованими вимірюваннями, то вимірюють опір R_{t_1} при температурі t_1 та R_{t_2} при температурі t_2 . Далі складають систему рівнянь, з якої знаходять шукані значення R_0 та α .

$$\begin{cases} R_{t_1} = R_0(1 + \alpha \cdot t_1) \\ R_{t_2} = R_0(1 + \alpha \cdot t_2) \end{cases}$$

Статичне вимірювання – вимірювання величини, яку можна вважати не зміною за час вимірювання (коли похибкою, що виникає від її зміни, можна знехтувати).

Динамічне вимірювання – вимірювання величини, що змінюється за час вимірювання.

Лабораторні вимірювання – вимірювання, за яких похибки кожного результату вимірювання оцінюють за даними, що одержані при цьому вимірюванні.

Технічні вимірювання – вимірювання, які виконуються в заданих умовах згідно з розробленою та рекомендованою раніше методикою, при цьому похибки кожного результату не оцінюють, але вони повинні бути нижче встановлених методикою значень.

Відносне вимірювання – вимірювання відношення величини до іншої однорідної величини

Засоби вимірювальної техніки

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

→ **Засіб вимірювання** – засіб вимірювальної техніки, який реалізує процедуру вимірювань

→ **Вимірювальний пристрій** – засіб вимірювальної техніки, в якому виконується лише одна зі складових частин процедури вимірювань (вимірювальна операція)

Засоби вимірювальної техніки

Вимірювальні пристрої

Міра

Вимірювальний перетворювач

Компаратор

Масштабний перетворювач

Числовий перетворювач

Засоби вимірювань

Вимірювальні прилади

Аналогові вимірювальні прилади

Цифрові вимірювальні прилади

Реєструвальні засоби вимірювань

Аналого-цифрові перетворювачі

Вимірювальні канали

Вимірювальні системи

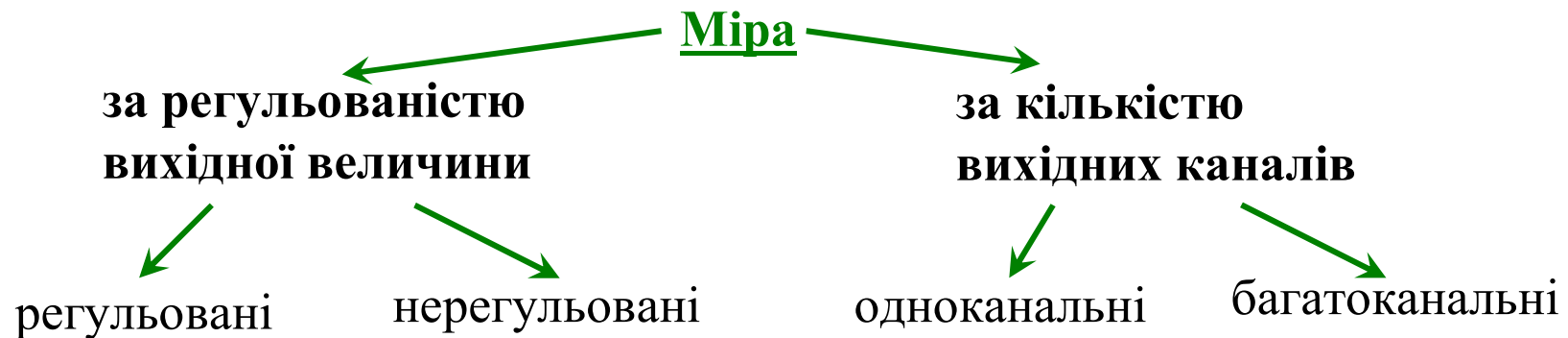
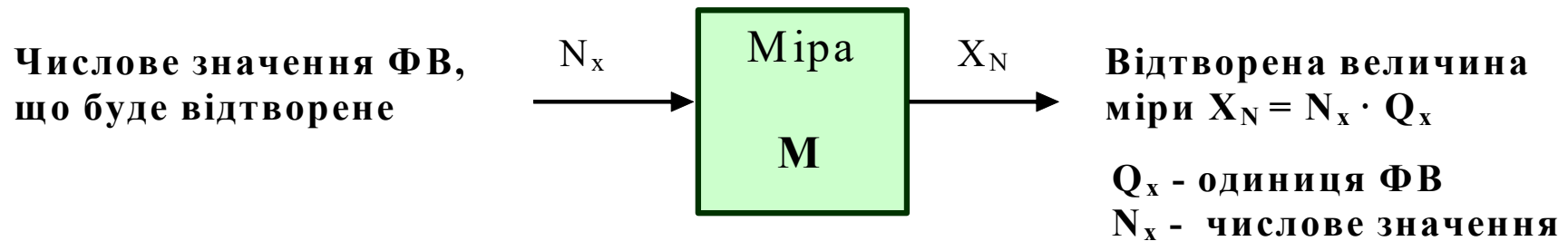
Вимірювальні інформаційні системи

Вимірювальні пристрої

Відтворення фізичних величин. Міра

Відтворення фізичної величини - вимірювальна операція, що полягає у створенні та (чи) зберіганні фізичної величини заданого значення.

Міра - вимірювальний пристрій, що реалізує відтворення та (або) зберігання фізичної величини заданого розміру



Одноканальна нерегульована однозначну міра відтворює величину одного сталого заданого значення

$$X_N = N_X \cdot Q_X = \text{const} \quad \left| \begin{array}{l} N_X = \text{const} \\ Q_X = \text{const}, \end{array} \right.$$

конденсатор постійної ємності, котушка індуктивності

Одноканальна регульована багатозначна міра відтворює у даний момент часу величину одного значення

$$X_N = N_X \cdot Q_X = \text{var} \quad \left| \begin{array}{l} N_X(t) = \text{var} \\ Q_X = \text{const} . \end{array} \right.$$

цифроаналоговий перетворювач код-напряга (ЦАП)

Багатоканальна нерегульована багатозначна міра відтворює одночасно декілька однорідних величин із заданими, сталими значеннями

$$X_{Ni} = N_{xi} \cdot Q_x = \text{var} \left| \begin{array}{l} N_{xi} = \text{var} \\ Q_x = \text{const.} \end{array} \right.$$

подільник напруги з багатьма нерухомими відводами, який живиться від джерела постійного струму

Багатоканальна кодокерована регульована багатозначна міра відтворює одночасно декілька однорідних величин, розміри яких можуть змінюватися

$$X_{Ni}(t) = N_i \cdot K(t) \cdot Q_x \left| \begin{array}{l} N_{xi} = \text{var} \\ K_i(t) = \text{var} \\ Q_x = \text{const.} \end{array} \right.$$

Вимірювальне перетворення фізичної величини

Вимірювальне перетворення фізичної величини - вимірювальна операція, під час якої вхідна фізична величина перетворюється у вихідну, функціонально з нею пов'язану

Види вимірювальних перетворень:

- модуляція та демодуляція;
- масштабно-числове перетворення сигналу;
- детектування;
- кореляційне перетворення;
- дискретизація;
- спектральне перетворення;
- осцилографічне перетворення;
- інтегрування;
- диференціювання

Вимірювальний перетворювач - вимірювальний пристрій, що реалізує вимірювальне перетворення



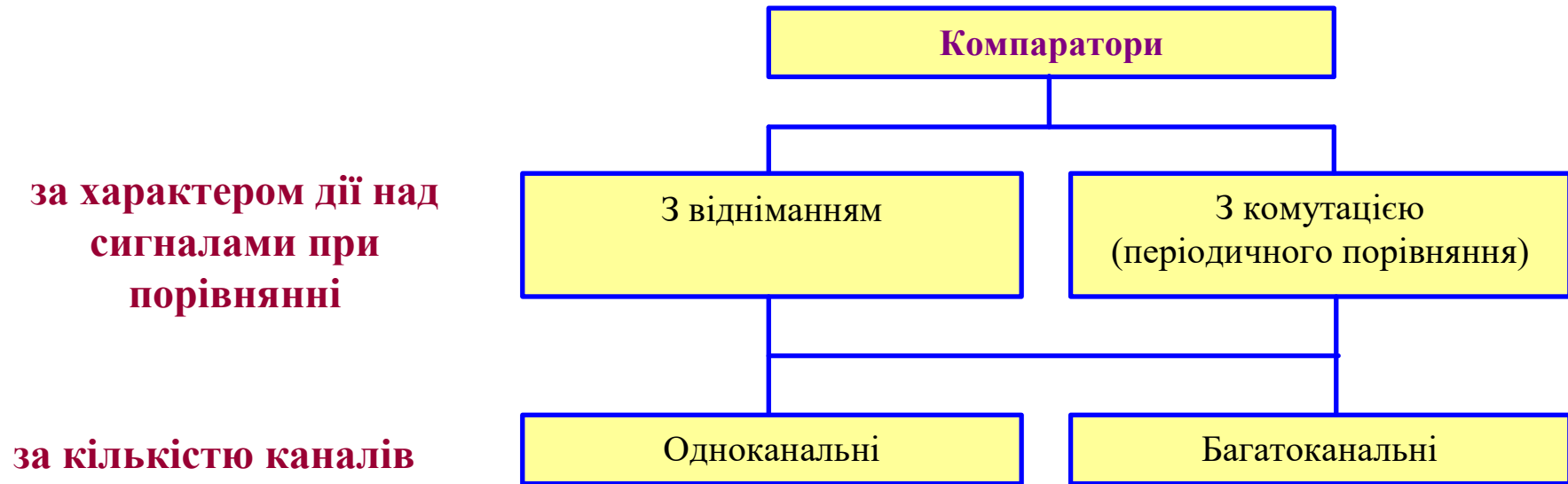
Порівняння фізичних величин. Компаратор

Порівняння - вимірювальна операція, що полягає у відображенні співвідношення між розмірами двох однорідних фізичних величин відповідним висновком: більша, менша чи однакова за розміром.

У більшості випадків для порівняння використовують придатність сигналів до віднімання. Тоді співвідношення між розмірами інформативних параметрів X_1 і X_2 визначають знаком їхньої різниці згідно з рівнянням

$$\Delta X = [0.5 + 0.5 \text{sign}(X_1 - X_2)] = \begin{cases} 1 \Rightarrow X_1 > X_2 \\ 0 \Rightarrow X_1 < X_2 \end{cases}$$

Компаратор - вимірювальний пристрій, що реалізує порівняння однорідних фізичних величин



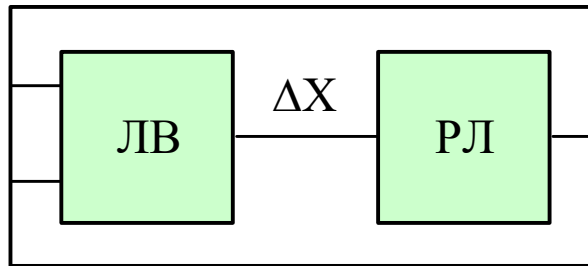
До складу компаратора входять: ланка віднімання, що створює різницю вхідних сигналів і різницева ланка, що реагує на знак різниці

Компаратор на основі операції віднімання реалізується двоканальною структурою. Результат порівняння - однобітовий сигнал, який є інформацією про співвідношення між розмірами порівнюваних величин.

Компаратор на основі комутації сигналів реалізується одноканальною структурою. Внаслідок комутації створюється періодичний сигнал з частотою перемикавання, знак результату детектування якого залежить від співвідношення між порівнюваними величинами.

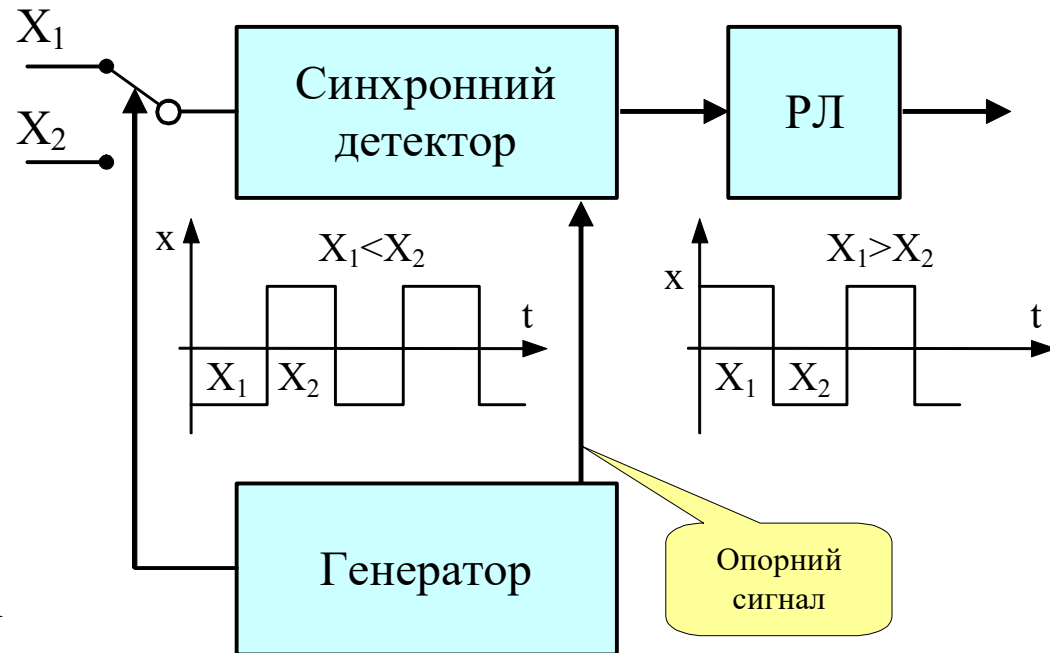
Структурна схема компаратора

З відніманням



ЛВ – ланка віднімання
РЛ – ланка визначення знака різниці
 ΔX – різниця ФВ

З комутацією



Масштабне вимірвальне перетворення

Масштабне перетворення - лінійне вимірвальне перетворення вхідної величини без зміни роду

В результаті масштабного перетворення вхідна величина перетворюється в однорідну вихідну, розмір якої пропорційний в K разів розмірові вхідної

$$X_1 = K_{\text{МП}} \cdot X$$

$K_{\text{МП}}$ - коефіцієнт масштабування

$K_{\text{МП}} < 1$ - послаблення;

$K_{\text{МП}} > 1$ - підсилення;

$K_{\text{МП}} = 1$ - повторення.

Масштабний перетворювач - вимірвальний перетворювач, який реалізує масштабне вимірвальне перетворення

Типи масштабних перетворювачів

1) *одноканальний нерегульований перетворювач*, характерною ознакою якого є сталість коефіцієнта масштабування.

$$X_1 = K_{\text{МП}} \cdot X; \quad | \quad K_{\text{МП}} = \text{const}$$

*вимірювальний підсилювач,
трансформатори напруги чи струму*

2) *одноканальний кодирований регульований перетворювач*, який є масштабним перетворювачем з часовим розділенням.

$$X_1 = K_{\text{МП}}(t) \cdot X; \quad | \quad K_{\text{МП}}(t) = \text{var}$$

*перемножувальний
цифроаналоговий
перетворювач напруги*

3) *багатоканальний нерегульований перетворювач з просторовим розділенням*, характерною рисою якого є наявність кількох вихідних каналів зі сталим коефіцієнтом масштабування.

багатоканальний подільник напруги

4) *багатоканальний регульований перетворювач* (перетворювач як з часовим, так і з просторовим розділенням), який також відрізняється наявністю кількох вихідних каналів.

подільник напруги з кількома рухомими контактами

Числове вимірювальне перетворення

Числовий вимірювальний перетворювач - вимірювальний пристрій, що є сукупністю засобів обчислювальної техніки та програмного забезпечення і виконує обчислювальні операції під час вимірювань

Числове вимірювальне перетворення (ЧВП) - це операція обчислення проміжних результатів вимірювань з метою отримання остаточного результату.

Засоби вимірювання

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

Аналоговий вимірювальний прилад - вимірювальний прилад, в якому візуальний сигнал вимірювальної інформації подається за допомогою шкали та вказівника.

Цифровий вимірювальний прилад - вимірювальний прилад, в якому візуальний сигнал вимірювальної інформації подається у вигляді цифр чи символів на показувальному пристрої.

Аналого-цифровий перетворювач - засіб вимірювань, в якому створюється кодовий сигнал вимірювальної інформації.

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

Засоби вимірювання

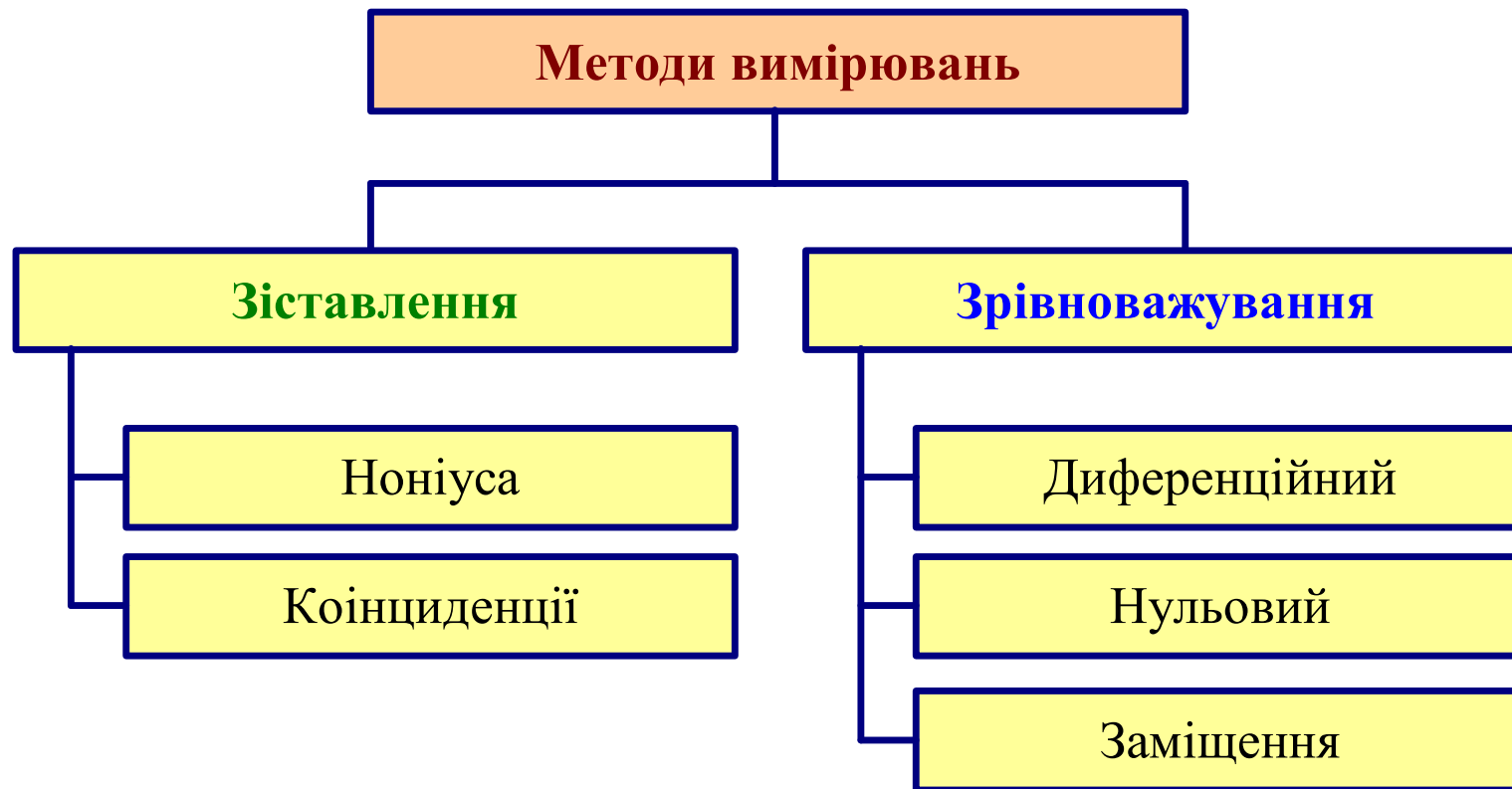
Вимірювальний канал - сукупність засобів вимірювальної техніки, засобів зв'язку та інших технічних засобів, призначена для створення сигналу вимірювальної інформації про одну вимірювану фізичну величину.

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

Вимірювальна інформаційна система - сукупність засобів вимірювальної техніки, засобів контролю, діагностування та інших технічних засобів, об'єднаних для створення сигналів вимірювальної та інших видів інформації.

Методи вимірювань

Метод вимірювання - сукупність способів використання засобів вимірювальної техніки та принципу вимірювань для створення вимірювальної інформації

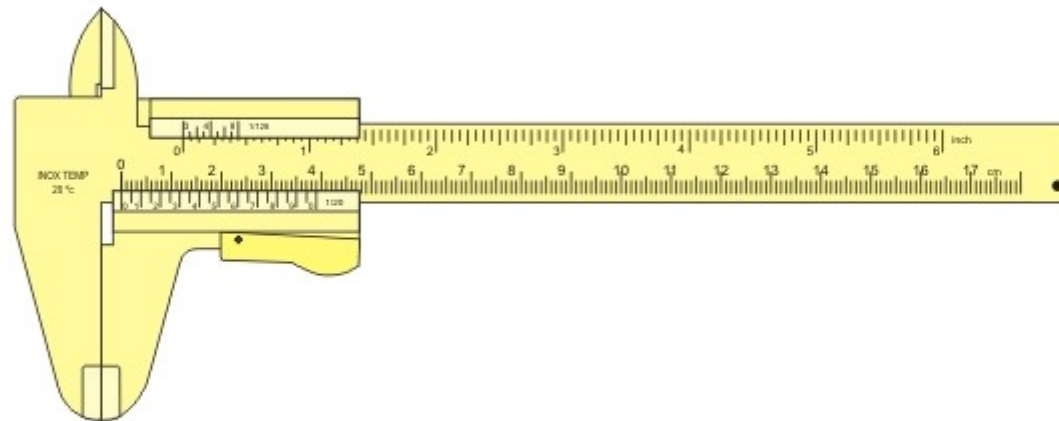


Метод зіставлення (метод безпосередньої оцінки) - метод прямого вимірювання з одноразовим порівнянням вимірюваної величини з усіма вихідними величинами багатозначної нерегульованої міри

Приклад: вимірювання довжини лінійкою з поділками, вимірювання інтервалу часу годинником

Метод одного збігу (метод ноніуса) - метод прямого вимірювання з одноразовим порівнянням вихідних величин двох багатозначних нерегульованих мір, з різними за значенням ступенями, нульові позначки яких зсунуті між собою на вимірювану величину

Приклад:



Метод подвійного збігу (метод коінциденції) - метод прямого вимірювання з одноразовим порівнянням двох квантованих фізичних величин: вимірюваної та відтворюваної багатозначною нерегульованою мірою

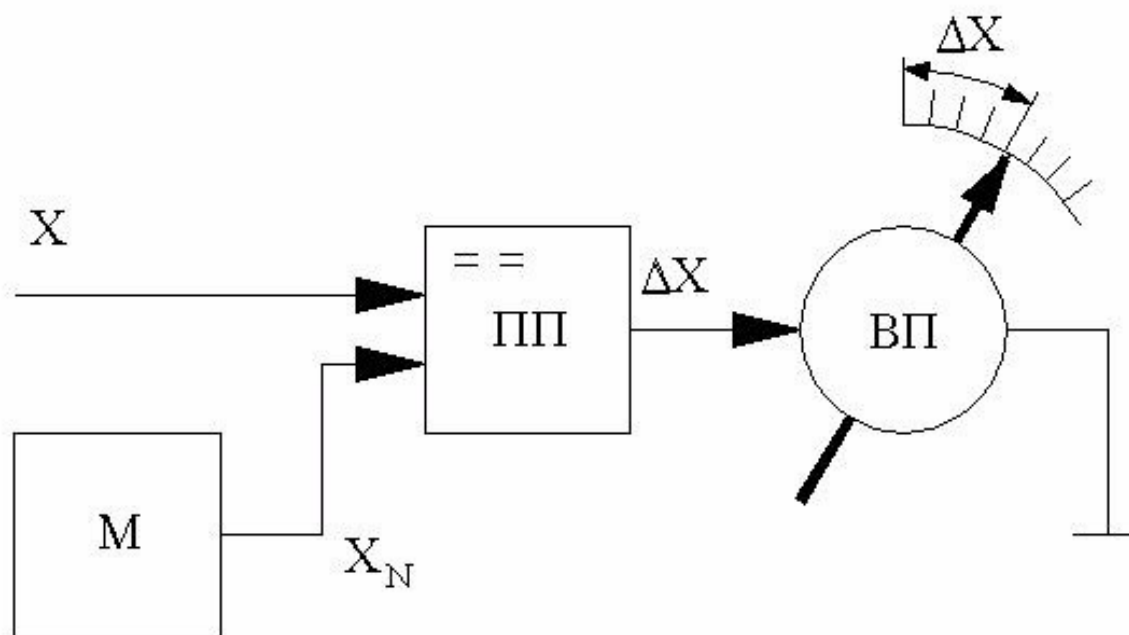
Приклад:

вимірювання зістикованих інтервалів часу за допомогою послідовності періодичних імпульсів з відомим значенням їх періоду;
вимірювання зістикованих відрізків довжини за допомогою лінійки з відомим значенням поділок

Метод зрівноваження (метод порівняння з мірою) - метод прямого вимірювання з багаторазовим порівнянням вимірюваної величини та величини, що відтворюється регульованою мірою, до їх повного зрівноваження

Приклад: вимірювання електричної напруги компенсатором.

Диференційний метод (різницевий метод) - метод вимірювання, за яким невелика різниця між вимірюваною величиною та вихідною величиною одноканальної міри вимірюється відповідним засобом вимірювання

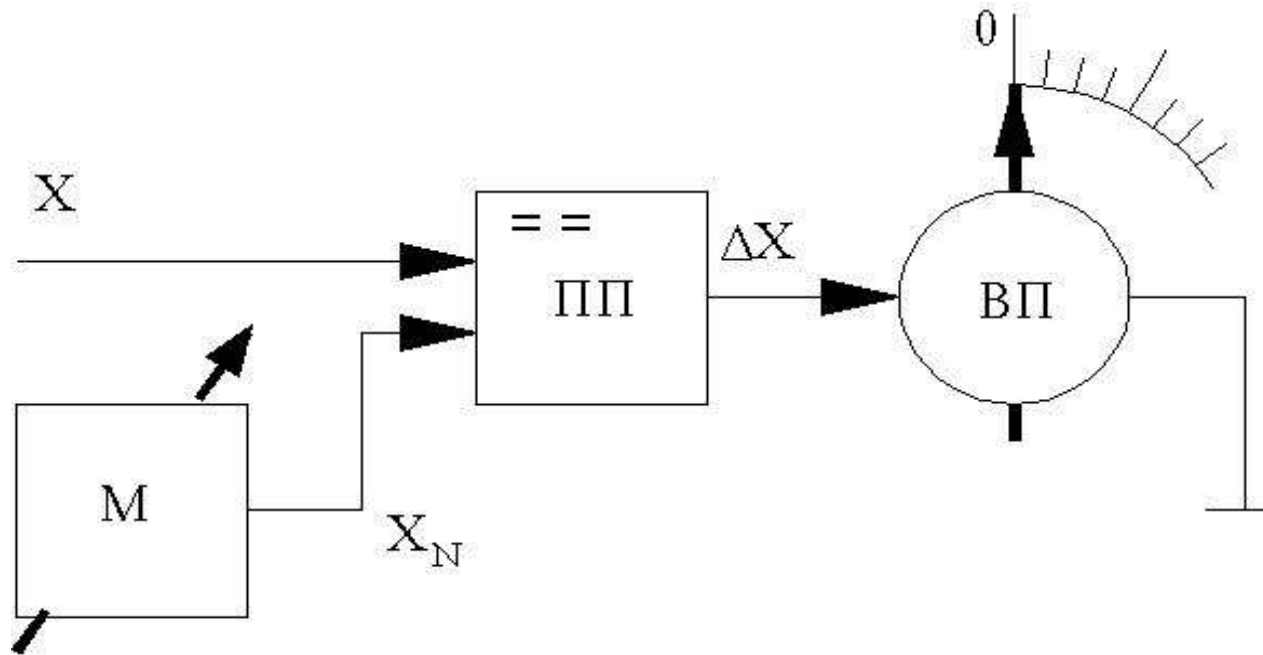


різницю
 $\Delta X = X - X_N$
 (вихід компаратора
 ПП) вимірюють за
 допомогою засобу
 вимірювання ВП

значення невідомої
 величини визначається

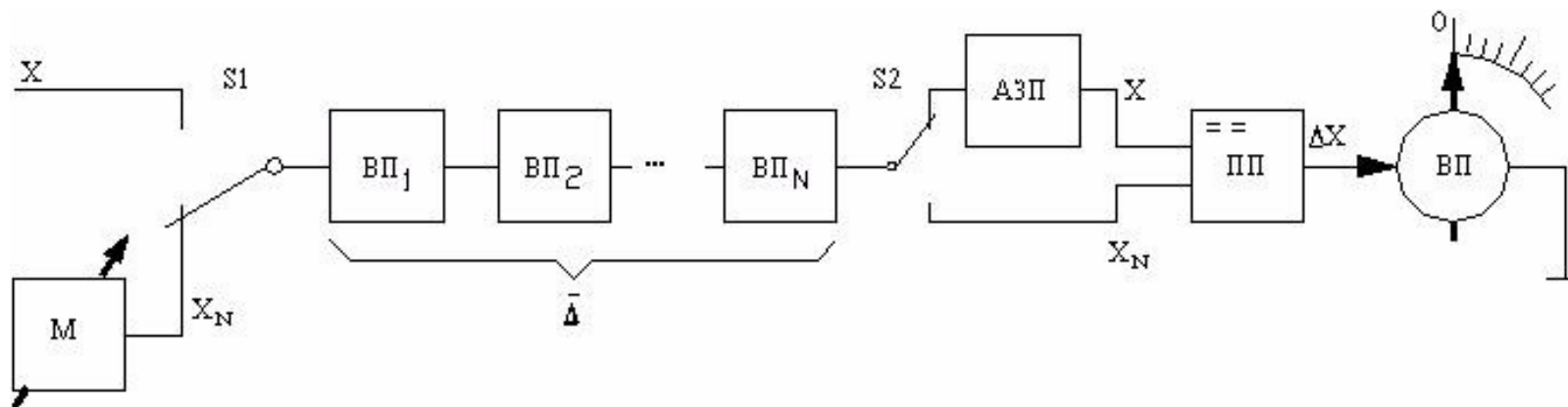
$$X = X_N + \Delta X \quad \left| \begin{array}{l} X_N = \text{const} \\ \Delta X = \text{var} \end{array} \right.$$

Окремим випадком диференційного методу є нульовий. В нульовому методі відтворювану мірою величину X_N роблять регульованою, а різницю $\Delta X = X - X_N = 0$ доводять до нуля. Високочутливий засіб вимірювання (нуль-індикатор) в цьому методі фіксує момент рівності $X = X_N$



Приклад: вимірювання параметрів електричного кола мостовими схемами, вимірювання напруги, Е.Р.С., струму компенсатором

Метод заміщення - метод непрямого вимірювання з багаторазовим порівнянням до повного зрівноваження вихідних величин вимірювального перетворювача з почерговим перетворенням ним вимірюваної величини та вихідної величини регульованої міри



На першому етапі вимірювана величина X проходить через вимірювальні перетворювачі $ВП_1, ВП_2, \dots, ВП_N$, запам'ятовується аналоговим запам'ятовувальним пристроєм $АЗП$ і подається на перший вхід компаратора $ПП$.

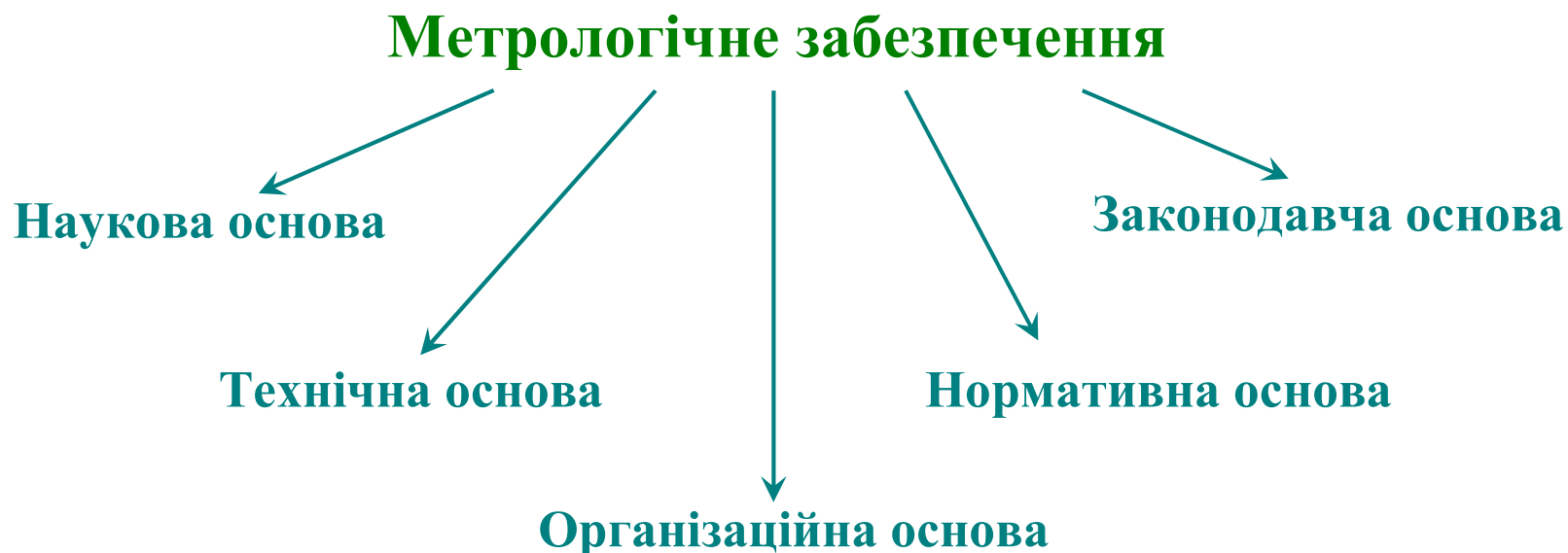
На другому етапі зразкова величина X_N з виходу одноканальної регульованої міри M , пройшовши через ті самі вимірювальні перетворювачі, надходить на другий вхід компаратора $ПП$.

Тема 2. Основи метрологічного забезпечення

Поняття про метрологічне забезпечення та його основи

Метрологічне забезпечення - установлення та застосування метрологічних норм і правил, а також розроблення, виготовлення та застосування технічних засобів, необхідних для досягнення єдності і потрібної точності вимірювань.

Закон України "Про метрологію та метрологічну діяльність" та ДСТУ 2681-94



Науковою основою метрологічного забезпечення є метрологія.

Законодавчою основою метрологічного забезпечення є Закони України, Декрети і постанови Кабінету Міністрів України, які спрямовані на забезпечення єдності вимірювань.

Технічною основою метрологічного забезпечення є:

- система державних еталонів одиниць фізичних величин, яка забезпечує їх відтворення з найвищою точністю;
- система робочих еталонів і зразкових ЗВТ, за допомогою яких здійснюється передача розмірів одиниць фізичних величин робочим ЗВТ;
- система стандартних зразків складу та властивостей речовин та матеріалів, що забезпечує відтворення одиниць фізичних величин, які характеризують склад і властивості речовин і матеріалів;
- система робочих ЗВТ, які використовуються під час розроблення, виробництва, випробувань та експлуатації продукції, наукових досліджень та інших видів діяльності.

Нормативною основою метрологічного забезпечення є державні стандарти та інші документи державної системи забезпечення єдності вимірювань (ДСВ), відповідні нормативні документи Держстандарту України, методичні вказівки і рекомендації, які регламентують єдину номенклатуру, способи подання та оцінювання метрологічних характеристик, правила стандартизації й атестації засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), вимоги до проведення державних випробувань, перевірки, ревізії та експертизи ЗВТ.

Організаційною основою метрологічного забезпечення є метрологічна служба України, яка складається з державної та відомчих служб.

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

Державна система забезпечення єдності вимірювань - це комплекс нормативно-технічних документів, на підставі яких стандартизують:

- одиниці фізичних величин;
- державні еталони та повірні схеми;
- робочі еталони та зразкові ЗВТ;
- методи та засоби метрологічної перевірки (перевірки згідно **ДСТУ 2681-94**), калібрування, випробувань та метрологічної атестації ЗВТ;
- номенклатуру нормованих метрологічних характеристик ЗВТ;
- норми точності вимірювань;
- способи вираження та форми подання результатів та характеристики точності вимірювань;
- методики виконання вимірювань;
- методики оцінки вірогідності та форми подання даних про властивості речовин та матеріалів, вимоги до проведення експертизи, а також атестації цих даних;

- вимоги до стандартних зразків складу та властивостей речовин і матеріалів, до стандартних довідкових даних;
- організацію і порядок проведення сертифікації, державних випробувань, метрологічної перевірки, калібрування та метрологічної атестації ЗВТ;
- порядок проведення метрологічної експертизи нормативної, проектної, конструкторської, технологічної і програмної документації;
- терміни та визначення в галузі метрології;
- порядок та форми здійснення державного метрологічного нагляду;
- порядок здійснення акредитації метрологічних служб, вимірювальних, випробувальних, аналітичних та інших лабораторій на право проведення метрологічних робіт;
- порядок одержання суб`єктами підприємницької діяльності дозволів (ліцензій) на право виготовлення, метрологічної перевірки, калібрування, ремонту, імпорту (ввезення), прокату і продажу ЗВТ.

Мета та основні завдання метрологічного забезпечення

Метою метрологічного забезпечення є поліпшення якості продукції, підвищення ефективності виробництва, використання матеріальних цінностей та енергетичних ресурсів, а також наукових досліджень.

Завдання метрологічного забезпечення державної метрологічної служби:

- установа одиниць фізичних величин;
- формування системи державних еталонів одиниць фізичних величин і забезпечення її функціонування для відтворення одиниць з найвищою в Україні точністю;
- розроблення методів і засобів передавання розмірів одиниць фізичних величин від еталонів зразковим і робочим ЗВТ;
- розроблення науково-методичних, правових та організаційних основ, норм і правил, які необхідні для досягнення єдності та потрібної точності вимірювань;
- розроблення та впровадження в метрологічну практику норм і правил законодавчої метрології, а також документів ДСВ;

Завдання метрологічного забезпечення державної метрологічної служби:

- виконання аналізу стану вимірювань у всіх галузях економіки України;
- державний метрологічний нагляд за розробленням, виробництвом, станом, застосуванням, ремонтом, прокатом, продажем, імпортом і зберіганням ЗВТ, додержанням метрологічних норм та правил, а також за діяльністю відомчих метрологічних служб;
- державний метрологічний нагляд за кількістю фасованих товарів в упаковках під час продажу та розфасування;
- проведення державних випробувань, метрологічної перевірки, калібрування та метрологічної атестації ЗВТ;
- сертифікація ЗВТ;
- виконання робіт із забезпечення єдності і потрібної точності вимірювань для потреб оборони;
- розроблення та атестація методик виконання вимірювань;
- створення та атестація стандартних зразків складу і властивостей речовин і матеріалів;

Завдання метрологічного забезпечення державної метрологічної служби:

- розроблення та забезпечення функціонування системи стандартних довідкових даних про фізичні константи і властивості речовин і матеріалів;
- проведення експертизи та атестації даних про властивості речовин і матеріалів;
- проведення експертизи нормативної, проектної, конструкторської та технологічної документації;
- оцінювання відповідності наукової, законодавчої, нормативної, технічної та організаційної основ метрологічного забезпечення потребам економіки України та розроблення програм їх удосконалення;
- проведення акредитації метрологічних служб, вимірювальних, випробувальних, аналітичних та інших лабораторій на право виконання метрологічних робіт;
- організація і здійснення підготовки кадрів у галузі метрології та підвищення їх кваліфікації.

Задачі в області метрологічного забезпечення на галузевому рівні вирішують відомчі метрологічні служби відповідних міністерств та відомств:

- вибір номенклатури параметрів матеріалів, виробів, процесів, які підлягають оцінці при вимірюваннях, випробуваннях і контролі;
- вибір номенклатури і числових значень показників точності результатів вимірювань, випробувань і контролю, форм їх представлення, що забезпечують оптимальне рішення задач, для яких ці результати призначені;
- метрологічна експертиза проектної, конструкторської і технологічної документації з метою контролю правильності результатів рішень двох попередніх задач;
- планування процесів вимірювань, випробувань і контролю, розробка методик вимірювань, випробувань і контролю;
- забезпечення процесів вимірювань, випробувань і контролю відповідними технічними засобами;
- підтримка технічних засобів в метрологічно-справному стані;
- виконання процесів вимірювань, випробувань і контролю, опрацювання результатів вимірювань, випробувань і контролю.

Додаткову групу задач метрологічного забезпечення вирішують різні категорії спеціалістів, виробничі підрозділи і колективи:

- ***вибір раціональної номенклатури вимірювальних величин, параметрів*** - конструктори, розробники нових матеріалів, виробів або процесів на основі вивчення і моделювання їх властивостей;
- ***вибір норм точності*** - “споживачі” вимірювальної інформації, тобто ті, для кого призначені і хто буде виготовляти, обмінюватися чи використовувати нові речовини, вироби чи процеси;
- ***метрологічну експертизу*** - професійно-підготовлені групи експертів, в які входять конструктори, технологи та спеціалісти відомчих метрологічних служб;
- ***планування і проведення вимірювань, випробувань і контролю*** - науково-технічний персонал, що розробляє і здійснює технологічні процеси виготовлення виробів і матеріалів;
- ***забезпечення процесів вимірювань, випробувань і контролю технічними засобами в централізованому порядку*** - міністерства (відомства), які є розробниками ЗВТ, випробувань і контролю;
- ***підтримка технічних засобів в справному стані*** - підприємства і організації, які здійснюють ремонт ЗВТ, випробувань і контролю.

Єдність і точність вимірювань

Можливість застосування результатів вимірювання для правильного і ефективного вирішення будь-якої вимірювальної задачі визначається наступними трьома умовами:

- результати вимірювань виражають в узаконених одиницях і (чи) формах;
- відомі (з необхідною заданою достовірністю) значення показників точності цих результатів;
- значення показників точності забезпечують оптимальне (у відповідності з вибраними критеріями оптимальності) рішення задачі, для якої результати призначені.

Якщо результати вимірювань задовольняють першим двом умовам, то про них відомо все, що необхідно знати для прийняття обґрунтованого рішення про можливість їх використання. Такі результати можна співставляти. В цьому випадку можна сказати, що забезпечено єдність вимірювання.

Третя з вказаних вище умов визначає **специфічні вимоги до точності застосовуваних методів і ЗВТ**, насамперед:

1. Точність результатів технічних вимірювань може бути достовірно оціненою на основі попереднього аналізу можливих причин і джерел похибок вимірювань і апріорної оцінки значень цих похибок.
2. Реальна точність технічних вимірювань обумовлюється не тільки інструментальними, а й методичними похибками, пов'язаними з використанням непрямих вимірювань, погорсткішанням умов застосування приладів, динамічними та іншими властивостями об'єктів вимірювань і т.д.

Отже, для забезпечення єдності вимірювань необхідно створити і регламентувати такі правила підготовки і проведення вимірювань, опрацювання і оформлення їх результатів, дотримання яких гарантує певну точність всіх виконуваних за даними правилами вимірювань.

Повірка засобів вимірювальної техніки

Надійність ЗВТ визначається їхньою здатністю витримувати **метрологічні параметри** в регламентованих межах. Вихід за ці межі класифікується як метрологічна відмова. Відповідність метрологічних характеристик їх нормованим значенням встановлюють у процесі повірки засобів вимірювальної техніки.

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

Зразковий засіб вимірювальної техніки – засіб вимірювальної техніки, який служить для повірки інших засобів вимірювальної техніки (вимірювання) і затверджений як зразковий.

Повірку здійснюють органи державної і відомчої служби. **Державна повірка** здійснюється органами державної метрологічної служби засобів вимірювальної техніки, які використовуються у сферах, що підлягають метрологічному нагляду. **Відомча повірка** здійснюється метрологічними відомчими службами ЗВТ, що не підлягають державній повірці.

Види перевірки:

- Первинна перевірка виконується вперше після виготовлення ЗВТ або після ремонту, також при імпорті партіями.
- Періодична перевірка виконується протягом експлуатації ЗВТ через встановлений проміжок часу (міжповірочний інтервал).
- Позачергова перевірка ЗВТ здійснюється до терміну чергової періодичної перевірки.
- Інспекційна перевірка ЗВТ виконують, здійснюючи державний нагляд.
- Вибіркова перевірка групи ЗВТ, що вибрані з партії встановленим чином, виконується за результатами, які визначають придатність усієї партії.

Методи повірки:

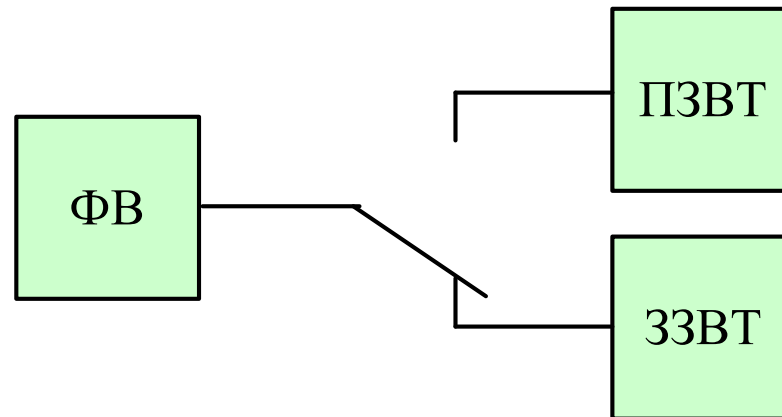
1. Поелементна повірка, під час якої метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки визначають за метрологічними характеристиками їх окремих частин.

При поелементній повірці визначають метрологічні характеристики кожного вимірювального перетворювача. Потім на основі відомих функціональних залежностей між вимірювальними перетворювачами визначають сумарні метрологічні характеристики повірюваного засобу. Поелементна повірка досить складна і трудомістка.

2. Комплектна повірка, під час якої метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки визначають як для єдиного цілого без визначення метрологічних характеристик окремих її частин.

Комплектна повірка може здійснюватися декількома методами

1.Метод зразкових приладів. В основу даного методу покладено одночасне вимірювання фізичної величини повірюваним (ПЗВТ) і зразковим (ЗЗВТ) засобами вимірювальної техніки. При цьому оператор має встановити, що на зразковий і повірюваний засіб діє одна й та ж інтенсивність фізичної величини.



Метод зразкових приладів застосовується в автоматизованих системах зразкових приладів, що мають відомі і стабільні метрологічні характеристики.

Точність зразкового засобу має бути в 3-5 разів вищою, ніж точність повірюваного засобу.

2. Метод зразкових мір. У цьому методі похибка повірюваного засобу визначається шляхом зіставлення дійсного значення міри (М) із дійсним значенням ПЗВТ.

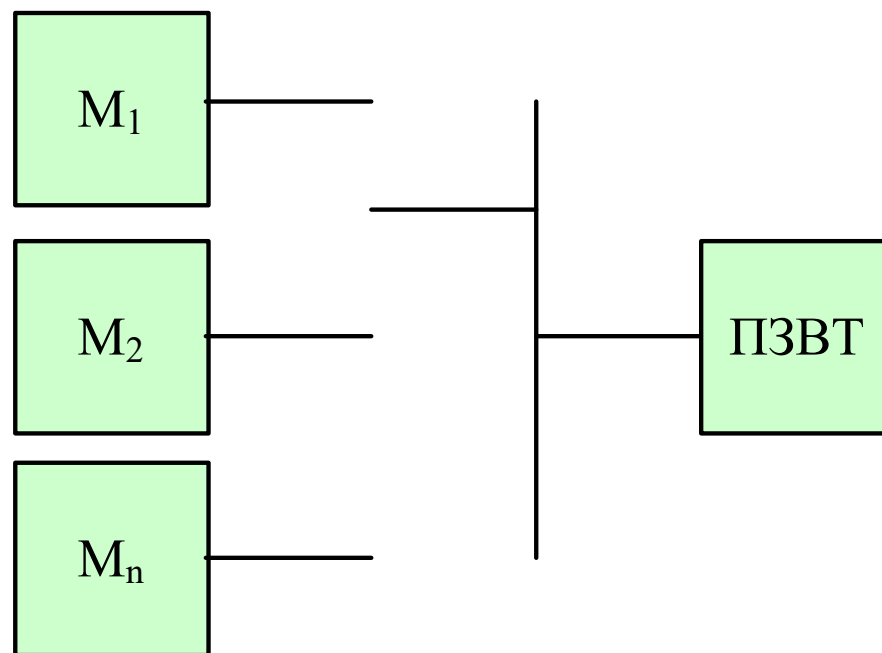
Повірка мір здійснюється декількома способами:

- шляхом порівняння за допомогою компаратора ПП вихідної величини міри і зразкової міри (ЗМ) для визначення систематичної складової похибки;

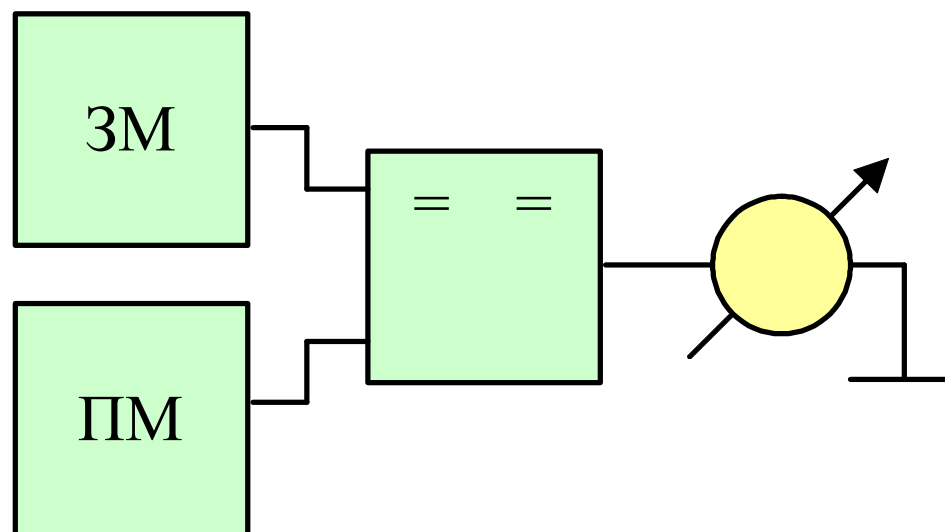
- прямим вимірюванням величини, що відтворює повірювана міра (ПМ), вимірювальним приладом більш високої точності;

- опосередкованим вимірюванням;

- калібруванням набору мір шляхом сукупних вимірювань.



3.Метод зіставлення. Під час такої повірки зразкова міра зіставляється з повірюваною за допомогою спеціального зразкового компаратора відповідного типу і класу.

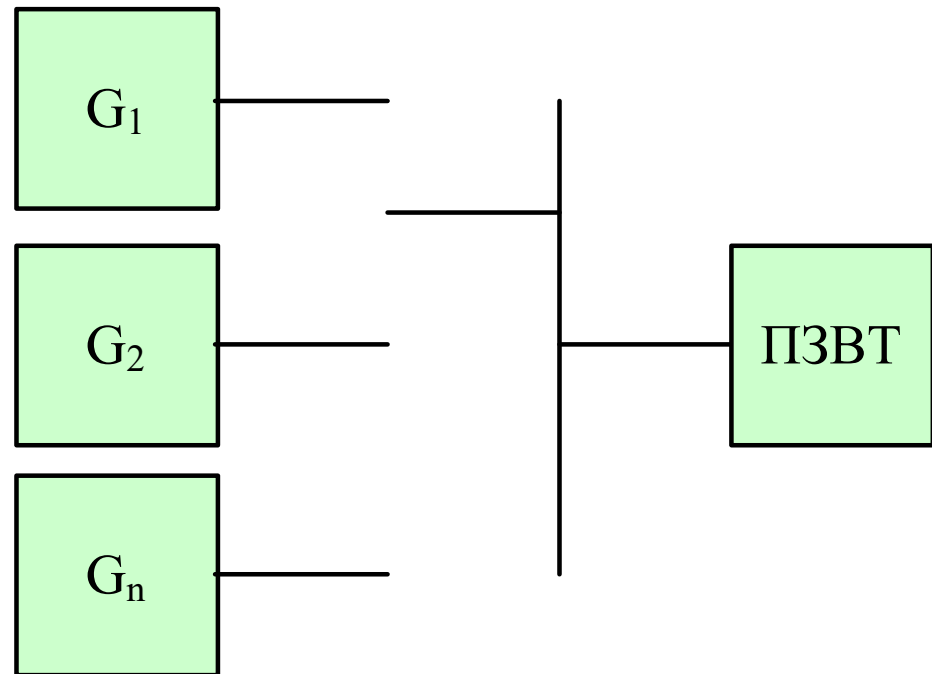


При автоматизації повірочних робіт одним з актуальних є питання вибору методу повірки автоматизованих засобів вимірювальної техніки. В основу побудови систем для автоматизації метрологічних випробувань можуть бути покладені методи зразкових приладів або зразкових сигналів (мір).

4. Метод зразкових сигналів є розвитком методу зразкових мір.

Характерною рисою даного методу перевірки є наявність у вимірювальній автоматизованій системі програмно-керованих пристроїв (генераторів) формування зразкових сигналів, що мають відомі стабільні метрологічні характеристики.

Первинні вимірювальні перетворювачі (сенсори) при експериментальному визначенні метрологічних характеристик вимикають, а їх функціонування імітують генератори. Генератор забезпечує формування на вході системи електричних сигналів, які відповідають точкам діапазону вимірювань.



Державна система забезпечення єдності вимірювань

Державна система забезпечення єдності вимірювань встановлює вимоги до еталонів одиниць фізичних величин і до системи передачі розміру одиниці кожної величини до робочого засобу вимірювання.

Стан вимірювань, за якого їхні результати виражаються в узаконених одиницях і похибки вимірювань відомі із заданою ймовірністю, забезпечує **повірочна схема**.

Еталон - засіб вимірювальної техніки, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці фізичної величини і передавання її розміру відповідним засобам, що стоять нижче за повірочною схемою, офіційно затверджений як еталон.

Повірочна схема - нормативний документ, що регламентує метрологічну підпорядкованість засобів вимірювальної техніки, які беруть участь у передаванні розміру одиниці фізичної величини від еталону або вихідного зразкового засобу вимірювальної техніки до інших засобів вимірювань із встановленням методів і похибок передавання.

Приклад державної повірочної схеми

Еталони

- 1 - державний еталон;
- 3 - еталон-копія;
- 4 - еталон-порівняння;
- 5 - робочий еталон

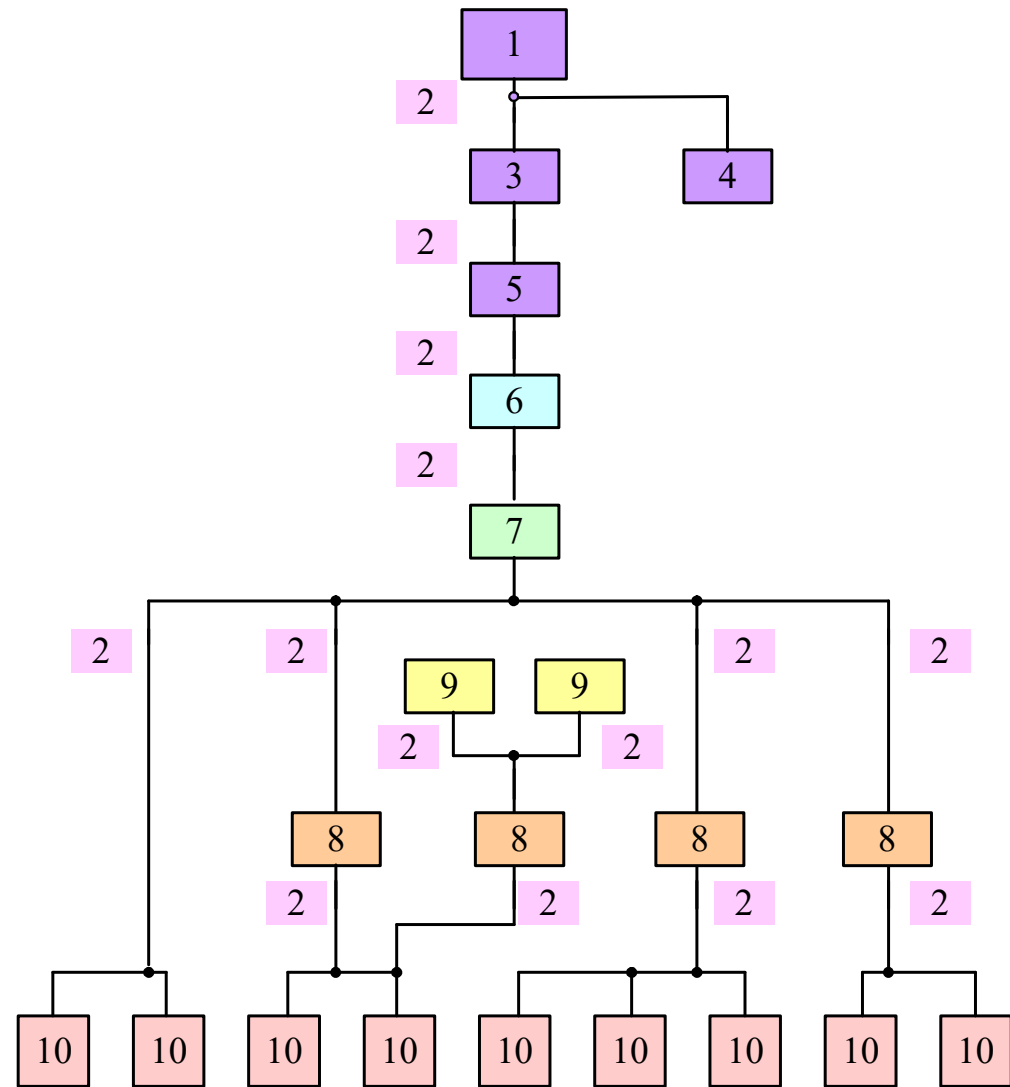
Зразкові засоби вимірювань 1-го розряду

Зразкові засоби вимірювань 2-го розряду

Зразкові засоби вимірювань, запозичені з інших повірочних схем

Зразкові засоби вимірювань 3-го розряду

Робочі засоби вимірювання



2 - метод передачі розміру одиниці

Державний еталон - еталон, що забезпечує відтворення та (або) зберігання одиниці фізичної величини з найвищою в країні точністю

Повірочна схема призначена в загальному випадку для передачі розмірів одиниць величини від державних еталонів до об'єктів повірки з забезпеченням можливості проведення метрологічних випробувань засобів різних класів точності, в основу її побудови закладено **багатоступеневий принцип**, тобто **повірочна схема повинна мати у своєму складі не менше ніж два ступеня передачі розміру одиниці величини**.

Передавання розміру одиниці полягає в зведенні одиниці фізичної величини, яка відтворюється або зберігається засобом вимірювань, що повіряється, до розміру одиниці, що відтворюється або зберігається еталоном, зразковим засобом вимірювань, яке здійснюється при їх звіренні (повірці).

Зразковим називають засіб вимірювальної техніки, який служить для перевірки інших засобів вимірювань і затверджений як зразковий.

Робочим називають засіб вимірювальної техніки, що застосовується для вимірювань, не пов'язаний з передаванням розміру одиниці фізичної величини іншим засобам.

Еталон-копія - еталон, призначений для передавання розміру фізичної величини зразковим засобам вимірювальної техніки.

Тема 3. Похибки вимірювань

Метрологія виходить із позиції, що результат вимірювання завжди відрізняється від істинного значення вимірюваної величини. Тому під час вимірювань ФВ виникає *похибка*, яка дорівнює різниці між значенням X фізичної величини та її істинним X_i значенням

$$\Delta X = X - X_i$$

Оскільки істинне значення ФВ невідоме, то похибку вимірювання з даного рівняння визначити неможливо. *Для визначення похибки істинне значення ФВ замінюють дійсним*

$$\Delta X = X - X_d$$

Абсолютна похибка вимірювання - різниця між результатом вимірювання і дійсним значенням вимірюваної величини

Абсолютна похибка виражена в абсолютних одиницях вимірюваної величини.

На практиці дійсне значення ФВ може бути знайдено:

- за допомогою багаторазових вимірювань із наступним усередненням результатів спостережень і представленням цього середнього в якості дійсного;
- за допомогою зразкового засобу вимірювання

Якщо абсолютну похибку взяти з протилежним знаком і алгебрично додати до результату вимірювання, то *можна вилучити систематичну похибку з результатів вимірювання*, або *ввести поправку в результати вимірювання*.

$$\Delta q = -\Delta X$$

Поправка - значення величини, що алгебрично додається до результату вимірювання з метою вилучення систематичної похибки

У багатьох випадках числове значення абсолютної похибки не дає правильного уявлення про точність вимірювання, ступінь достовірності одержаного результату. Тому введено більш універсальну характеристику точності у вигляді *відносної похибки*.

Відносна похибка вимірювання - відношення абсолютної похибки вимірювання до дійсного значення вимірюваної величини

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_{\text{д}}} = \frac{X - X_{\text{д}}}{X_{\text{д}}}$$

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_{\text{д}}} \cdot 100\% = \frac{X - X_{\text{д}}}{X_{\text{д}}} \cdot 100\%$$

Чим менша похибка вимірювання, тим вища його точність, отже, тим менша різниця між істинним значенням ФВ і результатом її вимірювань

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

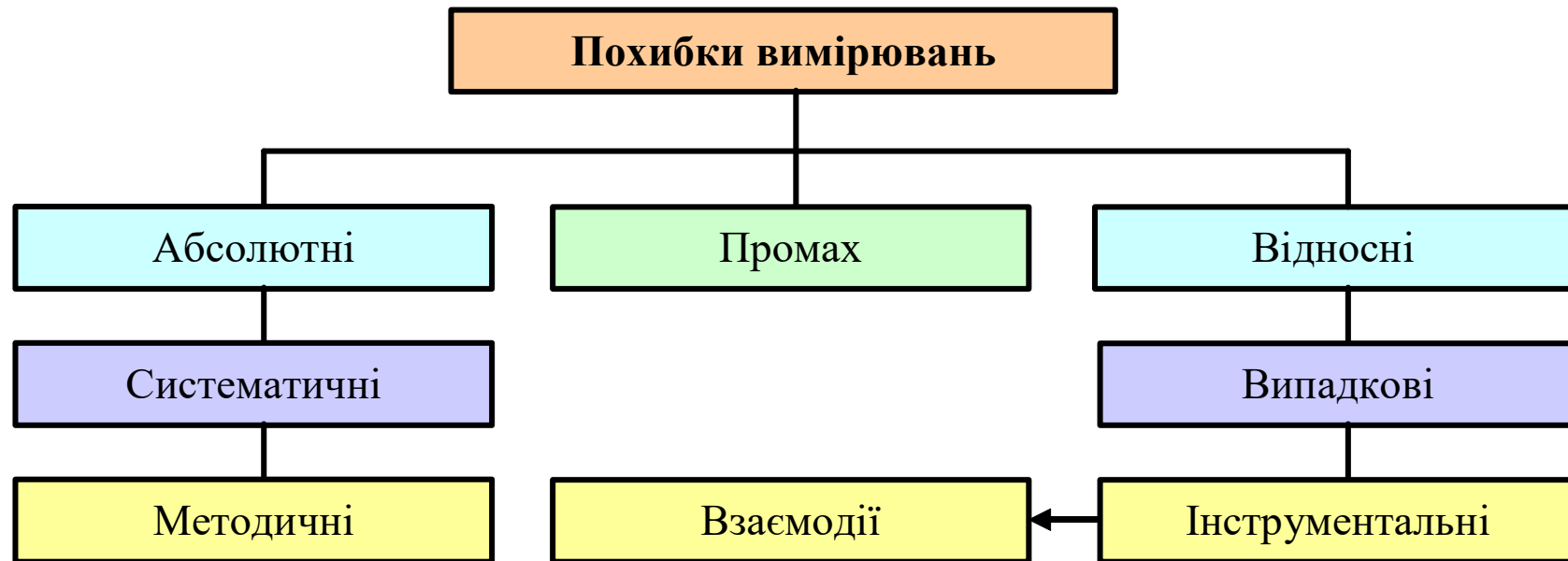
$$\Theta = \frac{1}{\delta} = \frac{X_{\text{д}}}{X - X_{\text{д}}}$$

Надмірна похибка - похибка вимірювання, що суттєво перебільшує очікувану (у даних умовах) похибку.

Промех - результат вимірювання, що має надмірну похибку

В методиках оцінки результатів вимірювань промехи вилучають із ряду багаторазових спостережень, як аномальні результати вимірювання.

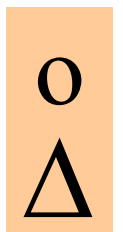
Класифікація похибок вимірювання



За способом вираження похибки поділяються на абсолютні й відносні;
за характером зміни - на систематичні і випадкові



Систематична похибка - складова похибки, що залишається сталою або прогнозовано змінюється у ряді вимірювань тієї ж величини.



Випадкова похибка - складова похибки, що непрогнозовано змінюється у ряді вимірювань тієї ж величини.

Оскільки у похибку вимірювання входить випадкова складова, то її слід вважати величиною випадковою.

$$\Delta = \overline{\Delta} + \overset{O}{\Delta}$$

Використовуючи апарат підсумовування частинних (часткових) похибок випадкового характеру і частинних (часткових) похибок систематичного характеру, можна оцінити повну похибку вимірювання.

Крім точності вимірювань застосовують характеристики якості вимірювань: *правильність*, *збіжність* та *відтворюваність* вимірювань.

Правильність вимірювань - характеристика якості вимірювання, що відображає близькість до нуля систематичної похибки вимірювання.

Збіжність результатів вимірювання - характеристика якості вимірювань, що відображає близькість повторних результатів вимірювань однієї й тієї ж величини в однакових умовах.

Збіжність результатів вимірювань відображає близькість до нуля випадкової похибки.

Збіжність може бути оцінена кількісно дисперсією результатів вимірювань.

Відтворюваність вимірювань - характеристика якості вимірювань, що відображає близькість результатів вимірювань однієї й тієї ж величини, виконаних в різний час, в різних умовах, різними методами і засобами.

Відтворюваність може бути оцінена кількісно дисперсією результатів вимірювання.

За місцем виникнення похибки вимірювання розподіляються на *інструментальні й методичні*.

Інструментальна похибка - складова похибка вимірювання, зумовлена властивостями засобів вимірювальної техніки.

Інструментальна похибка *складається з похибки засобів вимірювальної техніки та похибки від їхньої взаємодії з об'єктом вимірювання*.

Похибка від взаємодії - складова інструментальної похибки, що виникає внаслідок впливу засобів вимірювальної техніки на стан об'єкта вимірювання.

Методична похибка - складова похибки вимірювання, що зумовлена неадекватністю об'єкта вимірювання та його моделі, прийнятою при вимірюванні.

Систематичні похибки і методи їх вилучення

Повністю вилучити систематичні похибки неможливо, завжди залишаються невраховані залишки. Ці залишки необхідно врахувати, щоб оцінити межі невилученої систематичної похибки результату.

Для виявлення, оцінки і вилучення систематичних похибок необхідно:

- знати місце і причини їх виникнення,
- знати способи виявлення і вилучення цих похибок.

Залежно від причин виникнення *систематичні похибки можна розподілити на чотири групи:*

- інструментальні;
- методичні;
- суб'єктивні;
- похибки встановлення.

Похибки встановлення: такі, прояви яких зумовлені неправильним застосуванням міри: встановлення приладу з нахилом або відхилення зовнішніх умов від нормальних (наявність зовнішніх полів, відхилення температури від нормальної тощо).

Суб'єктивні похибки: проявляються в результаті особливостей самого спостерігача.

Наприклад, при підрахунку поділок шкали різні люди по-різному оцінюють одне і те саме положення стрілки.

Інструментальні похибки: зумовлені недосконалістю технології виготовлення засобів вимірювань.

Методичні похибки: виникають через недоліки самого методу вимірювання або через неточність застосованих спрощених формул.

Наприклад, при непрямому вимірюванні площі перерізу круглого стержня прямим вимірюванням діаметра з наступним обчисленням площі $S = \pi d^2/4$ результат буде із систематичною методичною похибкою через обмежене число знаків і значення числа π

За характером зміни в часі систематичні похибки поділяють на: *постійні, прогресивні, періодичні.*

Постійні похибки: такі, які тривалий час залишаються незмінними і протягом вимірювального експерименту є постійними. Часто вони носять технологічний характер і **виникають, наприклад, при недостатньо точному намотуванні котушок індуктивності, під час градування шкали і т.ін.**

Прогресивні похибки: Це такі похибки, які у процесі даної серії вимірювань неперервно зростають або зменшуються, тобто є функцією часу.

Вони можуть бути спричинені повільним зменшенням (збільшенням) напруги живлення, прогріванням приладу і іншими причинами.

Періодичні похибки: До їх числа належать систематичні похибки, значення яких є періодичною функцією або часу, або самої вимірюваної величини.

Випадкові похибки

Випадковість похибок зумовлюється:

- нестационарністю і випадковим характером вимірюваної фізичної величини;
- несталістю метрологічних характеристик засобів вимірювань, яка визначається випадковим характером формування коефіцієнтів перетворення вимірювальних пристроїв;
- випадковим характером впливу зовнішніх факторів на засіб вимірювання у процесі вимірювального експерименту.

Кількісно випадковий процес описують випадковою функцією часу $X(t)$, яка в будь-який момент часу t може набувати різних значень із деяким розподілом імовірностей. Для будь-якого t_i значення $X_i = X(t_i)$ є випадковою величиною. Випадковий процес визначається сукупністю проявів процесу в часі і законами цієї сукупності.

Функціональна залежність проявів процесу називається *реалізацією випадкової функції*.

Для характеристики частоти появи випадкових похибок теорія ймовірностей пропонує використовувати *закони розподілу*. При цьому виділяється два види опису законів розподілу: *інтегральний* і *диференціальний*.

Інтегральним законом розподілу або функцією розподілу ймовірностей $F(x)$ випадкової величини X називають функцію, значення якої для кожного x є ймовірністю події, яка полягає в тому, що випадкова величина X приймає значення менші x

$$F(x) = P\{X < x\}$$

Дана функція є неспадною функцією x і змінюється в межах:

$$F(-\infty) = 0 \quad F(+\infty) = 1$$

Вона існує для всіх випадкових величин як дискретних, так і неперервних.

Для випадкової величини з неперервною і диференційованою функцією розподілу $F(x)$ можна знайти *диференціальний закон розподілу ймовірностей як похідну від $F(x)$*

$$p(x) = F'(x)$$

Ця залежність називається *густиною розподілу ймовірностей*. Вона завжди позитивна і відповідає умові нормування

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) dx = 1$$

Розподіл Гаусса

Похибка вимірювання визначається великим числом частинних складових, що носять випадковий характер, а з **центральної граничної теореми ймовірностей** випливає, що **розподіл похибок вимірювання буде близьким до нормального, якщо результати спостережень формуються під впливом великої кількості незалежно діючих частинних похибок випадкового характеру**, кожна з яких є незначною за значенням порівняно із загальною випадковою похибкою вимірювання.

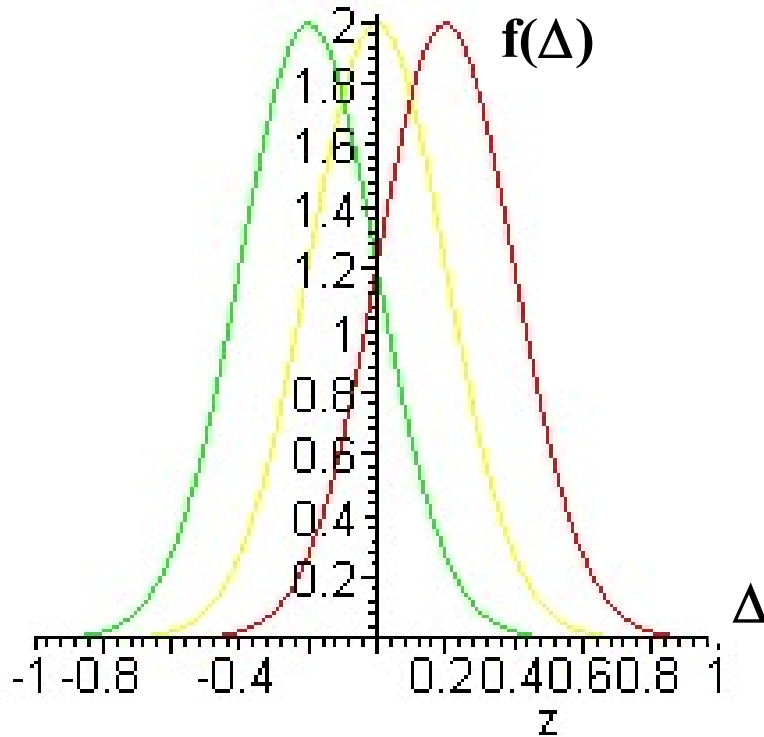
Щільність імовірностей нормального закону описується виразом

$$f(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta}{\sigma}\right)^2\right]$$

σ - середнє квадратичне відхилення

Δ - випадкова складова похибки.

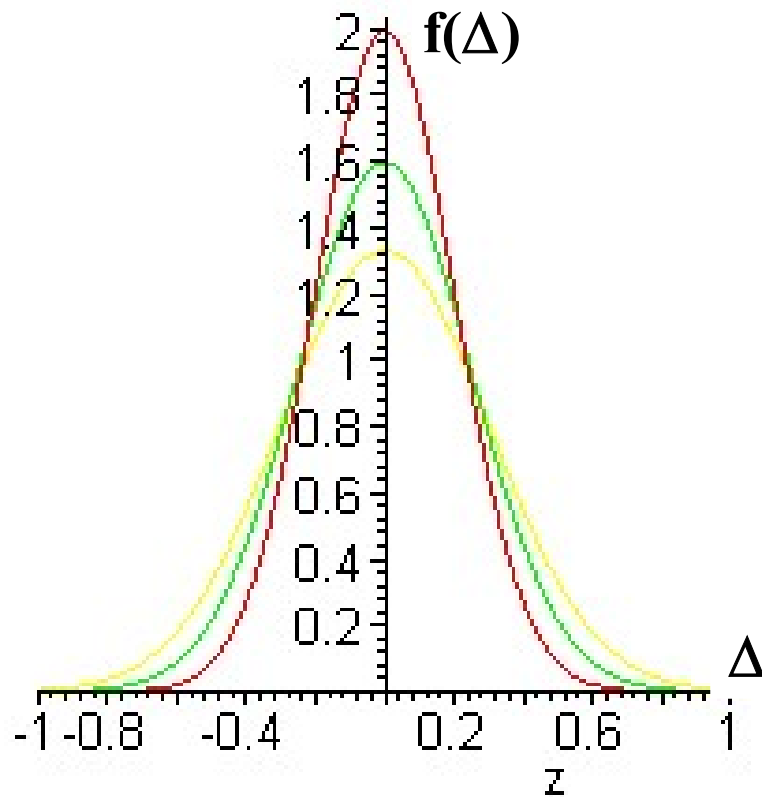
Щільність розподілу для нормального закону



$$\bar{\Delta} \neq 0$$

Крива зміщена праворуч або ліворуч від початку осі ординат на значення $\bar{\Delta}$ в залежності від знака систематичної складової похибки

Щільність розподілу для нормального закону



$$\bar{\Delta} = 0$$

Крива симетрична відносно осі ординат.

Значення σ впливає на гостровершинність кривої.

Збільшення значення σ приводить до зменшення гостровершинності, і тому ймовірніша поява великих похибок.

При зменшенні σ зростає ймовірність появи малих похибок і знижується ймовірність появи великих похибок.

Основними числовими характеристиками нормального закону розподілу є *математичне очікування і дисперсія*.

Математичне очікування похибки вимірювань є невинпадковою величиною, відносно якої розсіюються інші значення похибки при повторних вимірюваннях. **Математичне очікування характеризує систематичну складову похибки.**

Дисперсія похибки характеризує ступінь розсіювання окремих значень похибки відносно математичного очікування. Чим менша дисперсія, тим точніше виконано вимірювання. Отже, дисперсія може служити характеристикою точності вимірювань. **В зв'язку з тим, що дисперсія виражається в одиницях похибки в квадраті, то як числову характеристику точності вимірювань використовують середнє квадратичне відхилення** (квадратний корінь від дисперсії) з позитивним знаком і в одиницях вимірюваної величини.

Знання тільки середнього квадратичного відхилення не дозволяє знайти максимальну похибку, що підкреслює обмежені можливості такої числової характеристики похибки, як σ .

Максимальне значення похибки залежить не тільки від σ , але й від виду закону розподілу. Коли розподіл похибки теоретично не обмежений, наприклад, для нормального закону розподілу, **похибка може бути будь-якою за значенням.**

В цьому випадку можна говорити тільки про **інтервал, за границі якого похибка не виходить з деякою ймовірністю.** Цей інтервал **називають довірчим, а ймовірність, що характеризує його, - довірчою ймовірністю.**

Довірчий інтервал і довірчу ймовірність вибирають в залежності від конкретних умов вимірювання.

Для нормального закону розподілу випадкових похибок часто використовують довірчий інтервал від -3σ до $+3\sigma$, для якого довірна ймовірність $P=0.9973$.

Оцінка випадкових похибок прямих вимірювань

Рівноточні вимірювання - багаторазові вимірювання однієї фізичної величини в однакових умовах одним оператором і за допомогою одного і того самого засобу вимірювання. При таких вимірюваннях проявляються випадкові похибки.

При статистичній обробці результатів багаторазових вимірювань необхідно виконати таку послідовність дій:

1. Провести багаторазові вимірювання і отримати масив вимірювальної інформації:

$$X_1, X_2, \dots, X_n$$

2. Ввести поправку в результати вимірювань, вилучивши відомі систематичні похибки.

3. Знайти математичне очікування поправлених результатів спостережень і прийняти його за дійсне значення.

Для нормального закону розподілу за оцінку математичного очікування ряду рівноточних спостережень приймають середнє арифметичне

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

4. Визначити випадкове відхилення при i -му спостереженні. Воно може бути позитивною і негативною величиною.

$$g_i = X_i - \bar{x}$$

5. Обчислити експериментальне середнє квадратичне відхилення (СКВ) результатів вимірювання за формулою Бесселя

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n g_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

Параметр S характеризує розсіювання результатів багаторазових вимірювань однієї і тієї ж величини.

Оскільки обчислюється *середнє арифметичне*, необхідне для одержання оцінки σ , то *природно взяти його за результат вимірювання*. В даному випадку середнє арифметичне залежить від числа вимірювань i є випадковою величиною, яка має деякі дисперсії відносно істинного значення.

6.Визначити середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного

$$\sigma[\bar{X}] = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Якщо в якості результату багаторазових вимірювань взяти середнє арифметичне \bar{X} , то випадкова похибка S зменшується в \sqrt{n} раз порівняно з випадком, коли за результат багаторазових вимірювань приймалось будь-яке одне з n спостережень

7.Визначити довірчі границі похибки вимірювання, що являють собою верхню й нижню межі, які накривають із заданою ймовірністю похибку вимірювання.

Якщо число вимірювань $n \leq 20 \dots 30$, то довірчий інтервал випадкової похибки при заданих імовірності P і середньому квадратичному відхиленні $\bar{\sigma}[\bar{x}]$ визначається за формулою Стюдента

$$\Delta_{\text{д}} = \pm k_t \cdot \bar{\sigma}[\bar{x}]$$

k_t - коефіцієнт розподілу Стюдента, який залежить від заданої ймовірності P і числа вимірювань n .

Як правило, приймають $P = 0.95$. Якщо вимірювання повторити неможливо, то $P=0.99$, а в особливо відповідальних випадках - $P = 0.997$.

8.Представити результат вимірювання

$$\bar{x} \pm \Delta_{\text{д}} ; P$$

Значення коефіцієнта Стьюдента

n-1	P=0.95	P=0.99	n-1	P=0.95	P=0.99
3	3.182	5.841	16	2.120	2.921
4	2.776	4.604	18	2.101	2.878
5	2.571	4.032	20	2.086	2.845
6	2.447	3.707	22	2.074	2.819
7	2.367	3.500	24	2.064	2.797
8	2.306	3.355	26	2.056	2.779
9	2.262	3.250	28	2.048	2.763
10	2.228	3.169	30	2.043	2.750
12	2.179	3.055			
14	2.145	2.977	∞	1.960	2.576

Приклад. Обробка результатів прямих вимірювань

Проведено ряд вимірювань за допомогою вольтметра магнітоелектричної системи. При цьому одержано такі результати:

122; 118; 120; 121; 119; 120 [В].

Визначити середнє значення виміряної напруги, його СКВ. Представити результат, вказавши границі довірчого інтервалу, в який потрапляє похибка вимірювання із заданою ймовірністю **P=0.95** (коефіцієнт Стьюдента дорівнює **2.571**).

1. Математичне очікування для ряду вимірювань

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i = \frac{122 + 118 + 120 + 121 + 119 + 120}{6} = 120[\text{В}]$$

2. Випадкові відхилення

$$\vartheta_1 = U_1 - \bar{u} = 122 - 120 = +2[\text{В}]$$

$$\vartheta_4 = U_4 - \bar{u} = 121 - 120 = +1[\text{В}]$$

$$\vartheta_2 = U_2 - \bar{u} = 118 - 120 = -2[\text{В}]$$

$$\vartheta_5 = U_5 - \bar{u} = 119 - 120 = -1[\text{В}]$$

$$\vartheta_3 = U_3 - \bar{u} = 120 - 120 = 0[\text{В}]$$

$$\vartheta_6 = U_6 - \bar{u} = 120 - 120 = 0[\text{В}]$$

3. Перевірка, чи сума випадкових відхилень дорівнює нулю

$$\sum_{i=1}^6 \vartheta_i = 0$$

4. Оцінка експериментального середнього квадратичного відхилення

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \vartheta_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(2)^2 + (-2)^2 + 0 + (1)^2 + (-1)^2 + 0}{6}} = 1.41[\text{В}]$$

5. Середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного

$$\overline{\sigma[u]} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{1.41}{\sqrt{6}} = 0.575[\text{В}]$$

6. Довірчі границі похибки вимірювання

$$\Delta_{\text{д}} = \pm k_t \cdot \overline{\sigma[u]} = 0.575 \cdot 2.571 = 1.48[\text{В}]$$

7. Результат у відповідності до стандартної форми

$$U = 120.00 \pm 1.48 \text{ В}, P = 0.95$$

Оцінка випадкових похибок опосередкованих вимірювань

Оцінку випадкових похибок опосередкованих вимірювань необхідно здійснювати за такою методикою:

1. Визначити для результатів прямих вимірювань \bar{x} і $\sigma[\bar{x}]$

2. Визначити значення невідомої величини

$$\bar{q} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$$

3. Визначити «вагу» кожної часткової похибки опосередкованих вимірювань

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|_{x_i = \bar{x}_i}$$

4. Обчислити часткові випадкові похибки опосередкованих вимірювань

$$\bar{e}_{x_i} = \frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot \sigma[\bar{x}_i]$$

5. Знайти оцінку СКВ результату опосередкованих вимірювань

$$\overline{\sigma}_q = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \overline{\sigma}_{x_i}^2}$$

6. Знайти коефіцієнт Стюдента за заданою довірчою ймовірністю P і кількістю вимірювань n

7. Знайти граничні значення випадкової складової похибки, яку приймають за похибку опосередкованого вимірювання

$$\Delta = \pm k_t \cdot \overline{\sigma}_q$$

8. Записати результат опосередкованого вимірювання

$$q \pm \Delta, P$$

Для визначення похибки результату опосередкованого вимірювання необхідно застосувати такі правила:

1. Якщо результат вимірювання є сумою або різницею двох і більше виміряних величин: $q = x + \dots + z - (u + \dots + w)$

і похибки $\Delta x, \dots, \Delta w$ незалежні і випадкові, то абсолютна похибка результату може бути визначена за формулою

$$\Delta q = \sqrt{(\Delta x)^2 + \dots + (\Delta z)^2 + (\Delta u)^2 + \dots + (\Delta w)^2}$$

2. Якщо кінцевий результат вимірювання є добутком або часткою двох і більше виміряних значень:

$$q = \frac{x \cdot \dots \cdot z}{u \cdot \dots \cdot w}$$

і похибки $\delta x, \dots, \delta w$ незалежні і випадкові, то відносна похибка результату опосередкованого вимірювання визначається

$$\delta q = \sqrt{(\delta x)^2 + \dots + (\delta z)^2 + (\delta u)^2 + \dots + (\delta w)^2}$$

3. Якщо результат опосередкованого вимірювання є функцією однієї

величини: $q = f(x)$

то похибка результату визначається

$$\delta q = \left| \frac{dq}{dx} \right| \delta x$$

4. В загальному випадку похибка функції декількох величин

$q = f(x, y, \dots, w)$

похибки яких незалежні і випадкові, знаходиться

$$\delta q = \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial x} \delta x \right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial y} \delta y \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial q}{\partial w} \delta w \right)^2}$$

Приклад. Обробка результатів опосередкованих вимірювань

Визначити результат та СКВ випадкової складової похибки опосередкованого вимірювання потужності $P = U^2/R$ за даними прямих вимірювань напруги та опору з незалежними випадковими похибками, що розподілені за нормальним законом:

$$U = (1.00 \pm 0.01)\text{В}; P = 0.99$$

$$R = (10.0 \pm 0.10)\text{Ом}; P = 0.997$$

Записати результат згідно зі стандартною формою, вказавши довірчий інтервал, в який потрапить похибка результату опосередкованого вимірювання із встановленою ймовірністю $P=0.99$.

1. Значення математичного очікування потужності

$$P_o = \frac{U^2}{R} = \frac{1.00}{10.0} = 0.1(\text{Вт})$$

2. СКВ результату опосередкованого вимірювання потужності

$$\sigma_P = \sqrt{\left(\frac{\partial P_o}{\partial U}\right)^2 \sigma_U^2 + \left(\frac{\partial P_o}{\partial R}\right)^2 \sigma_R^2} = \sqrt{\left(\frac{2U}{R}\right)^2 \sigma_U^2 + \left(-\frac{U^2}{R^2}\right)^2 \sigma_R^2}$$

За значеннями нормованої функції Лапласа знайти значення z та визначити СКВ результатів прямих вимірювань напруги

$$\Phi(z_U) = \frac{P}{2} = \frac{0.99}{2} = 0.485 \Rightarrow z_U = 2.2; \quad \bar{\sigma}_U = \frac{\Delta_U}{z_U} = \frac{0.01}{2.2} = 0.0045 \text{ (В)}$$

$$\Phi(z_R) = \frac{P}{2} = \frac{0.997}{2} = 0.499 \Rightarrow z_R = 3.1; \quad \bar{\sigma}_R = \frac{\Delta_R}{z_R} = \frac{0.1}{3.1} = 0.03 \text{ (Ом)}$$

Значення СКВ опосередкованого вимірювання потужності складає

$$\bar{\sigma}_P = \sqrt{\left(\frac{2U}{R}\right)^2 \bar{\sigma}_U^2 + \left(-\frac{U^2}{R^2}\right)^2 \bar{\sigma}_R^2} = \sqrt{\left(\frac{2}{10}\right)^2 \cdot (0.0045)^2 + \left(-\frac{1}{10^2}\right)^2 \cdot (0.03)^2} \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ (Вт)}$$

3. Границі довірчого інтервалу для заданої ймовірності $P=0.99$. $z_p = 2.2$

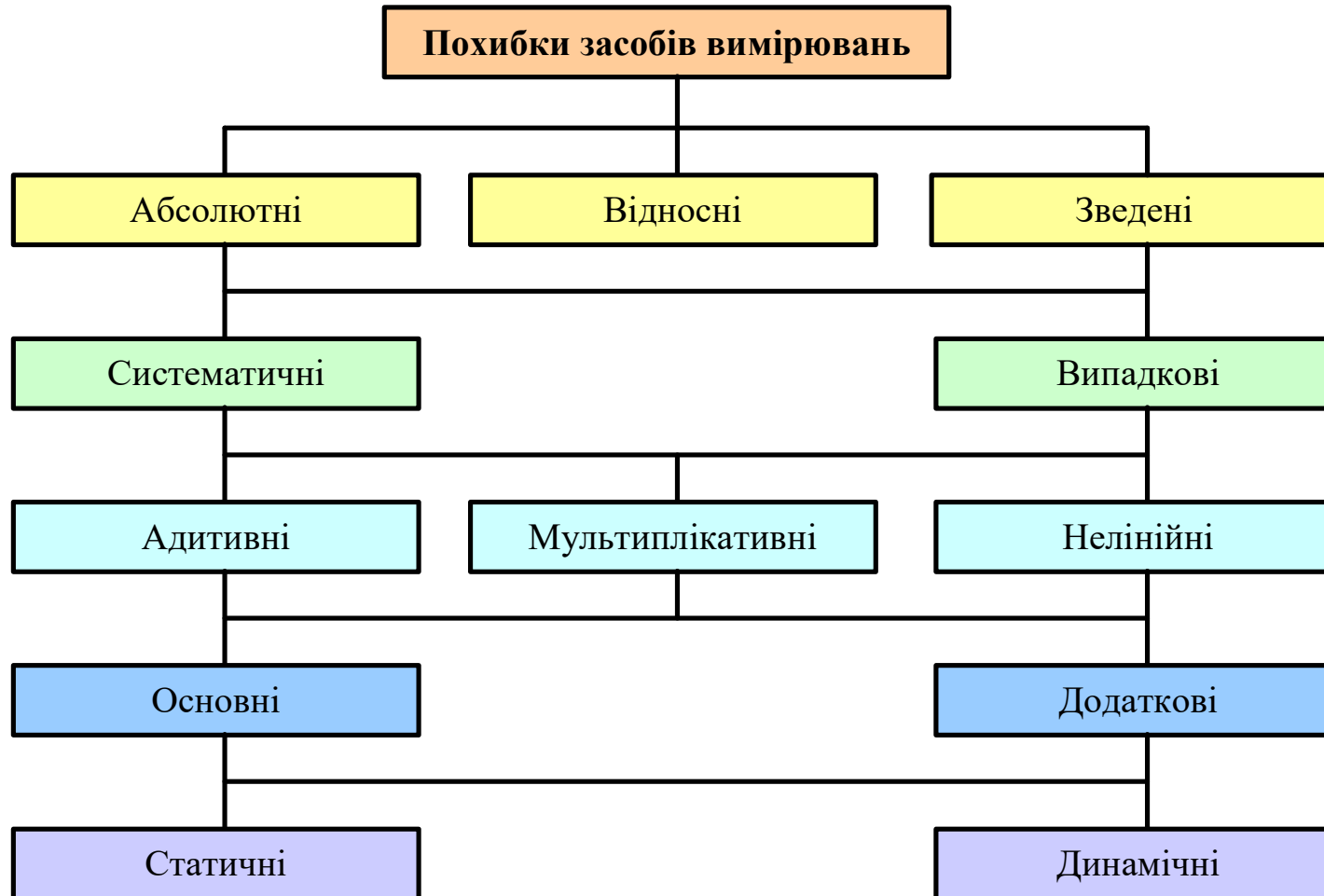
Границі довірчого інтервалу становлять $\Delta_p = \pm z_p \cdot \bar{\sigma}_p = \pm 2.2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 0.0066 \text{ (Вт)}$

4. Результат опосередкованого вимірювання потужності

$$P_o = (0.1000 \pm 0.0066) \text{ Вт}; \quad P = 0.99$$

Похибки засобів вимірювань

Похибки засобів вимірювань дозволяють кількісно оцінити інструментальну похибку вимірювань.



За способом вираження похибки засобів вимірювальної техніки поділяють на абсолютні, відносні та зведені

Абсолютною похибкою засобу вимірювань називають різницю між показом засобу вимірювань та істинним значенням вимірюваної величини за відсутності методичних похибок і похибок від взаємодії засобу вимірювань з об'єктом вимірювання

$$\Delta_{зв} = X_{зв} - X_i$$

Умови відсутності методичних похибок вимірювання і похибок від взаємодії засобу вимірювань з об'єктом вимірювання створюються під час повірки.

В метрологічній практиці визначають приблизне значення похибки засобу вимірювань, тобто її оцінку.

Оцінка похибки засобу вимірювань це різниця між показом засобу вимірювань і умовно істинним значенням вимірюваної величини.

Відносною похибкою засобу вимірювань називають відношення абсолютної похибки засобу вимірювань до істинного значення вимірюваної величини

$$\delta_{зв} [\%] = \frac{\Delta_{зв}}{X_i} \cdot 100\%$$

Зведеною похибкою засобу вимірювань називають відношення абсолютної похибки засобу вимірювань до нормованого значення

$$\gamma [\%] = \frac{\Delta_{зв}}{X_H} \cdot 100\%$$

Похибки засобів вимірювань містять ряд систематичних і випадкових складових, статичні та динамічні похибки, які визначаються аналогічно визначенням похибок вимірювань.

В залежності від типу шкали засобу вимірювань виділяють декілька методів визначення нормованого значення.

1. Якщо засіб вимірювань має рівномірну шкалу, то в якості нормованого значення X_H необхідно вибирати верхню межу вимірювань при знаходженні нульової відмітки на початку шкали.
2. Нормоване значення X_H дорівнює сумі модулів меж вимірювань, якщо нульова відмітка шкали знаходиться в середині діапазону вимірювань.
3. Для багатомежевих засобів вимірювань значення X_H дорівнює різниці меж вимірювань.
4. Якщо засіб вимірювань має істотно нерівномірну шкалу, то за нормоване значення приймають довжину шкали або її частини, яка відповідає діапазону вимірювань.

Залежно від того, в яких умовах експлуатується засіб вимірювань, розрізняють основну (для нормальних умов) і додаткову (якщо одна або більше впливних величин виходять за межі нормальних умов) похибки.

Основна похибка - похибка засобу вимірювальної техніки за нормальних умов його використання.

Умови застосування засобів вимірювальної техніки, за яких впливні величини мають нормальні значення чи знаходяться у границях нормального інтервалу значень, називають *нормальними умовами застосування*.

Нормальне - це значення впливної величини, для якого (у межах якого) нормується основна похибка засобів вимірювальної техніки.

Умовами застосування засобів вимірювальної техніки називають такі, за яких значення впливних величин знаходяться у границях робочої зони.

Робоча зона значень впливних величин - це зона, що встановлюється для засобів вимірювань, в межах якої за необхідністю нормуються додаткові похибки цих засобів.

Додаткова похибка – похибка засобу вимірювальної техніки, яка додатково виникає під час використання засобу вимірювань в умовах відхилення хоча б однієї з впливних величин від нормального значення або її виходу за границі нормальної зони значень.

Щоб наперед оцінити похибку, яку внесе дане устаткування в кінцевий результат, користуються нормованими значеннями похибки.

Під *нормованим значенням* розуміють *похибки*, які є граничними для даного типу засобів вимірювань.

Стандартами регламентуються способи нормування і форми вираження допустимих границь похибок.

Границею допустимої похибки засобу вимірювань називають найбільше значення без урахування знаку похибки засобу вимірювань, за яким цей засіб ще може бути визнаний придатним до застосування.

Границі допустимих абсолютної, відносної і зведеної похибок засобів вимірювань можуть виражатись одним числом

$$\Delta_{\text{Н}} = \pm a; \quad \delta_{\text{Н}} = \pm q; \quad \gamma_{\text{Н}} = \pm p$$

де a - додатне число, незалежне від x ;

q , p - абстрактні додатні числа, вибрані з ряду

$$[1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0] \cdot 10^n,$$

n може набувати значень 1; 0; -1; -2;

Границі допустимих абсолютної і відносної похибок можуть також виражатися у вигляді лінійної функції

$$\Delta_{\text{ЗВ}} = \pm(a + b \cdot x)$$

a , b - додатні числа, незалежні від x

Перший доданок представленої функції позначається Δa і характеризує адитивну похибку (похибку нуля, незалежну від x), а другий доданок позначається Δm і характеризує мультиплікативну похибку, залежну від x . Дану складову похибки називають ще похибкою чутливості.

Адитивна похибка - складова абсолютної похибки засобу вимірювальної техніки, яка не залежить від вимірюваної величини.

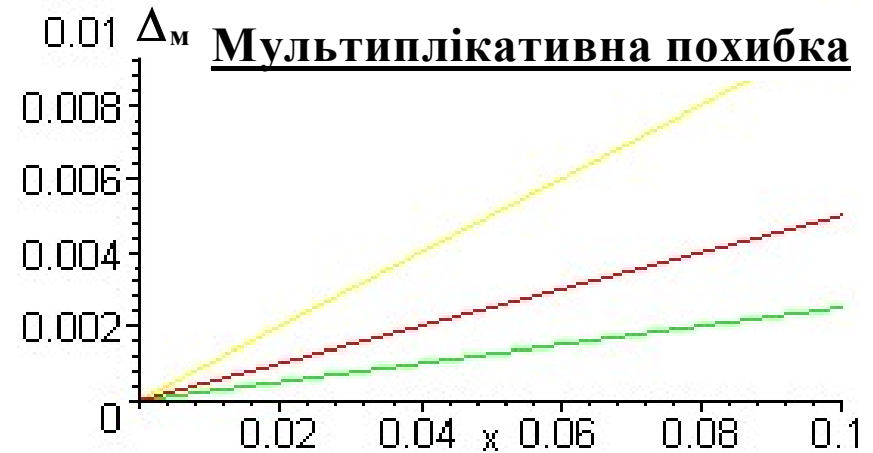
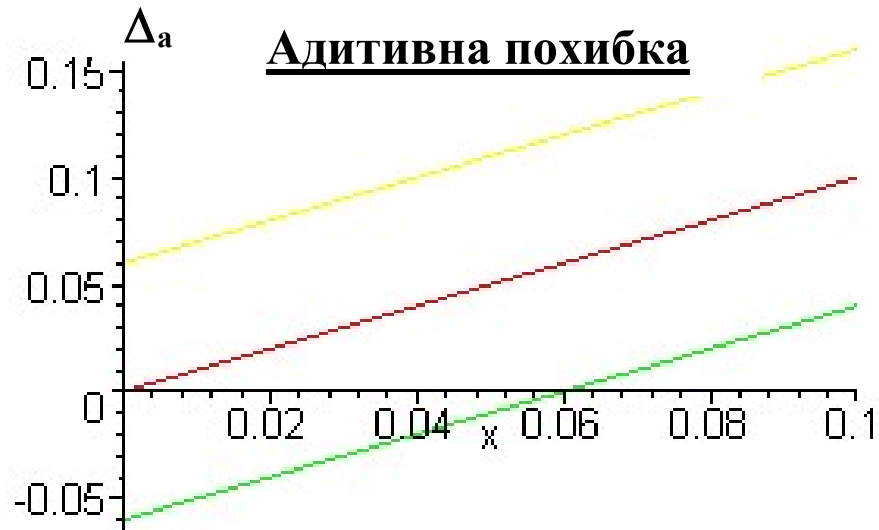
Мультиплікативна похибка - складова похибки засобу вимірювальної техніки, яка пропорційна вимірюваній величині.

Похибка нелінійності - складова похибки засобу вимірювальної техніки, яка змінюється нелінійно в діапазоні зміни вимірюваної величини.

Для нормування похибок засобів вимірювальної техніки з адитивною і мультиплікативною похибками найбільш поширеною є формула виду

$$\delta_H = \pm \left[c + d \cdot \left(\left| X_H / X \right| - 1 \right) \right]$$

c, d - постійні числа



Якщо показання приладу, границя допустимої похибки якого нормована, дорівнює верхній межі вимірювання $X = X_H$, то

$$\delta_H = \pm c$$

Отже коефіцієнт c є границя допустимої відносної похибки при максимальному показі приладу

Залежність для границі допустимої абсолютної похибки

$$\Delta_H = \pm \frac{1}{100} \cdot [d \cdot X_H + (c - d) \cdot X]$$

Якщо покази приладу рівні нулю, другий доданок у квадратних дужках дорівнює нулю. Отже **коефіцієнт d є межа допустимої похибки при нульовому показі приладу, яка виражена у відсотках до верхньої межі вимірювання.**

Різниця коефіцієнтів $(c - d)$ характеризує зростання абсолютної похибки при зростанні показів приладу

Відношення $X_H/X - 1$ характеризує зростання відносної похибки при зменшенні показів приладу.

Метрологічні характеристики засобів вимірювань

Метрологічні характеристики - технічні характеристики засобів вимірювальної техніки, що впливають на результати і похибки вимірювань.

Від точності характеристик при виготовленні засобів вимірювань, стабільності їх в процесі експлуатації залежить точність результатів вимірювань.

Метрологічні характеристики, які встановлюються нормативно-технічною документацією (НТД) *називаються нормованими*. Залежно від виду, призначення, умов застосування засобів вимірювальної техніки нормується певний комплекс характеристик.

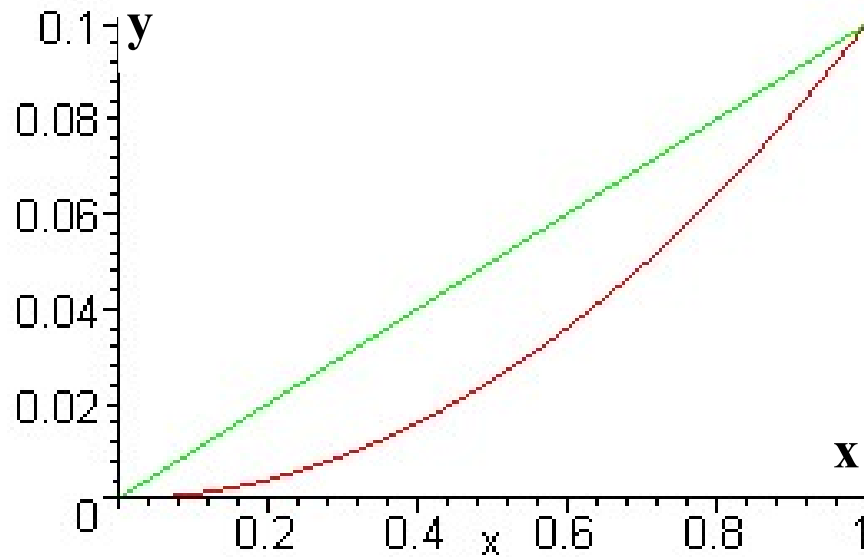
Функція перетворення вимірювального приладу (градуювальна характеристика, рівняння перетворення) - залежність між вихідним сигналом приладу Y і його вхідним сигналом X :

$$Y = f(X)$$

Функція перетворення, яку повинен мати вимірювальний прилад, за певних (нормальних) умовах зовнішнього середовища і незмінних значеннях вхідного сигналу (або таких, що повільно змінюються) називається *номінальною статичною характеристикою перетворення*. Ця функція може бути представлена аналітично, графічно або у вигляді таблиці.

Ідеальна функція перетворення представляє лінійну залежність, але під дією тих чи інших причин вона може змінювати свій вигляд.

Функція перетворення пов'язує конструктивні параметри приладу з величинами X і Y .



Графічне подання функції перетворення називають **статичною характеристикою**

Чутливість вимірювального приладу - характеризує здатність приладу реагувати на зміни вхідного сигналу. Чутливість визначається з рівняння перетворення і являє собою відношення зміни сигналу ΔY на виході приладу до викликає його зміни сигналу ΔX на вході приладу

$$S = \Delta Y / \Delta X$$

При лінійному рівнянні перетворення

$$S = Y / X$$

Відносна чутливість:

$$S = \frac{\Delta Y}{Y} / \frac{\Delta X}{X} = \frac{\Delta Y \cdot X}{\Delta X \cdot Y}$$

Поріг чутливості - зміна вхідного сигналу, що викликає найменшу зміну вихідного сигналу, яка може бути виявленою спостерігачем за допомогою даного приладу без додаткових пристроїв. Поріг чутливості визначає фактичну роздільну здатність вимірювального приладу.

Зона нечутливості - діапазон значень вимірюваної величини, в межах якого її зміни не викликають зміни показу засобу вимірювань.

Ціна поділки шкали вимірювального приладу (або постійна приладу) - різниця значень величин, що відповідають двом сусіднім позначкам шкали. Вона пов'язана з чутливістю залежністю

$$C = 1 / S = \Delta X / \Delta Y$$

Чутливість і ціна поділки - величини іменовані. Зазвичай говорять про чутливості приладу якийсь величині (напрузі, струму, опору тощо).

Наприклад, $S = 5$ под./В; $C = 0,2$ В/под.

Діапазон вимірювань - область значень вимірюваної величини, для якої нормовані допустимі похибки засобів вимірювань. Ця область обмежена ***межами вимірювань*** - найбільшим і найменшим значеннями діапазону вимірювань. Діапазон вимірювань може складатися з декількох піддіапазонів з різними похибками.

Показ - значення величини, що визначається за відліковим пристроєм приладу і виражене в прийнятих одиницях цієї величини.

Діапазон показів - область значень, обмежена початковим і кінцевим значеннями шкали (може не збігатися з діапазоном вимірювань).

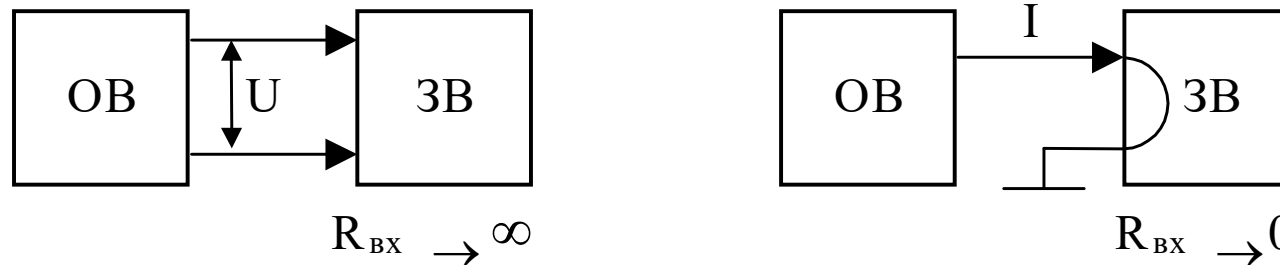
Варіація показів - найбільша можлива різниця між окремими повторними показами приладу, відповідними одному і тому ж дійсному значенню вимірюваної величини при незмінних зовнішніх умовах. *Варіація характеризує стійкість показань приладу.*

У вимірювальній практиці широко використовується також термін "*повний діапазон*", під яким розуміють відношення верхньої межі вимірювання до порогу чутливості

$$D = \frac{X_{\max}}{X_{\Pi}}$$

Вхідний і вихідний опір. При вимірюванні об'єкт і засіб вимірювання взаємодіють. Однак при такій взаємодії вимірювальна інформація, що отримується від об'єкта вимірювання, не повинна спотворюватись. У цьому плані засоби вимірювання характеризуються вхідним і вихідним опорами (імпедансами).

Вхідний опір може бути як великим, так і малим, в залежності від властивостей об'єкта, умов вимірювання, значення вимірюваної величини і методу вимірювання.



Великий вхідний опір необхідний тоді, коли вихідний сигнал від попереднього перетворювача або об'єкта вимірювання формується у вигляді напруги (**вимірювання напруги вольтметром**). Чим більшим буде опір вольтметра, тим меншою буде похибка взаємодії.

Малий вхідний опір необхідний тоді, коли вихідний сигнал від попереднього перетворювача або об'єкта вимірювання формується у вигляді струму. При **вимірюванні сили струму амперметром** похибка взаємодії буде тим меншою, чим менший його вхідний опір .

Вид вихідного коду - число розрядів коду (ціна одиниці найменшого розряду коду приладу), призначене для видачі результатів в цифровому вигляді.

Область робочих частот - смуга частот, в межах якої похибка приладу, викликана зміною частоти, не перевищує допустимої межі.

Швидкодія - час, що витрачається на один вимір.

Для аналогових приладів швидкодія визначається часом встановлення показів (часом заспокоєння) - проміжком часу з моменту зміни вимірюваної величини до моменту встановлення показів приладу.

Для цифрових приладів швидкодія визначається як відношення числа вимірювань n за деякий проміжок часу t до цього проміжку часу:

$$B = n / t$$

Клас точності

Узагальненою характеристикою засобу вимірювальної техніки є клас точності, що визначається границями його допустимих основної і додаткових похибок, а також іншими характеристиками, що впливають на його точність, значення яких регламентується.

Клас точності характеризує точність засобу вимірювань, але не є безпосередньою характеристикою точності вимірювання, виконаного за допомогою даного засобу вимірювань.

В основу присвоєння класу точності береться основна похибка засобу вимірювань і спосіб її вираження. Якщо основна похибка виражається в одиницях вимірюваної величини або в поділках шкали, то класи точності позначають порядковими номерами. Номери визначаються відповідними стандартами.

Залежно від ступеня точності показів вимірювальні прилади поділяються на класи, що позначаються відповідно числами:

0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0

1) *Для засобів вимірювання, відлікові пристрої яких градууються у логарифмічних одиницях, позначення класів точності збігається з граничними значеннями допустимих похибок.*

Наприклад, якщо границя допустимої похибки становить ± 1 дБ, то клас точності позначають: Кл. 1,0 дБ.

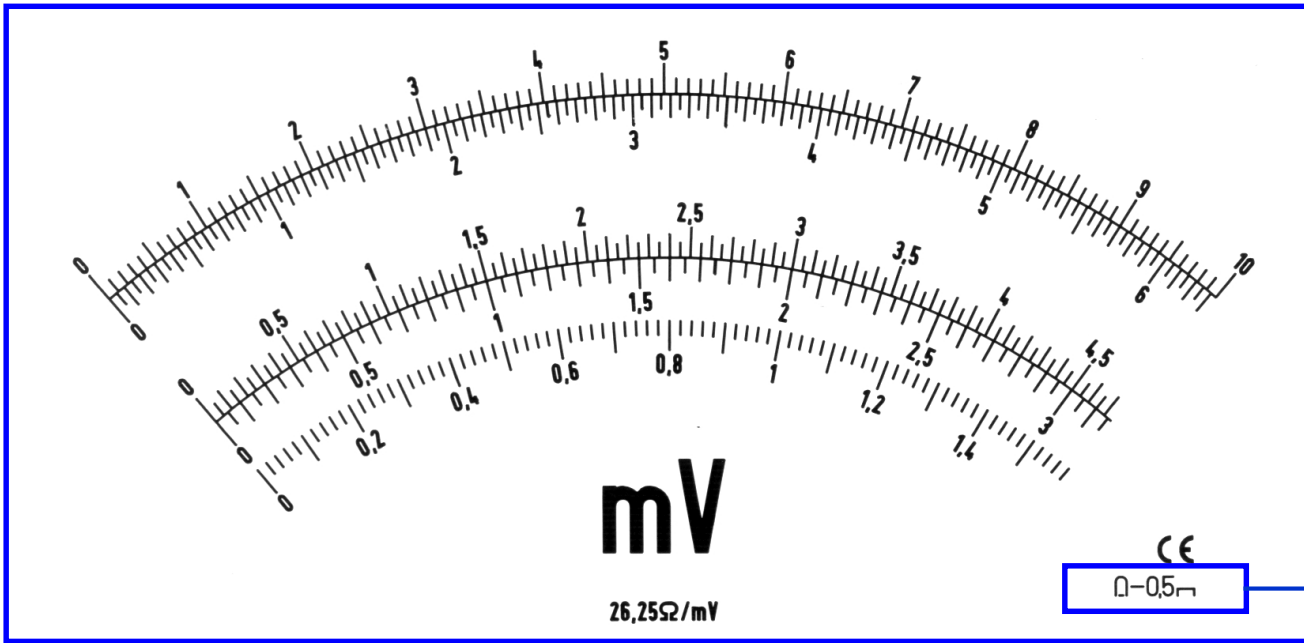
2) *Якщо границі допустимої основної похибки задаються відносною або зведеною похибкою, то позначення класів точності вибирають із наведеного раніше ряду.*

3) *Якщо границі допустимої основної похибки залежать від значення вимірюваної величини:*

$$\delta = \pm [c + d \cdot (|X_k / X| - 1)]$$

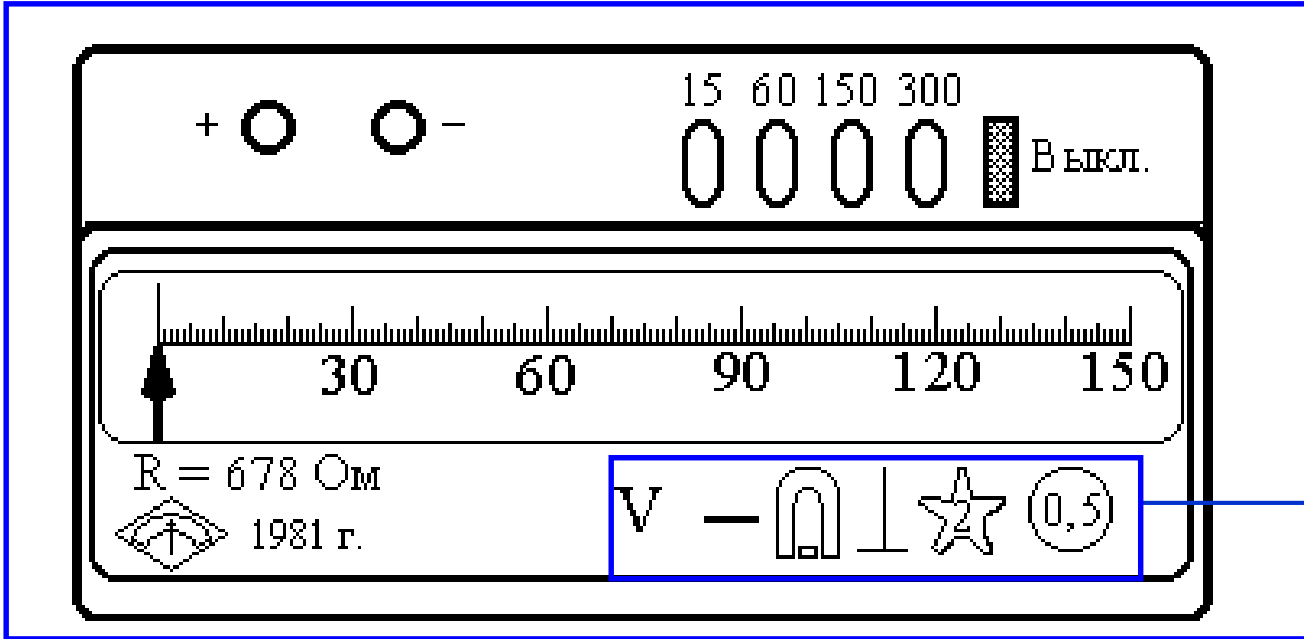
клас точності позначають дробом c / d

Наприклад, при значеннях $c=0.02$ і $d=0.01$ клас точності приладу буде позначено: 0.02/0.01.



*клас точності
визначається
зведеною похибкою*

Ω-0,5



*клас точності
визначається
відносною
похибкою*

V — Ω ⊥ ☆ 0,5

Для характеристик точності засобу вимірювань можна застосувати **коефіцієнт точності**, який визначається відношенням абсолютної похибки до його поля допуску

$$K_T = \Delta / \Delta_{\text{пд}}$$

Щоб оцінити точнісні характеристики сукупності засобів вимірювань, можна застосувати **коефіцієнт відносної точності**, що являє собою відношення середнього квадратичного відхилення вимірюваної величини до його поля допуску

$$K_V = \sigma / \Delta_{\text{пд}}$$

Поле допуску - поле, обмежене найбільшим і найменшим граничними розмірами, яке визначається величиною допуску і його положенням відносно номінального розміру. У разі графічного зображення поле допуску міститься між двома лініями, що відповідають верхньому та нижньому відхиленням відносно нульової лінії

Як показники точності засобів вимірювань можна також застосовувати:

а) інтервал, у якому похибку вимірювання знаходять із заданою ймовірністю;

б) інтервал, у якому систематичну складову похибки вимірювання знаходять із заданою ймовірністю;

в) числові характеристики систематичної складової похибки;

г) числові характеристики випадкової складової похибки;

д) функцію розподілу складової похибки.

Основні значення вимірюваних напруг і струмів

Найбільш часто вимірюють напруги, рідше — струми. Це пояснюється насамперед тим, що для вимірювання струму вимірювальний ланцюг необхідно розривати, що не завжди можливо або бажано, і навпаки, вимірювання напруги можна проводити без порушення цілісності вимірюваного електричного кола.

Вимірювані електричні сигнали це складні функції часу. Тому для аналізу і порівняння різних сигналів прагнуть використовувати такі їх значення, які характеризували б сигнали будь-якої форми.

Найбільшого розповсюдження одержали наступні значення (параметри) напруг і струмів:

- **амплітудне,**
- **середнє,**
- **середньо випрямлене,**
- **середньоквадратичне.**

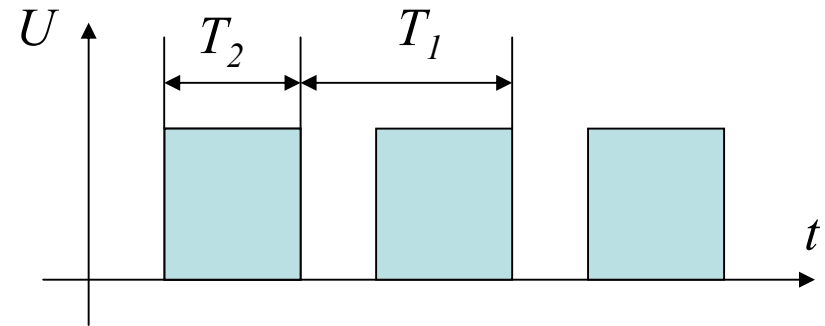
Амплітудне (пікове) значення це - найбільше або найменше миттєве значення змінної складової сигналу за час вимірювання:

$$U_m = \max_T \{U(t)\}$$

\max_T — операція знаходження максимального значення сигналу на інтервалі вимірювання T

Середнє значення (постійна складова) напруги — це постійна складова сигналу $U(t)$ за час T_1 , що визначається виразом:

$$U_{\text{ср}} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_2} U(t)$$



T_1 — час спостереження або період електричного коливання;

T_2 — час дії вимірюваної напруги.

Середньо випрямлене значення напруги:

$$U_{\text{св}} = \frac{1}{T_1} \int_0^{T_2} |U(t)| dt$$

Операція знаходження середніх випрямлених значень здійснюється за допомогою двонапівперіодного детектора середньо випрямлених значень. Відмітимо, що для однополярних сигналів $U_{\text{ср}}$ і $U_{\text{св}}$ рівні між собою

Середньоквадратичне значення напруги — це корінь квадратний із середнього значення квадрата напруги:

$$U_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_2} U^2(t) dt}$$

Середньоквадратичне значення періодичного сигналу складної форми може визначатися також як сума квадратів постійної складової і середньоквадратичних значень окремих гармонік

$$U_{\text{СК}} = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + \dots + U_n^2}$$

Постійну складову і гармоніки знаходять, як відомо, шляхом розкладання складної функції часу $U(t)$ у ряд Фур'є.

Пікове, середньоквадратичне і середньо випрямлене значення напруг сигналів будь-якої форми зв'язані між собою коефіцієнтами амплітуди K_a , форми K_ϕ і усереднення K_y

$$K_a = \frac{U_m}{U_{\text{СК}}}$$

$$K_\phi = \frac{U_{\text{СК}}}{U_{\text{СВ}}}$$

$$K_y = K_a K_\phi$$

Тема 4. Аналогові електромеханічні прилади

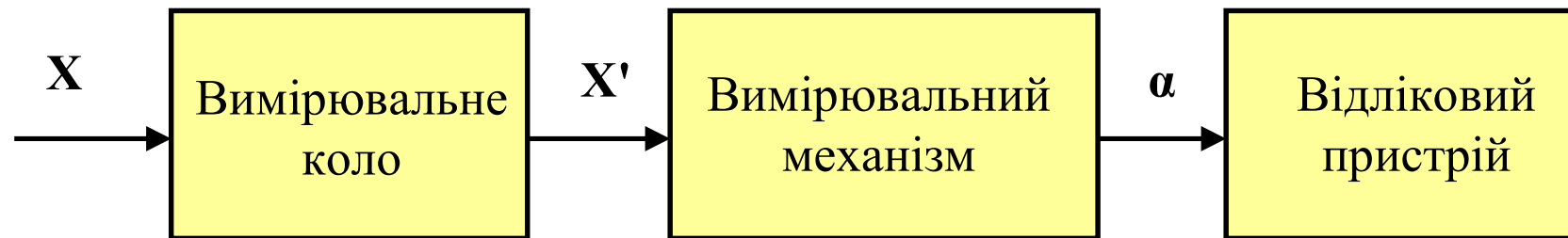
Електромеханічні прилади - аналогові вимірювальні прилади, в яких вхідна електрична величина перетворюється в лінійне або кутове переміщення рухомої частини вимірювального механізму.

Переваги:

- проста,
- надійність,
- зручність в експлуатації,
- невисока ціна

В зв'язку з цими якостями електромеханічні прилади знайшли широке застосування на практиці

Структурна схема, за якою будуються електромеханічні аналогові прилади прямої дії

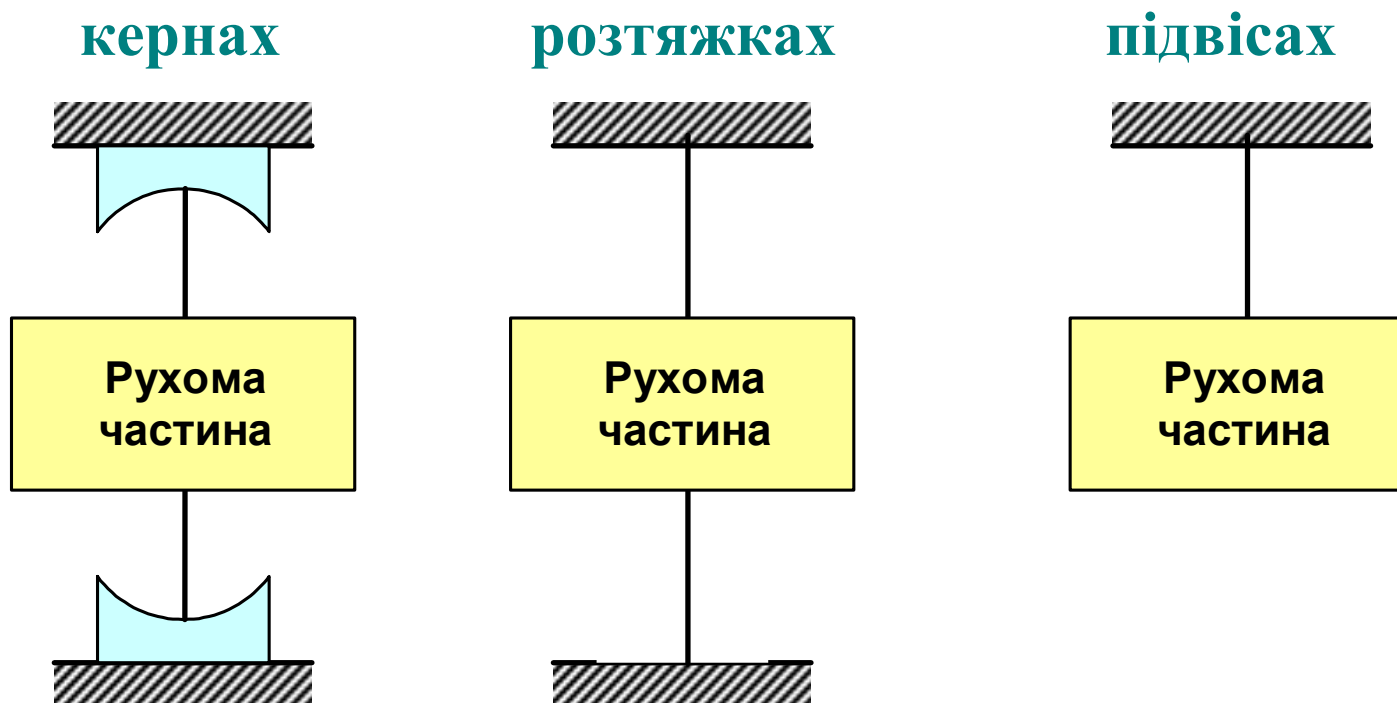


У вимірювальному колі вимірювана електрична величина x перетворюється в електричну величину x' , яка діє на вимірювальний механізм. Вимірювальний механізм перетворює електричну величину x' в механічне (кутове або лінійне) переміщення α , значення якого відображається на відліковому пристрої.

До вимірювального кола можуть входити подільники напруги, шунти, випрямлячі, елементи для компенсації температурних та частотних похибок та інші елементи.

Вимірювальний механізм складається з рухомої та нерухомої частин.

Рухома частина вимірювального механізму встановлюється на:



Керни – це два кусково-сталеві стержні, кінці яких загострені і упираються в підп'ятники з дорогоцінних твердих каменів (агату, сапфіру, корунду та ін.). Недоліком такої установки є наявність тертя в опорах.

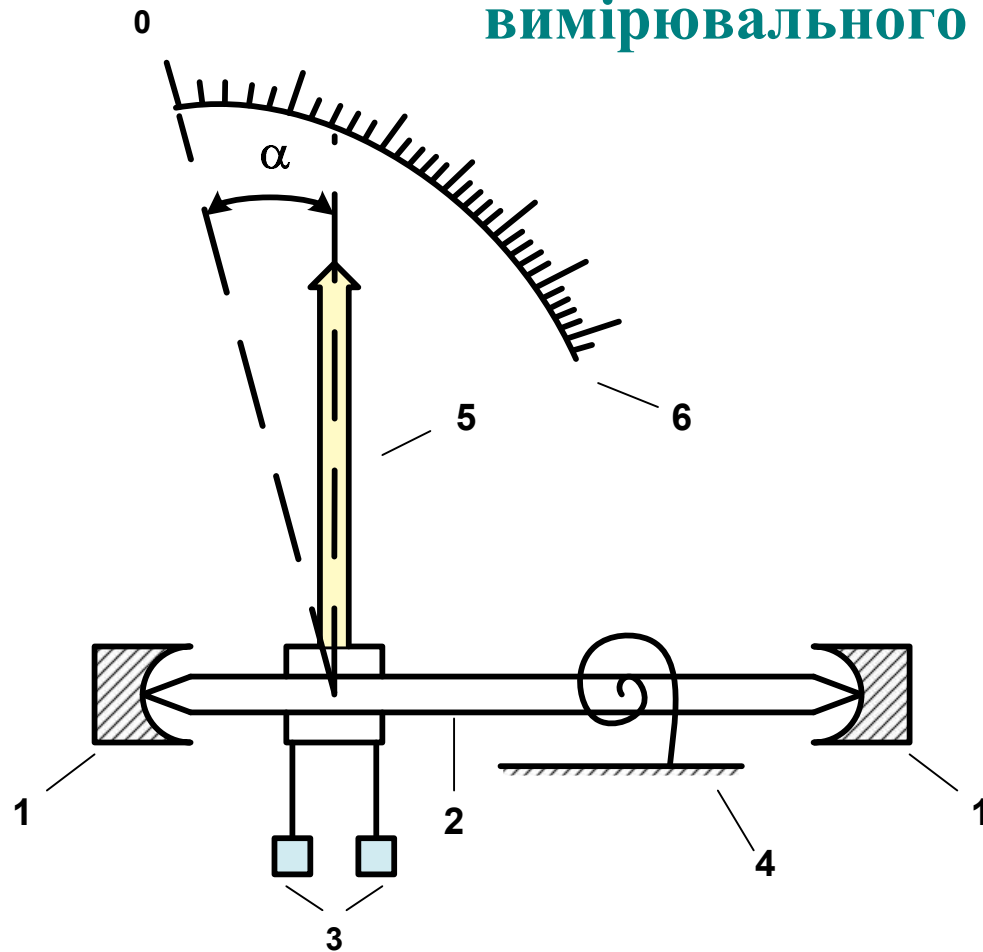
Розтяжки та підвіси – це стрічки з пружних матеріалів (сплавів металів).

При встановленні рухомої частини на розтяжках чи підвісах виключається тертя в опорах. На підвісі встановлюється рухома частина особливо чутливих приладів.

Найбільш поширеним відліковим пристроєм в цих приладах є шкала з вказівником, зв'язаним з рухомою частиною механізму.

У вимірювальному механізмі вхідна електрична величина перетворюється в кутове переміщення α його рухомої частини.

Структурна схема рухомої частини вимірювального механізму



- 1 – під'ятники;
- 2 – вісь, що закінчується кернами;
- 3 – противаги;
- 4 – пружина, що створює протидійний момент;
- 5 – стрілка (вказівник);
- 6 – шкала

Елементи конструкції 2, 3, 4 і 6 утворюють рухому частину, а 1 і 5 відносяться до нерухомої частини вимірювального механізму

Процеси, що відбуваються при кутових переміщеннях рухомої частини механізму

При обертанні твердого тіла навколо осі добуток моменту інерції J на кутове прискорення дорівнює сумі моментів сил, що діють на тіло відносно тієї самої осі

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = \sum_{i=1}^n M_i$$

На рухому частину вимірювального механізму при її рухові діють такі моменти:

1. Електромагнітна енергія W_e створює обертальний момент $M_{об}$, який виникає від дії вимірюваної величини і повертає рухому частину в бік зростання показів

$$M_{об} = \frac{dW_e}{d\alpha}$$

2. Коли б повороту рухомої частини ніщо не заважало, то вона при будь-якому значенні вимірюваної величини, відмінному від нуля, поверталася б до упору. В результаті повороту рухомої частини одночасно закручується пружина, яка створює протидійний момент $M_{пр}$, пропорційний куту повороту α

$$M_{пр} = - W_{пт} \cdot \alpha$$

$W_{пт}$ - питомий протидійний момент пружини, тобто момент, який виникає при закручуванні пружини на одиницю кута. Знак "-" тут поставлено тому, що протидійний момент направлений назустріч обертальному.

3. При обертанні рухомої частини механізму в результаті тертя його рухомих частин з повітрям, а також в результаті електромагнітних процесів в рухомій частині, виникає гальмування. Це гальмування характеризується моментом заспокоєння $M_з$, який пропорційний кутовій швидкості:

$$M_з = - P \frac{d\alpha}{dt}$$

P - коефіцієнт заспокоєння, який залежить від конструкції рухомої частини

4. При встановленні рухомої частини механізму на осі, що закінчується кернами, виникає момент тертя

$$M_{\text{тр}} = -k \cdot G^{1.5}$$

k - коефіцієнт пропорційності;

G - вага рухомої частини вимірювального механізму

Підставивши в праву частину першого рівняння значення моментів, отримаємо

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = M_{\text{об}} + M_{\text{пр}} + M_3 + M_{\text{тр}}$$

або

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + W_{\text{пт}} \alpha + k \cdot G^{1,5} = \frac{dW_e}{d\alpha}$$

Отримане рівняння називають **рівнянням руху рухомої частини вимірювального механізму**.

Якщо його розв'язати для конкретного вимірювального механізму, то можна отримати залежності зміни кута повороту в часі:

$$\alpha = f(t)$$

В статичному режимі роботи вимірювального перетворювача обертальний і протидійний моменти зрівноважені

$$M_{об} = M_{пр}$$

Ця рівність використовується для отримання рівняння перетворення для конкретного типу вимірювального механізму.

Класифікація електровимірювальних приладів

Електровимірювальні прилади можна класифікувати:

- за родом вимірювальної величини;
- за фізичним принципом дії вимірювального механізму;
- за родом струму;
- за класом точності;
- за типом відлікового пристрою;
- за виконанням залежно від умов експлуатації;
- за стійкістю до механічних впливів;
- за ступенем захисту від зовнішніх магнітних та електричних полів.

Електровимірювальні прилади дають змогу вимірювати як електричні, так і неелектричні величини. **На шкалі наводиться назва приладу або початкова латинська літера одиниці, що вимірюється.**

За вимірювальною величиною електровимірювальні прилади поділяються на:

- вольтметри (позначаються літерою V);
- амперметри (A);
- ватметри (W);
- омметри (Ω);
- лічильники енергії (kWh);
- фазометри (φ);
- частотоміри (Hz) тощо.

До умовної літери може бути додано позначення кратності основної одиниці, наприклад: міліамперметр — mA ; кіловольтметр — kV тощо.

За фізичним принципом дії розрізняють такі системи електровимірювальних приладів:

- магнітоелектрична;
- електромагнітна;
- електродинамічна;
- феродинамічна;
- індукційна;
- електростатична;
- вібраційна.

Умовні позначення на шкалі приладу характеризують класифікацію приладів *за родом струму*:

- постійний струм;
- змінний (однофазна система);
- постійний і змінний;
- трифазна система;
- трифазна несиметрична система.

За класом точності електровимірювальні прилади класифікуються відповідно до стандартів. **Випускають прилади таких класів точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.** У лічильниках електроенергії класи точності такі: 0,5; 1,0; 2,0; 2,5.

За типом відлікового пристрою електровимірювальні прилади можуть бути:

- показуючі;
- реєструючі;
- самопишучі;
- друкуючі;
- інтегруючі;
- підсумовуючі.

Більш поширені показуючі прилади, тобто прилади безпосередньої оцінки. Відліковий пристрій цих приладів складається звичайно з шкали і показчика.

За ступенем захисту від зовнішніх магнітних та електричних полів прилади поділяються на I і II категорії. Від зовнішніх полів прилади захищаються екранами.

У залежності від умов експлуатації, діапазону робочих температур та відносної вологості, електровимірювальні прилади поділяються на п'ять груп:

- група А (температура $+10\dots+35^{\circ}\text{C}$, вологість 80);
- група Б (температура $-30\dots+40^{\circ}\text{C}$, вологість 90);
- група В₁ (температура $-40\dots+50^{\circ}\text{C}$, вологість 95);
- група В₂ (температура $-50\dots+60^{\circ}\text{C}$, вологість 95);
- група В₃ (температура $-50\dots+80^{\circ}\text{C}$, вологість 98).

За стійкістю до механічних впливів прилади підрозділяються в залежності від значення максимально допустимого прискорення при ударах та вібраціях:

- звичайні з підвищеною міцністю (ОП) - прискорення до 15 м/с^2 ;
- нечутливі до вібрацій (ВН);
- віброміцні (ВП);
- нечутливі до трясіння (ТН);
- трясінняміцні (ТП);
- удароміцні (У).

Позначення на шкалах електровимірювальних приладів

Позначення на шкалах приладів несуть інформацію про:

- призначення приладу;
- одиниці вимірювання, на які він розрахований;
- рід струму;
- клас точності;
- систему вимірювального механізму, застосованого у даному приладі;
- нормальне положення приладу;
- величину випробної напруги електричної міцності ізоляції струмопровідних частіш приладу відносно його корпусу;
- величину опору електричних кіл переносних приладів;
- наявність власного захисту від дії сторонніх магнітних чи електричних полів;
- захист від впливу зовнішнього оточення;
- необхідність попереднього ознайомлення з додатковими вказівками, що є у паспорті чи описі приладу;
- відомості про підприємство, де цей прилад виготовлено, та рік його виготовлення.

Звичайно, для прикладу наведено лише деякі позначення. **На шкалах окремих приладів роблять написи, вкрай необхідні лише користувачеві даним приладом.**

Наприклад:

- на шкалах стаціонарних амперметрів, ватметрів, фазометрів і на табличках лічильників роблять написи про необхідні додаткові пристрої (шунти, трансформатори струму), з якими ці прилади необхідно застосовувати;
- на шкалах вольтметрів, ватметрів, фазометрів і табличках лічильників можуть бути відомості про необхідні трансформатори напруги чи додаткові опори, з якими необхідно застосовувати ці прилади.
- на шкалах малокосинусних ватметрів обов'язково має бути позначено номінальну величину косинуса кута зсуву фаз, бо, незважаючи на цей показник, можна суттєво перевантажити прилад по обертовому моменту, не перевантажуючи його ні струмом, ані напругою.

На шкалах позначають величину номінальної частоти, на яку розраховано прилад (за винятком частоти 50 Гц, яку не позначають числом, якщо на шкалі вже є позначка, що прилад придатний до вимірювань на змінному струмі чи на постійному та змінному).

Якщо прилад використовують не тільки за його номінальної частоти, а й у дещо розширеному діапазоні частот (де для нього буде допустима більша похибка, ніж та, що вказана класом приладу), то **на шкалі цей розширений діапазон позначають трьома крапками, а номінальну частоту підкреслюють**

Наприклад: 50...500 Гц - прилад призначено для роботи на частоті 50 Гц, але ним можна користуватись за частот до 500 Гц, враховуючи, що, працюючи в розширеному діапазоні частот, прилад може давати додаткову похибку. Про величину цієї похибки можна дізнатися з опису приладу. Звичайно ця додаткова похибка не перевищує величини, що позначена класом точності приладу.

На шкалах приладів з нерівномірним характером шкали, безпосередньо біля кінців позначок, є крапки, що обмежують робочу частину шкали, тобто ту, якою варто користуватись, бо там гарантована точність вимірів.

Основними позначками на шкалах є ті, що відповідають певним значенням вимірюваної величини при знаходженні над ними покажчика приладу. Ці позначки, у більшості стаціонарних приладів мають різну довжину: **найбільшої довжини — цифровані**, тобто для них позначено цифри, що відповідають конкретним значенням вимірюваної приладом величини в одиницях, назву яких позначено на шкалі.

У переносних приладах, які виконують із двома або більше верхніми границями вимірювань, число поділок шкали роблять зручним для вимірювань у разі вмикання приладу на будь-яку з цих границь. При цьому **найдовші позначки шкали цифрують за десятковою системою числення.**

Точні електровимірювальні прилади градуують через п'ять поділок шкали.

На проміжних позначках прилади виробники не повіряють, тому при вимірюваннях на цих позначках **похибка може бути дещо більша за величину, що передбачена класом приладу**, особливо коли на найближчій цифрованій позначці похибка приладу є на межі допустимої величини.

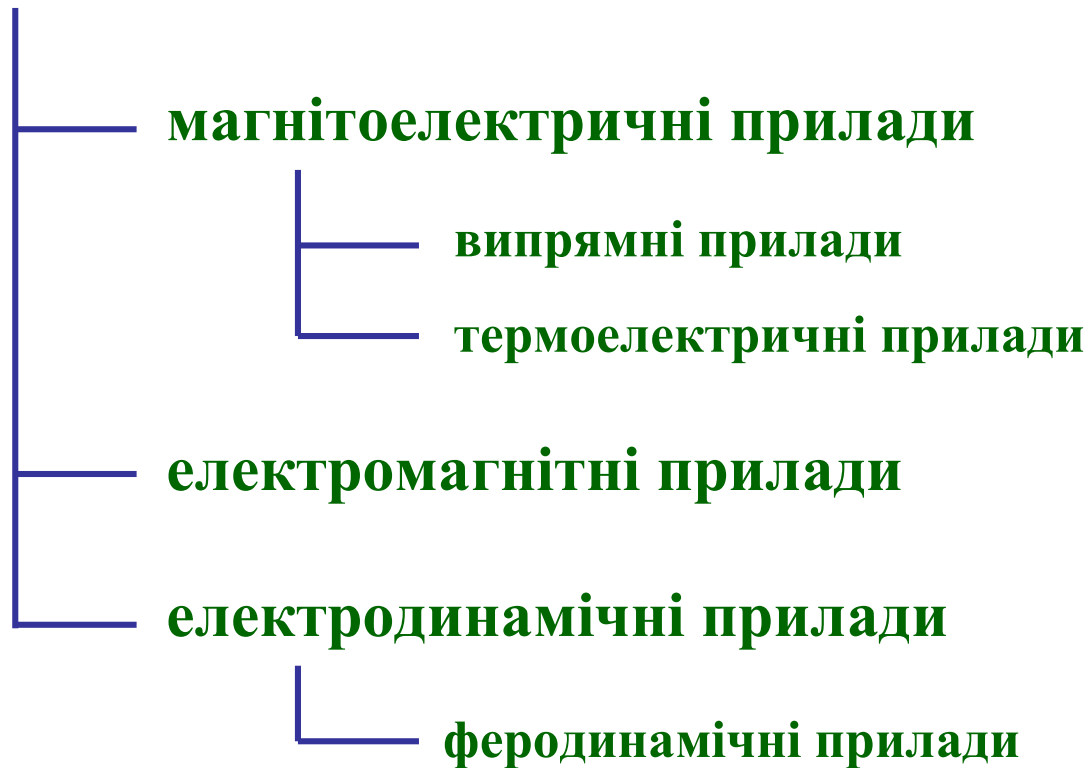
Написи й позначення на шкалах електровимірювальних приладів

Символ на шкалі приладу	Значення символу	Символ на шкалі приладу	Значення символу
A	Ампер		Магнітоелектрична система
V	Вольт		Магнітоелектрична система з рухомим магнітом
W	Ват		Електромагнітна система
Hz	Герц		Електродинамічна система
?	Ом		Феродинамічна система
T	Тесла		Індукційна система
—	Постійний струм		Теплова система з ниткою, що нагрівається
~	Змінний однофазний струм		Електростатична система
	Змінний трифазний струм		Вібраційна система
	Змінний трифазний струм з асиметричним навантаженням		Термоелектрична система з не ізолюваною термопарою
	Небезпека доторкання до приладу		Термоелектрична система з ізолюваною термопарою
	Випробна напруга ізоляції 500 В		Захист від зовнішніх магнітних полів
	Випробна напруга ізоляції 2 кВ		Захист від зовнішніх електричних полів

Написи й позначення на шкалах електровимірювальних приладів

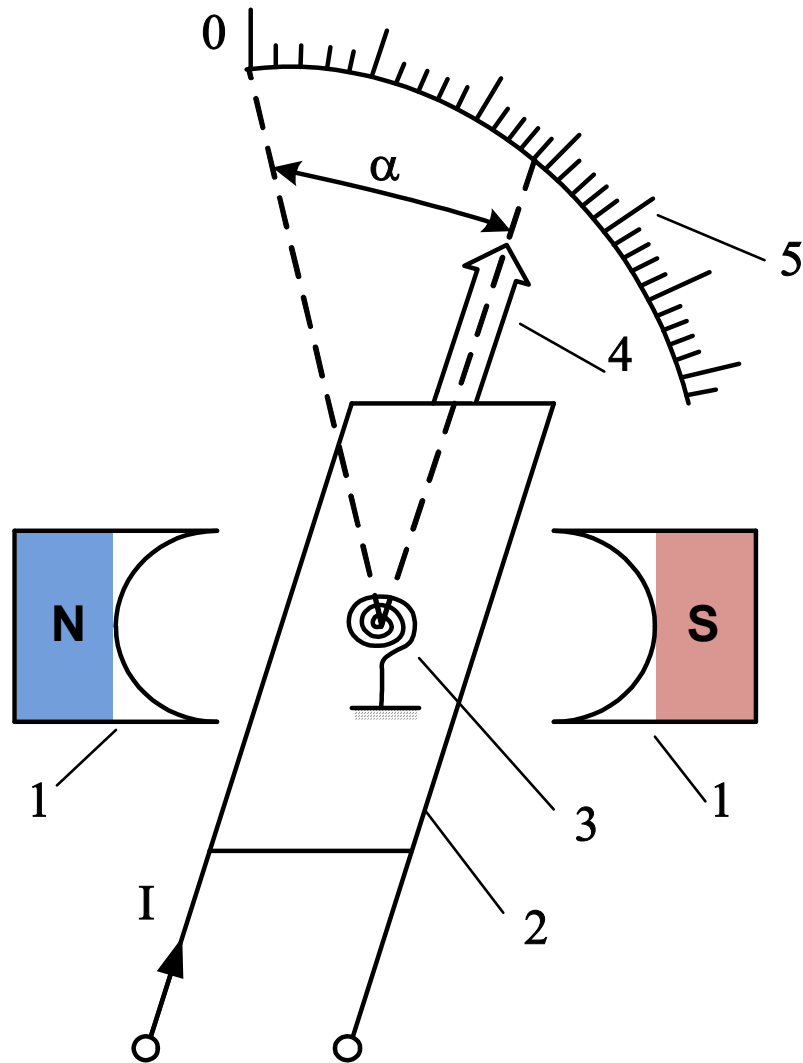
Символ на шкалі приладу	Значення символу	Символ на шкалі приладу	Значення символу
	Вертикальне положення шкали приладу		Клас точності, якщо нормуюче значення дорівнює даному показанню приладу
	Горизонтальне положення шкали приладу	ast	Астатичний захист приладу від зовнішніх магнітних полів
	Під нахилом (60°) положення шкали приладу	Fe5	Встановлення на щиті зі сталі 5 мм завтовшки
0,05 ... 4,0	Клас точності приладу у відсотках від нормованого значення	Fe	Встановлення на щиті зі сталі будь-якої товщини
1,5	Клас точності, якщо нормувальне значення дорівнює верхній границі діапазону вимірювань	NFe	Встановлення на несталевому щиті будь-якої товщини
	Клас точності, якщо нормувальне значення дорівнює довжині шкали чи її частини, що відповідає діапазону вимірювань	Fe.NFe	Встановлення на будь-якому щиті будь-якої товщини
A	Для закритих сухих опалюваних приміщень	T	Для сухого і вологого тропічного клімату
Б	Для закритих сухих неопалюваних приміщень		Необхідність ознайомлення з додатковими вказівками, наведеними в паспорті чи описі приладу
B	Для польових і морських умов, для пересувних установок	0,02 Ом 0,005 Гн	Номінальний активний опір й індуктивність послідовного кола переносних приладів

Тема 5. Аналогові електромеханічні прилади різних систем



Магнітоелектричні прилади

Магнітоелектричний вимірювальний перетворювач



Принцип дії магнітоелектричних вимірювальних перетворювачів полягає у взаємодії поля постійного магніту з магнітним полем рамки (катушки), по якій протікає вимірюваний струм.

- 1 – полюсні наконечники постійного магніту;
- 2 – рамка з мідної чи алюмінієвої проволочки;
- 3 – спіральні пружини;
- 4 – стрілка;
- 5 – шкала.

Постійний магніт, полюсні наконечники і циліндричне осердя складають магнітну систему механізму.

В рівномірному проміжку між полюсними наконечниками магніту і осердям створюється сильне радіально-рівномірне магнітне поле, в якому знаходяться дві сторони рамки з мідної чи алюмінієвої проволочки. По витках рамки протікає постійний струм, пов'язаний відомою залежністю з вимірюваною електричною величиною. Цей струм підводиться до рамки через спіральні пружини. Рамка закріплена між двома півосями. На одній із півосей закріплена стрілка, кінець якої переміщується над шкалою.

Магнітне поле постійного магніту N-S, взаємодіючи зі струмами в тих частинах рамки, що знаходяться в просторі між полюсними наконечниками і осердям, створює обертальний момент, який намагається повернути рамку так, щоб через площину, охоплену її витками, проходив максимальний магнітний потік. При повороті рамки закручуються спіральні пружини і створюється протидійний момент. Поворот рамки припиниться, коли протидійний момент стане рівним обертальному.

Значення обертального моменту, як показано раніше, можна визначити як похідну від енергії електромагнітного поля за кутом повороту рухомої частини α :

$$M_{об} = \frac{dW_e}{d\alpha}.$$

Якщо площа рамки перпендикулярна лініям потоку, то магнітне потокозчеплення з нею дорівнює повному потокозчепленню Ψ_0 магнітного потоку з витками рамки. Енергія електромагнітного поля в цьому випадку

$$W_e = \Psi_0 I$$

При повороті рамки в радіально-рівномірному магнітному полі на кут $d\alpha$ відбувається зміна потокозчеплення на $d\Psi_0 = \Psi_0 d\alpha$ і зміна енергії на величину $dW_e = \Psi_0 I d\alpha$

Звідси обертальний момент:

$$M_{об} = \frac{dW_e}{d\alpha} = \Psi_0 \cdot I$$

Потокозчеплення магнітного потоку з витками рамки

$$\Psi_0 = B S w$$

B – індукція магнітного поля постійного магніту;

S – площа рамки (катушки);

w – кількість витків рамки (катушки).

Таким чином, обертальний момент пропорційний струмові I в рамці.

Протидійний момент, який виникає при повороті рамки та закручуванні пружини, пропорційний куту повороту рамки α

$$M_{пр} = W_{пт} \alpha$$

В статичному режимі роботи рухома частина буде знаходитись у рівновазі, коли

$$M_{об} = M_{пр}$$

$$BS_w I = W_{пт} \alpha$$

Рівняння перетворення магнітоелектричного ВП:

$$\alpha = \frac{BS_w}{W_{пт}} \cdot I$$

або

$$\alpha = S_I \cdot I$$

$$S_I = \frac{BS_w}{W_{пт}}$$

- чутливість магнітоелектричного вимірювального перетворювача

З отриманого рівняння перетворення випливає наступне:

1. Якщо напрям струму зміниться на протилежний, то відповідно зміниться і напрям обертального моменту. Отже, **за допомогою магнітоелектричного ВП можна вимірювати тільки постійний струм** (або напругу).

2. **Статична характеристика** $\alpha = f(I)$ даного перетворювача **лінійна**, оскільки чутливість

$$S_I = B S w = \text{const} \quad \left| \begin{array}{l} B = \text{const} \\ S = \text{const} \\ w = \text{const.} \end{array} \right.$$

3. В зв'язку з тим, що чутливість у магнітоелектричних ВП постійна, **вони мають рівномірну шкалу**

4. **До переваг магнітоелектричних ВП відносять** також високу чутливість, мале споживання енергії від об'єкта вимірювання, малий вплив на покази приладів зовнішніх магнітних полів.

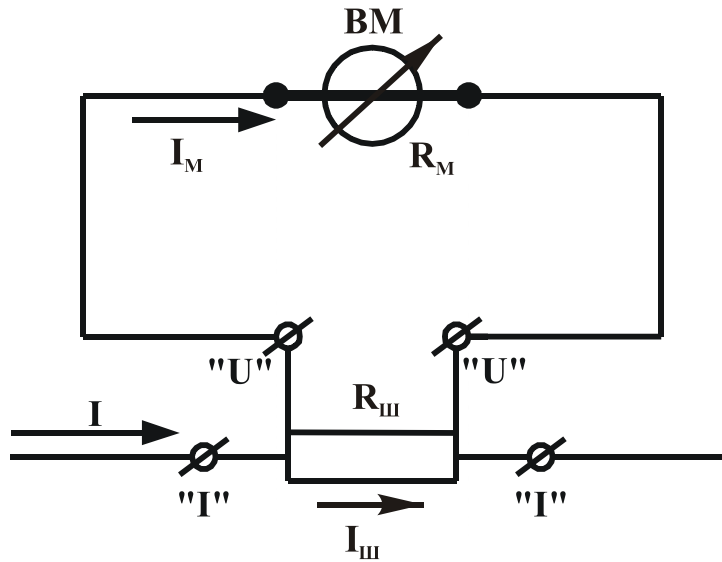
5. **До недоліків відносять:** неможливість вимірювання змінних струмів, мала здатність до перевантажень, висока вартість та складність вимірювального механізму.

Магнітоелектричні амперметри

Магнітоелектричний вимірювальний механізм, включений безпосередньо в коло вимірюваного струму, дозволяє виміряти невеликі струми (до 20-50 мА)

При збільшенні струму відбувається нагрівання пружин, які служать для створення протидійного моменту і одночасно – для підведення струму до рамки. Пружини втрачають свої пружні властивості, змінюється чутливість механізму, і прилад може втратити свої первісні властивості.

Таким чином, **сам вимірювальний механізм може служити тільки як мікро- або міліамперметр. Для збільшення верхніх меж вимірювання магнітоелектричних приладів за струмом використовуються шунти.** Шунт являє собою резистор, виготовлений з манганіну – сплаву, опір якого мало залежить від температури. Приєднується шунт паралельно до вимірювального механізму ВМ



Опір шунта $R_{ш}$ при вимірюванні великих струмів I багато менший від опору вимірювального механізму $R_{м}$, тому велика частина вимірюваного струму I йде через шунт ($I_{ш}$), а струм $I_{м}$ через рамку механізму не перевищує припустимого значення I_0 .

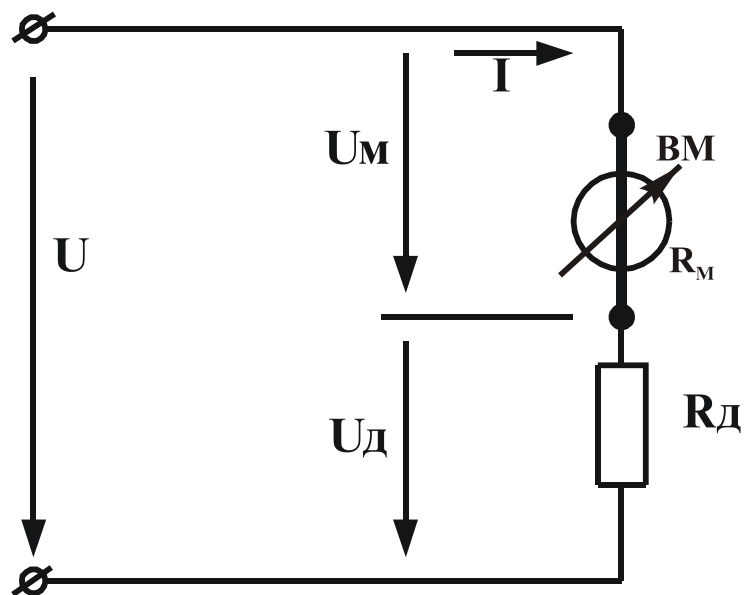
Відношення вимірюваного струму до струму через механізм $I/I_{м}$ називається коефіцієнтом шунтування n

$$I/I_{м} = n.$$

$$I = I_{ш} + I_{м}; \quad I_{ш} \cdot R_{ш} = I_{м} \cdot R_{м}.$$

З цих рівнянь при заданих трьох величинах можна знайти дві інші.

Магнітоелектричні вольтметри



Для одержання магнітоелектричного вольтметра послідовно з механізмом вмикається додатковий резистор R_D , який обмежує струм в рамці механізму до припустимих значень.

$$U = U_M + U_D = I \cdot R_M + I \cdot R_D.$$

Відношення вимірюваної напруги U до спаду напруги на механізмі U_M часто називають коефіцієнтом ділення m

$$m = U/U_M$$

Додаткові резистори виготовляють із термостабільних матеріалів. Вони, як і шунти, можуть бути внутрішніми та зовнішніми.

Магнітоелектричні гальванометри

Гальванометрами називають магнітоелектричні прилади з високою чутливістю до струму або напруги.

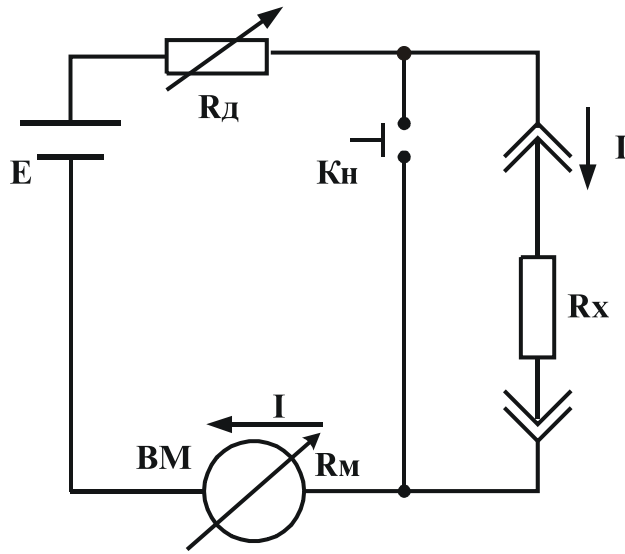
Рухома частина їх закріплюється найчастіше на розтяжках або підвісах. Шкали гальванометрів або зовсім не градуйовані, або градуйовані орієнтовно. **Гальванометри використовують для вимірювання досить малих** (до 10^{-12} А) **струмів та** (до 10^{-8} В) **напруг, а також для вимірювання кількості електрики в імпульсі.**

Гальванометри за способом відліку поділяються на стрілкові та дзеркальні (тобто із світловим відліком).

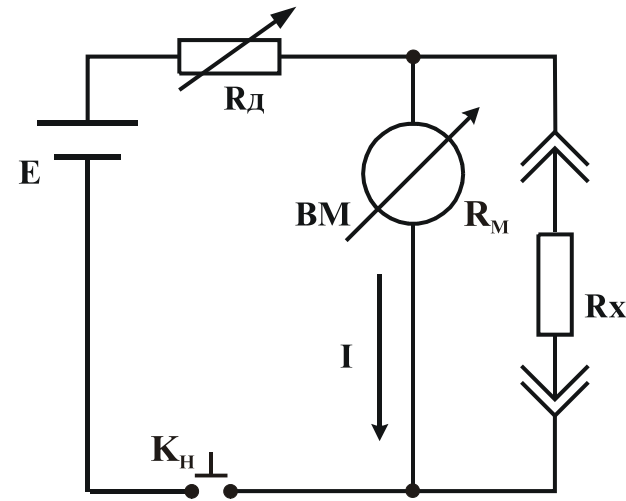
У деяких дзеркальних гальванометрів використовуються окремі від всього приладу шкали. Чутливість таких приладів не є постійною величиною, вона залежить від установленної відстані між шкалою та дзеркалом, яке закріплене на рухомій частині механізму.

Магнітоелектричні омметри

Існують дві схеми омметрів: одна – з послідовним вмиканням вимірюваного опору R_x та вимірювального механізму ВМ, інша – з паралельним.



$$\alpha = S_1 \cdot I = \frac{S_1 \cdot E}{R_m + R_x + R_d}.$$



$$\alpha = S_1 \cdot I = \frac{S_1 \cdot E \cdot R_x}{R_m \cdot R_x + R_d \cdot (R_m + R_x)}.$$

Відхилення $\alpha = 0$ при $R_x = 0$, тобто нуль знаходиться на шкалі приладу зліва. Максимальне відхилення α буде при $R_x = \infty$, тому **омметри з паралельною схемою використовуються для вимірювання малих опорів, а з послідовною – для великих**. Шкали омметрів нерівномірні.

Такі омметри виготовляються переносними з живленням від сухих елементів. У процесі експлуатації напруга на затискачах сухих елементів змінюється і може відрізнятись від тієї, яка була при градуванні приладу. Тому **перед кожним вимірюванням в омметрі з послідовною схемою при натиснутій кнопці потрібно встановлювати показ “0” зміною опору R_d , а в омметрі з паралельною схемою потрібно встановити показ “0” при непідключеному R_x** . Це є недоліком таких омметрів.

Цього недоліку не мають омметри, які використовують **механізм-логометр**.

Випрямні прилади

Магнітоелектричні прилади мають багато переваг, але вони не можуть безпосередньо вмикатись для вимірювання змінного струму. Цю перешкоду можна обійти застосуванням перетворювачів змінного струму у постійний.

У залежності від виду перетворювача розрізняють випрямні, термоелектричні та електронні прилади.

Випрямні прилади являють собою поєднання випрямляча з магнітоелектричним вимірювальним механізмом.

У сучасних приладах у випрямлячах використовуються напівпровідникові діоди. Найбільше застосовувані кремнієві діоди, які мають малу власну ємність і можуть працювати в діапазоні практично від 0 Гц і до 105 Гц.

Випрямлячі, які використовуються у випрямних приладах, бувають однопівперіодні та двопівперіодні.

Схема приладу з однопівперіодним випрямленням змінного струму

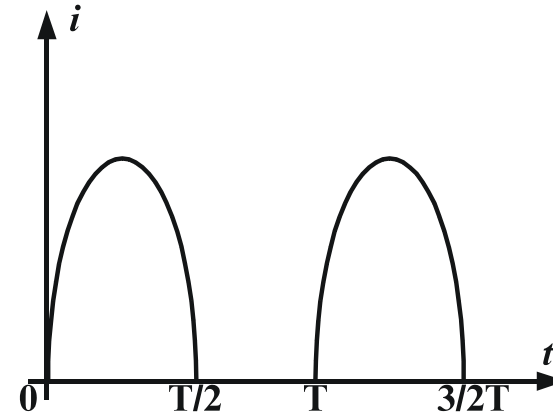
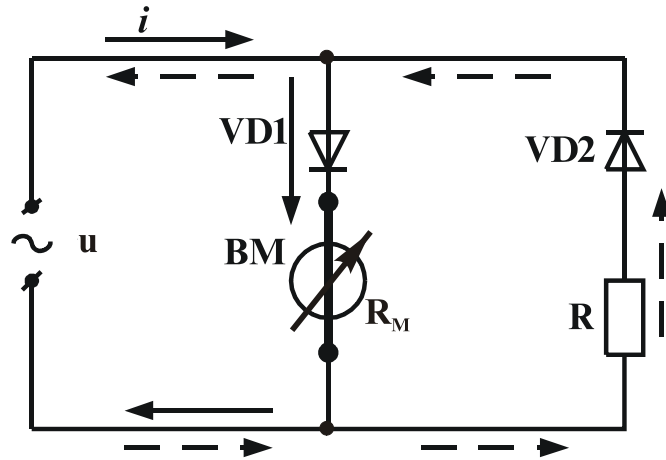
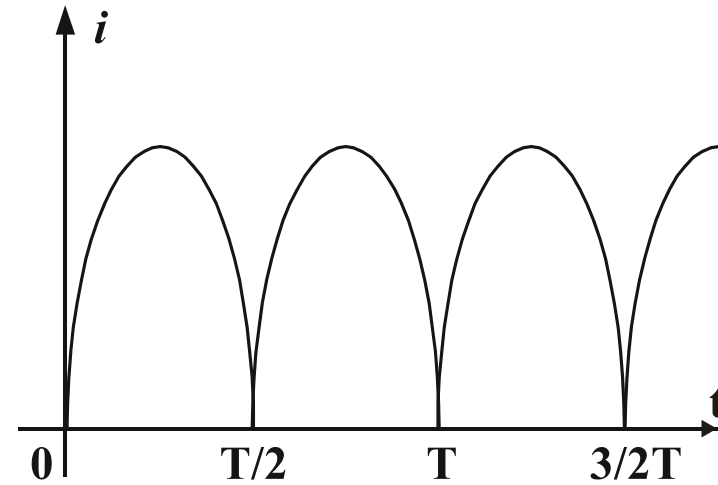
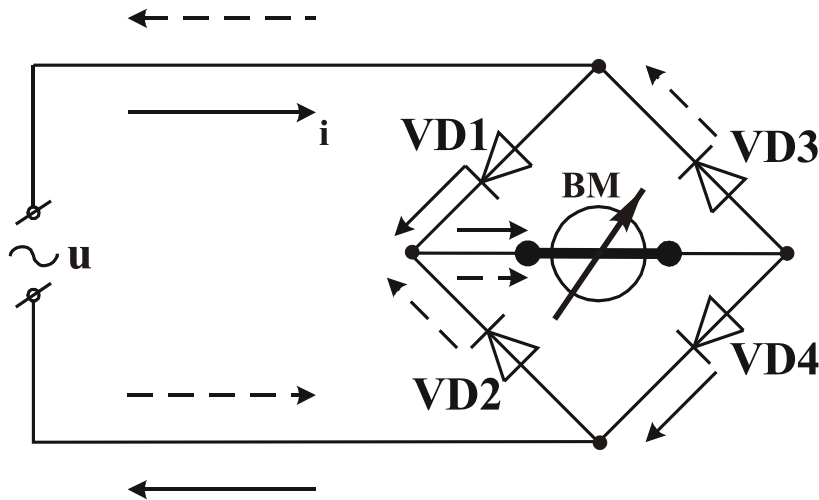


Схема приладу з двопівперіодним випрямленням змінного струму



Внаслідок інерційних властивостей вимірювального механізму положення рухомої частини механізму визначається середнім за період значенням обертового моменту **М_{об ср}**, який, в свою чергу, пропорційний середньому значенню струму **I_{ср}**, що протікає через рамку:

$$M_{об\ ср} = \frac{1}{T} \int_0^t M_{об}(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^t \Psi_0 i(t) \cdot dt = \Psi_0 \frac{1}{T} \int_0^t i(t) \cdot dt = \Psi_0 \cdot I_{ср},$$

Рівняння перетворення приладу має вигляд:

$$\alpha = \frac{\Psi_0}{W_{пт}} \cdot I_{ср}.$$

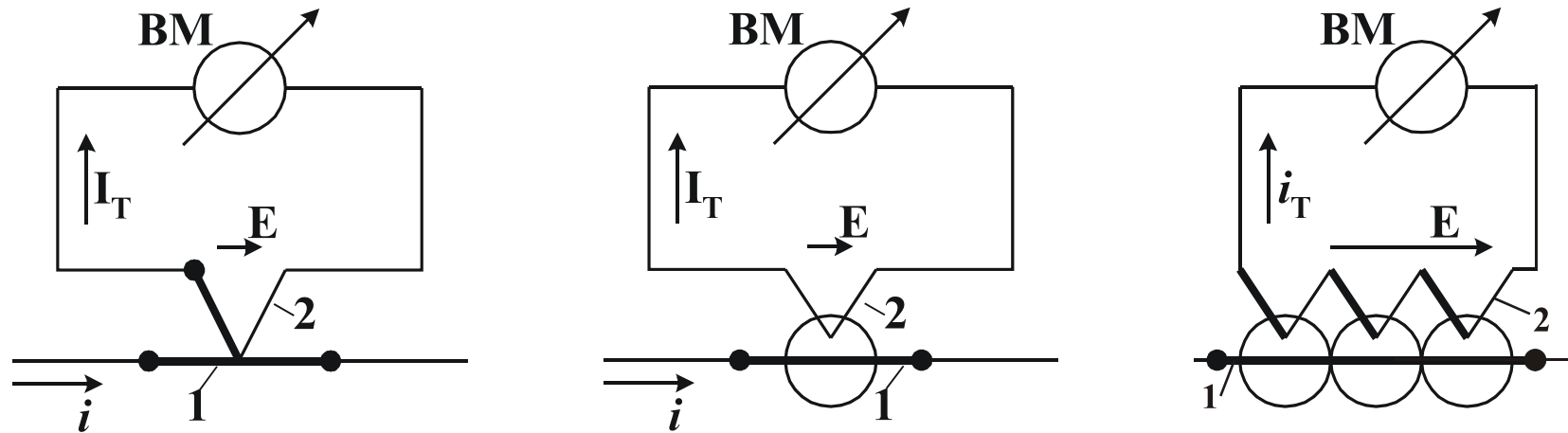
Для синусоїдної форми вимірюваних електричних величин **випрямні прилади градууються у діючих значеннях**. Для визначення діючих значень несинусоїдних кривих струму потрібно робити перерахунок показів з урахуванням коефіцієнта форми кривої.

Для розширення меж випрямних приладів за струмом використовуються, як і в звичайних магнітоелектричних приладах, шунти, а за напругою – додаткові опори R_д та подільники напруги.

Термоелектричні прилади

Термоелектричні прилади являють собою поєднання термоелектричного перетворювача та магнітоелектричного вимірювального механізму.

Термоелектричний перетворювач перетворює вимірюваний змінний струм i в постійну е.р.с. E , яка діє на вимірювальний механізм



Термоперетворювач являє собою нагрівач (1) та термопару (2).

Термопара може мати безпосередній електричний контакт з нагрівачем і може мати тільки тепловий контакт з нагрівачем через електроізолювальний матеріал, який має високу теплопровідність.

Контактні перетворювачі мають меншу інерційність, ніж безконтактні, але вони допускають великий витік струмів високої частоти і застосовуються на частотах не вище 5-10 МГц.

Безконтактні перетворювачі можуть використовуватись на частотах до сотень мегагерц. Крім того, безконтактні термоперетворювачі можна з'єднувати в батареї, що дозволяє підвищити чутливість приладу.

Струм через вимірювальний механізм прямо пропорційний е.р.с. термопари $I_T = E/R_n$, де R_n – опір кола термопари.

Відхилення α рухомої частини механізму пропорційне цьому струмові:
 $\alpha = S_I \cdot I_T$.

Е.р.с. термопари пропорційна різниці температур гарячого спаю термопари та її холодних кінців ΔT : $E = K \cdot \Delta T$, де K – коефіцієнт пропорційності. Температура холодних кінців відповідає температурі навколишнього середовища.

Різниця температур ΔT пропорційна потужності, яка виділяється вимірюваним струмом I в нагрівачі термопари, тобто квадрату діючого значення вимірюваного струму: $\Delta T = K_T \cdot I^2$, де K_T – коефіцієнт, який визначається характеристиками термоперетворювача.

Таким чином, струм через вимірювальний механізм

$$I_T = E/R_H = K \cdot \Delta T / R_H = K \cdot K_T \cdot I^2 / R_H$$

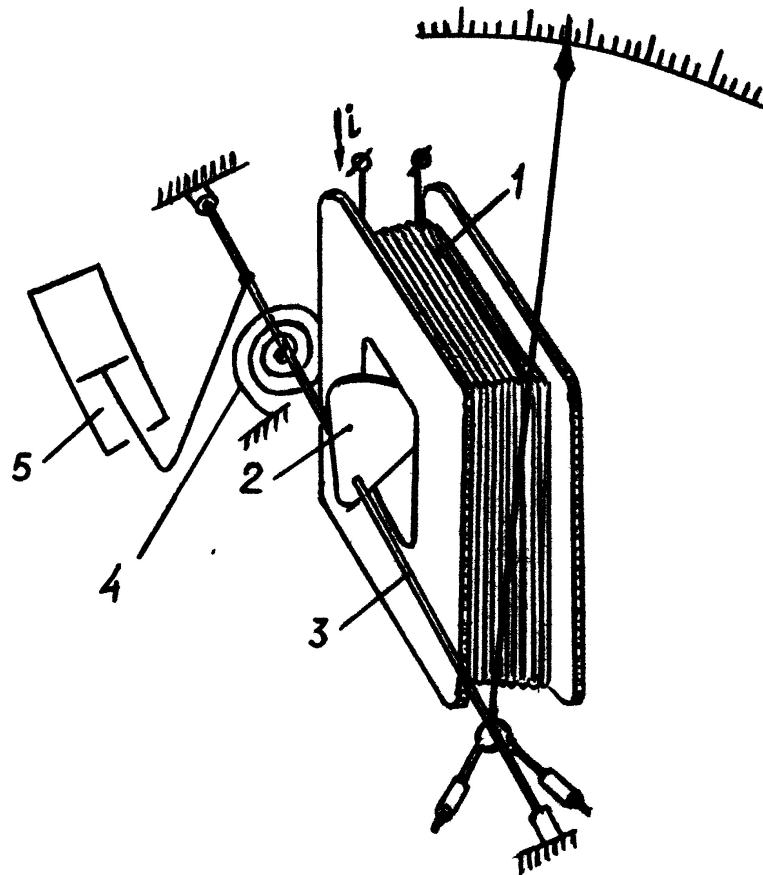
Відхилення вказівника

$$\alpha = \frac{\Psi_0}{W_{\text{пт}}} \cdot I_T = \frac{\Psi_0 \cdot K \cdot K_T}{W_{\text{пт}} \cdot R_H} \cdot I^2 = m \cdot I^2$$

Рівняння перетворювача термоелектричного приладу є квадратичним.

Електромагнітні прилади

Електромагнітний вимірювальний перетворювач



Принцип дії електромагнітного вимірювального механізму оснований на взаємодії магнітного поля, яке створюється струмом в нерухомій котушці, з рухомим феромагнітним осердям.

- 1 – котушка;
- 2 – осердя, закріплене на осі вимірювального механізму
- 3 – вісь вимірювального механізму;
- 4 – спіральна пружина;
- 5 – повітряний заспокоювач

Під дією магнітного поля осердя втягується всередину котушки. Рухома частина механізму повертається до тих пір, поки обертальний момент не зрівноважиться протидійним моментом.

Енергія магнітного поля котушки, по якій протікає постійний струм I :

$$W_M = L \cdot I^2 / 2$$

L – індуктивність котушки, яка залежить від положення осердя, а отже, і від кута повороту α рухомої частини

Обертальний момент:

$$M_{об} = \frac{dW_M}{d\alpha} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2.$$

При рівності обертового та протидійного моментів рухома частина зупиняється, займаючи положення, яке визначається кутом повороту:

$$\alpha = \frac{1}{2W_{пт}} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2.$$

Якщо в котушці протікає змінний струм (не обов'язково синусоїдної форми), то рухома частина реагує на середнє значення обертового моменту

$$M_{\text{об ср}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot dt$$

$$\alpha = \frac{1}{2W_{\text{пт}}} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot dt.$$

$$\frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot dt = I^2$$

– квадрат діючого значення періодичного струму

Тому

$$\alpha = \frac{1}{2W_{nm}} \cdot \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2.$$

З рівняння перетворення випливає наступне:

Величина I^2 завжди додатна, тому кут повороту рухомої частини не залежить від напрямку струму в котушці. Звідси виходить, що **електромагнітні прилади можуть застосовуватись для вимірювань як у колах постійного, так і в колах змінного струму.**

При $dL/d\alpha = \text{const}$ **шкала електромагнітного приладу має квадратичний характер** – стиснута на початку та розтягнута в кінці. Зміною залежності $L(\alpha)$ **шляхом вибору відповідної форми осердя шкалу значною мірою можна наблизити до рівномірної.**

Струм в електромагнітному механізмі підводиться безпосередньо до нерухомої котушки (не через пружини). Провід обмотки котушки можна взяти великого перерізу, тому такий **механізм здатний витримувати великі перевантаження.**

Електромагнітні амперметри та вольтметри

В амперметрах електромагнітної системи **весь вимірюваний струм проходить по обмотці нерухомої котушки**. В залежності від граничного значення вимірюваного струму вибирається переріз проводу та число витків обмотки котушки.

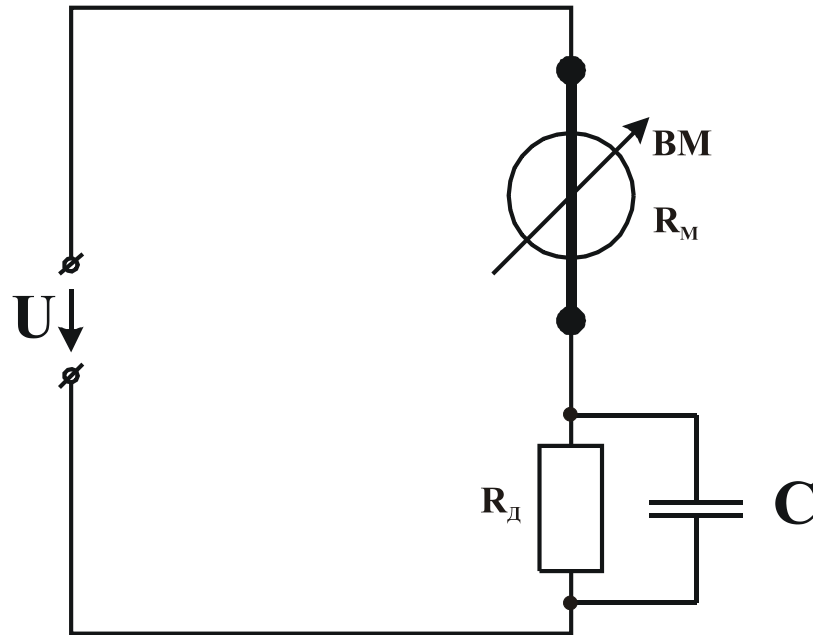
Найбільш поширені амперметри з верхньою межею вимірювання 5 А, оскільки для розширення меж вимірювання амперметрів використовується вимірювальні трансформатори струму, у багатьох із яких номінальне значення вторинного струму дорівнює 5 А.

Температурна похибка в амперметрах невелика і обумовлена тільки зміною пружності спіральних пружин або розтяжок.

Внаслідок наявності в осерді рухомої частини втрат на гістерезис та вихрові струми, які залежать від частоти, в **цих амперметрах виникає додаткова частотна похибка, але вона теж невелика.**

Для розширення меж вимірювання електромагнітних амперметрів, особливо для вимірювання великих струмів, **шунти не застосовуються**. Це пояснюється тим, що опір обмотки механізму невеликий, опір шунта приблизно в n разів менший (n – коефіцієнт шунтування) за опір обмотки, тому шунти виходять великих розмірів.

Для одержання різних меж вимірювання електромагнітних вольтметрів послідовно з котушкою механізму вмикаються **додаткові опори** з дуже малою залишковою реактивністю, виконані з манганіну.



У багатомежевих вольтметрах додаткові резистори є секційними. Для одержання малої температурної похибки відношення значення додаткового опору до значення опору котушки механізму повинно бути досить велике.

У електромагнітах із замкнутим магнітопроводом котушка механізму намотується манганіновим проводом, тому додатковий резистор відсутній, і покази таких вольтметрів практично не залежать від температури.

Зміна частоти вхідної напруги на покази електромагнітних вольтметрів впливає більше, ніж на покази амперметрів, оскільки у вольтметрів більший реактивний опір у порівнянні із активним. З підвищенням частоти реактивний опір збільшується, викликаючи зменшення струму через котушку вимірювального механізму і, таким чином, зменшення його показів. Для компенсації частотної похибки паралельно додатковому резистору (або його частині) приєднується ємність.

Розширення меж вимірювання електромагнітних вольтметрів до високих напруг здійснюється за допомогою вимірювальних трансформаторів напруги.

Переваги приладів електромагнітної системи:

- можливість їх застосування в колах як постійного, так і змінного струму,
- простота конструкції,
- надійність,
- здатність до перевантажень,
- низька вартість

Недоліки приладів електромагнітної системи:

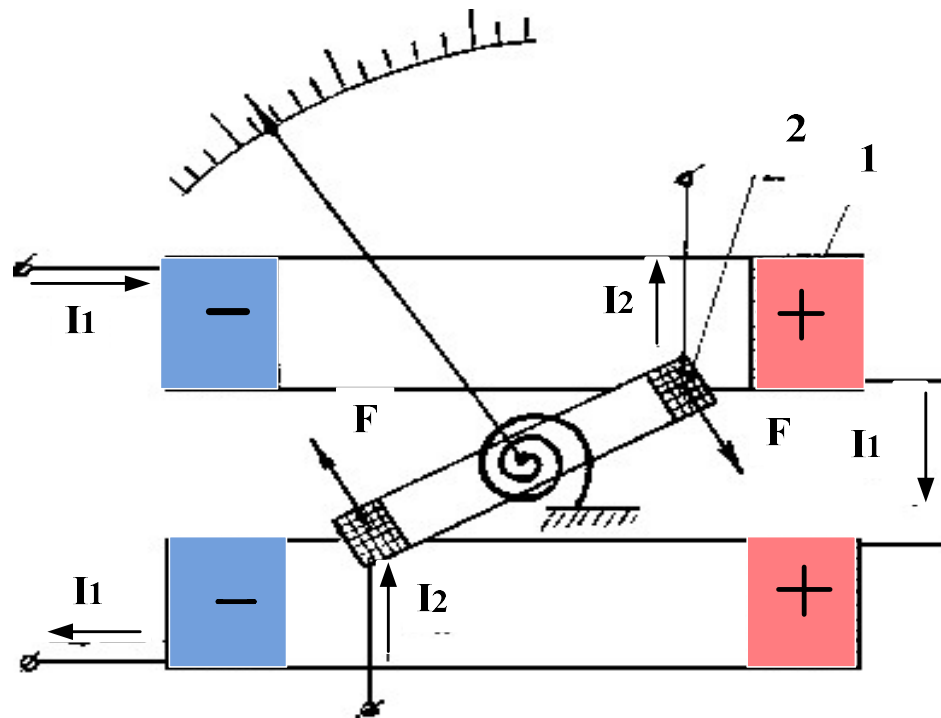
- велике власне споживання,
- мала точність,
- мала чутливість,
- сильний вплив зовнішніх магнітних полів

Для захисту від впливу магнітних полів механізми поміщають в феромагнітний екран або виконують їх астатичними.

Частотний діапазон електромагнітних амперметрів (до 10 кГц) ширший, ніж у вольтметрів (до 400 Гц).

Електродинамічні прилади

Електродинамічний вимірювальний перетворювач



Принцип дії електродинамічного вимірювального механізму оснований на взаємодії магнітних полів двох котушок із струмами: нерухомої (1) та рухомої (2).

Нерухома котушка для одержання більш рівномірного магнітного поля розділена на дві частини. Рухома котушка закріплена на осі або розтяжках і знаходиться в полі нерухомої. Струм до неї підводиться через спіральні пружини або розтяжки, які при повороті рухомої котушки створюють протидійний момент. При протіканні постійних струмів I_1 та I_2 через обмотки котушок виникає пара сил, яка створює обертальний момент, що намагається повернути рухому котушку так, щоб магнітні потоки котушок збіглися.

Енергія магнітного поля двох котушок із струмами I_1 та I_2

$$W_M = \frac{L_1 \cdot I_1^2}{2} + \frac{L_2 \cdot I_2^2}{2} + M \cdot I_1 \cdot I_2,$$

L_1 та L_2 – індуктивності котушок, M – взаємна індуктивність

При повороті рухомої котушки змінюється тільки взаємна індуктивність M між котушками. Індуктивності L_1 та L_2 і струми I_1 та I_2 від кута повороту α не залежать.

Обертальний момент:

$$M_{об} = \frac{dW_M}{d\alpha} = I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{dM}{d\alpha}.$$

При протіканні в котушках синусоїдних струмів $i_1 = I_{m1} \cdot \sin \omega t$ та $i_2 = I_{m2} \cdot \sin(\omega t - \varphi)$ рухома частина через інерційність реагує на середнє значення обертового моменту:

$$M_{об\ ср} = \frac{1}{T} \int_0^T M_{об}(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T i_1 \cdot i_2 \frac{dM}{d\alpha} dt = I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi \frac{dM}{d\alpha},$$

Обертальний момент електродинамічного механізму пропорційний добуткові діючих значень струмів в котушках та косинусу кута між ними. Ця особливість електродинамічного механізму відкриває можливість побудови на його основі не тільки амперметрів та вольтметрів, але й засобів вимірювання інших величин

При рівності обертального $M_{об}$ та протидійного $M_{пр} = W_{пт} \cdot \alpha$ моментів:

$$I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi \frac{dM}{d\alpha} = W_{пт} \alpha$$

Звідки рівняння перетворення електродинамічного механізму:

$$\alpha = \frac{1}{W_{пт}} \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi \frac{dM}{d\alpha}.$$

Якщо I_1 та I_2 – постійні струми, то в цьому рівнянні $\cos \varphi = 1$.

Магнітне поле електродинамічного механізму, силові лінії якого замикаються в повітрі, невелике. Зовнішні магнітні поля викликають додаткові обертальні моменти від взаємодії цих полів з полем рухомої котушки. Внаслідок цього виникають додаткові похибки. **Для захисту механізмів від зовнішніх магнітних полів їх поміщають в феромагнітні екрани або механізм виготовляють у вигляді астатичної конструкції.**

Переваги приладів електродинамічної системи:

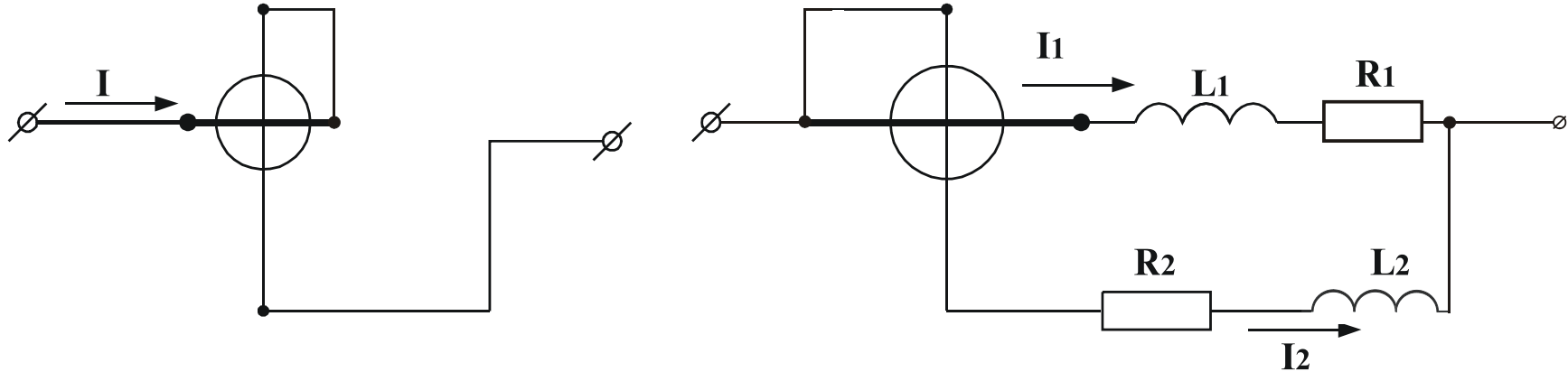
- однакові покази на постійному та змінному струмах, що дозволяє з великою точністю градуювати їх на постійному струмі, а також стабільність показів у часі
- можливість побудови на їх основі ватметрів
- механізми не мають феромагнітних осердь, що виключає появу похибки від вихрових струмів та гістерезису

Недоліки приладів електродинамічної системи:

- невисока чутливість
- велике власне споживання потужності
- чутливість до перевантажень

Широке використання для побудови різних приладів знаходять логометричні електродинамічні механізми.

Амперметри електродинамічної системи



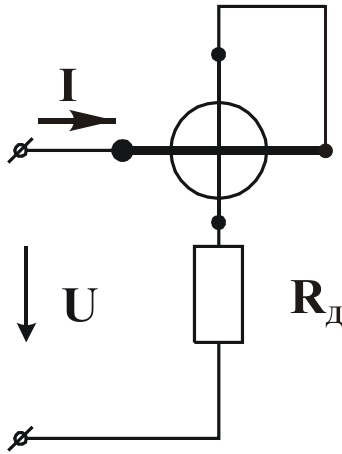
Послідовне з'єднання котушок використовується в амперметрах на малі струми.

При великих струмах котушки з'єднуються паралельно.

Опори R_1 та R_2 та індуктивності L_1 та L_2 підбирають такими, щоб струм через рухоми котушку не перевищував припустимого значення, а зсув фаз між струмами I_1 та I_2 дорівнював нулю.

$$\alpha = \frac{1}{W_{\text{пт}}} \cdot I^2 \frac{dM}{d\alpha},$$

Вольтметри електродинамічної системи

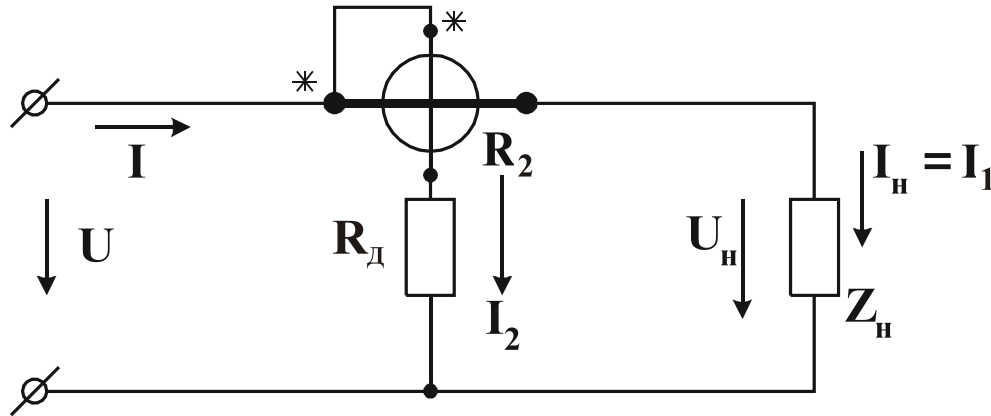


Нерухома та рухома котушки з'єднані послідовно разом з додатковим резистором R_d

$$\alpha = \frac{1}{W_{\text{ПТ}}} \cdot \frac{dM}{d\alpha} \cdot \frac{1}{Z_B^2} \cdot U^2,$$

Струм через вимірювальний механізм при заданій напрузі визначається тільки опором приладу. Якщо цей опір змінюється від частоти при незмінній напрузі, то це безпосередньо впливає на покази приладу. Особливо це проявляється у вольтметрах з малим додатковим опором. Для компенсації частотної похибки паралельно додатковому резистору приєднується ємність так само, як це робиться в електромагнітних вольтметрах

Ватметри електродинамічної системи



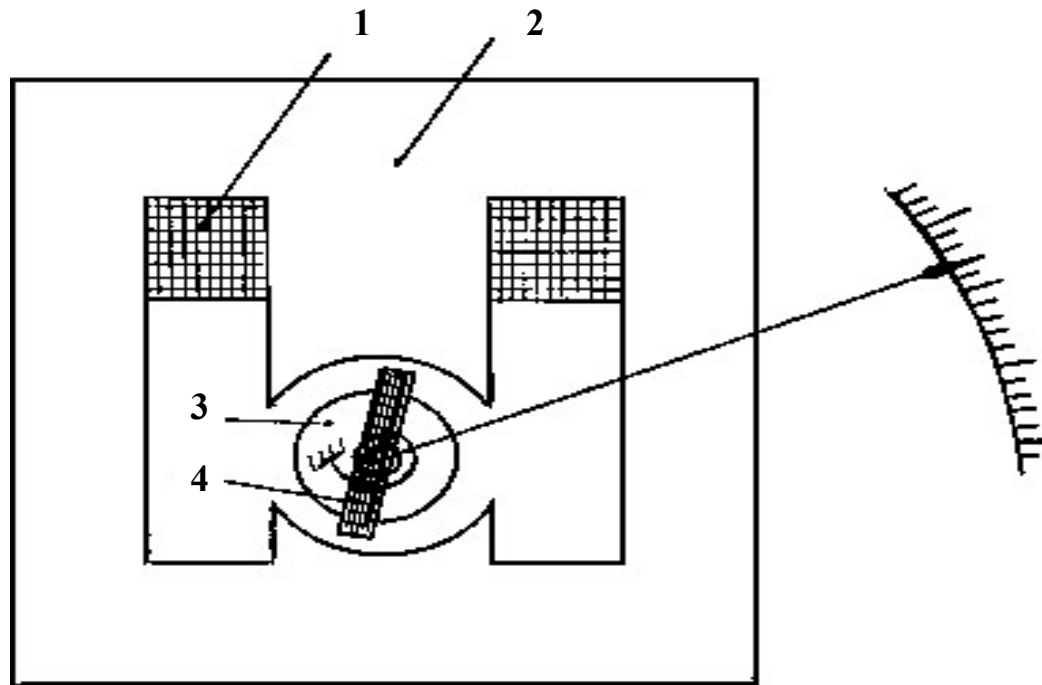
$$\alpha = \frac{1}{W_{\text{пт}}} \cdot I_H \frac{U_H}{R_D + R_2} \cdot \cos \varphi \frac{dM}{d\alpha}$$

$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ – потужність в навантаженні

Напруга на паралельній вітці ватметра відрізняється від напруги на навантаженні на величину спаду напруги на нерухомій (послідовній) котушці ватметра, яка набагато менша за напругу на навантаженні.

Необхідно, щоб струм через одну із котушок дорівнював струму навантаження, а струм через іншу котушку був пропорційний напрузі на навантаженні; зсув фаз між струмами повинен дорівнювати зсуву фаз між напругою та струмом в навантаженні.

Феродинамічний вимірювальний перетворювач



Феродинамічні вимірювальні механізми за суттю є різновидом електродинамічних, від яких вони відрізняються не за принципом дії, а конструктивно.

- 1 - нерухома котушка
- 2 - осердя нерухомої котушки
- 3 - осердя рухомої котушки
- 4 - рухома котушка

Для збільшення магнітних потоків нерухомої та рухомої котушок всередині них розміщують магнітопроводи (осердя) з магнітом'якого матеріалу.

Переваги приладів електродинамічної системи:

Завдяки наявності магнітопроводів значно збільшується обертальний момент, **зростає чутливість механізму, і може бути зменшене власне споживання потужності механізму.**

Внаслідок сильного власного поля механізму **різко знижується вплив зовнішніх магнітних полів.**

Недоліки приладів електродинамічної системи:

Наявність магнітопроводів **збільшує похибку приладів через вихрові струми та гістерезис, а також через нелінійність залежності індукції від напруженості магнітного поля.**

Феродинамічні вимірювальні механізми широко застосовуються в самописних приладах

Тема 6. Електронні вимірювальні прилади

В електронних аналогових приладах вхідна (вимірювана) величина перетворюється у вихідну аналоговими електронними перетворювачами. У кожного з таких перетворювачів вихідна величина є безперервною функцією вхідної.

Основними перевагами електронних приладів є великий вхідний опір та широкий частотний діапазон. Великий вхідний опір обумовлює малу споживану від об'єкта вимірювання потужність, що не порушує режиму його роботи.

Крім того, **багато електронних приладів мають більш високу чутливість (і поріг чутливості) у порівнянні з електромеханічними приладами.** Наприклад, вольтметри для вимірювання постійної напруги, в яких використовується перетворення постійної напруги у змінну, мають нижній поріг чутливості в декілька мікрвольт.

Електронні вольтметри

В електронних вольтметрах **вимірювана напруга** (постійна чи змінна) **перетворюється в постійний струм і вимірюється магнітоелектричним вимірювальним механізмом** із шкалою, яка відградує в одиницях напруги.

Застосування магнітоелектричного вимірювального механізму зумовлено його високою чутливістю та рівномірністю шкали.

Електронні вольтметри охоплюють широкий діапазон вимірюваних напруг від десятків нановольт на постійному струмі до десятків кіловольт); мають вхідний опір, як правило, не нижчий 1 МОм, можуть працювати в широкому діапазоні частот – від постійного струму до частот порядку сотень мегагерц.

Електронні вольтметри поділяються на вольтметри постійного струму та змінного струму.

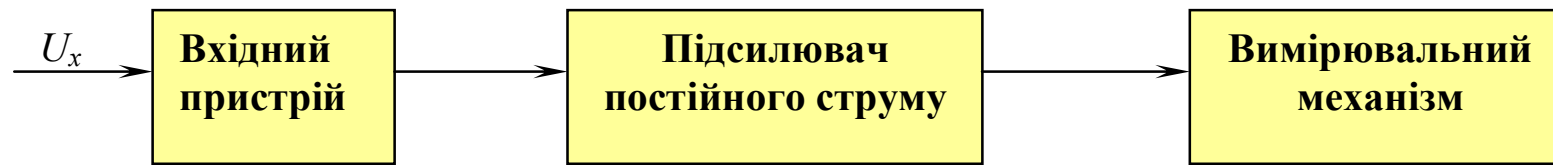


Схема вольтметра постійного струму

Вхідний пристрій призначений для формування високого вхідного опору. Підсилювач постійного струму послаблює або підсилює напругу до значень, необхідних для надійної роботи вимірювального механізму. Одночасно підсилювач забезпечує узгодження високого опору вхідного пристрою з низьким опором вимірювального механізму.

Суттєвим недоліком є наявність “дрейфу” нуля у підсилювача постійного струму.

Вхідний опір електронного вольтметра складає декілька десятків МОм. Діапазон вимірюваних напруг постійного струму – від десятків мілівольт до декількох кіловольт.

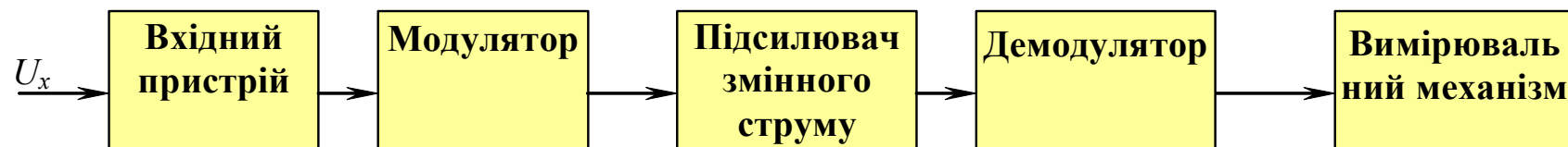


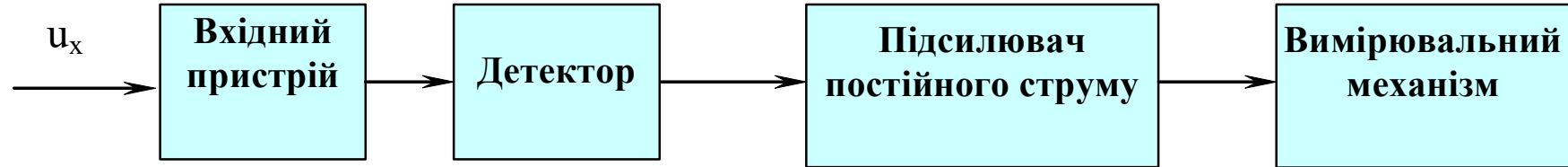
Схема високочутливого вольтметра для вимірювання малих напруг

Модулятор перетворює постійну напругу в змінну, яка підсилюється підсилювачем змінного струму і демодулятором знову перетворюється в постійну.

Така схема дозволяє одержати вольтметри з більш високими метрологічними характеристиками, оскільки у підсилювача змінного струму відсутній дрейф нуля. Робочий діапазон таких мікрвольтметрів постійного струму – 10^{-8} –1 В.

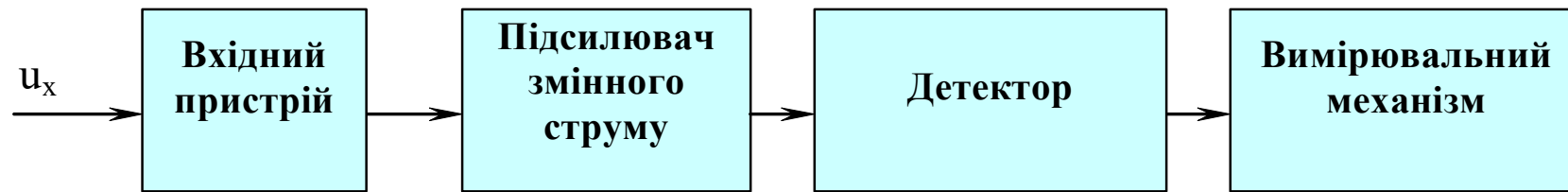
Також існують ще **вольтметри з фотогальванометричними підсилювачами**, що являють собою поєднання магнітоелектричного гальванометра з фотоперетворювачами та підсилювачами постійного струму. Вольтметри цього типу мають найвищу чутливість.

Електронні вольтметри змінного струму виконуються за двома структурними схемами



В першій схемі вимірювана змінна напруга спочатку перетворюється детектором у постійну, потім підсилюється підсилювачем постійного струму (ППС).

За першою схемою вольтметри мають дуже широкий частотний діапазон (10 Гц–1000 МГц), але не можуть вимірювати малі напруги (менші декількох десятих вольт), оскільки детектор не може випрямити малі напруги з високою точністю. Другий недолік – дрейф нуля ППС.



У другій схемі підсилення проводиться на змінному струмі.

За другою схемою будуються вольтметри з нижньою межею в одиниці мікрвольт. Однак у них менший частотний діапазон, оскільки підсилювач змінного струму не може підсилювати напруги в широкому діапазоні частот.

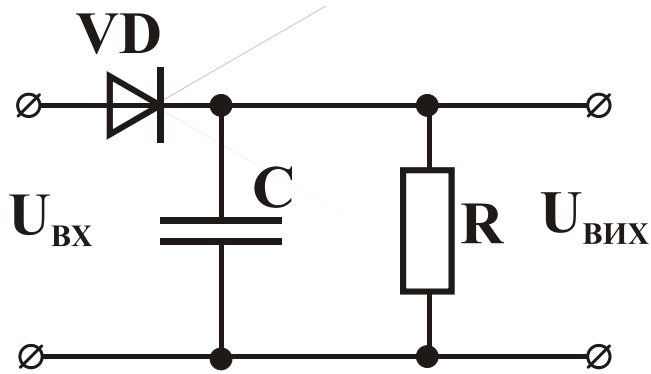
Детектори в електронних вольтметрах змінного струму **можуть на виході формувати значення, пропорційні амплітудному, середньому або середньому квадратичному (діючому) значенню вхідної напруги.** Відповідно цьому вони мають і назви.

Детектори середнього (або середнього випрямленого) **значення** являють собою випрямлячі на діодах, такі самі, як у випрямних електромеханічних приладах.

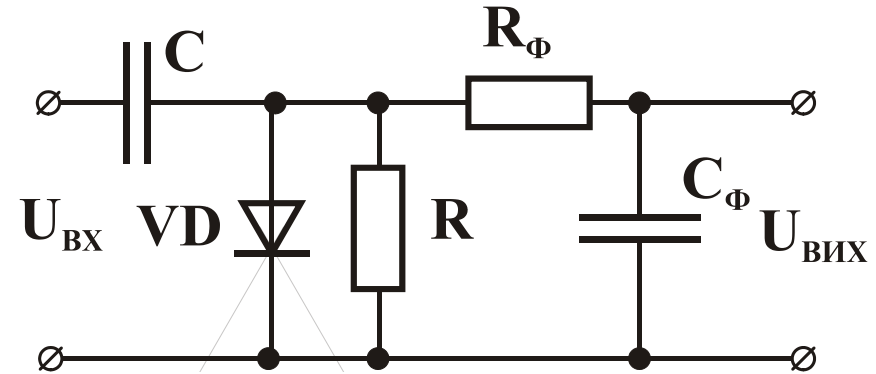
Амплітудні детектори мають діод та конденсатор, який заряджається до амплітудного значення напруги, що пропорційна вхідній. На виході детектора повинно бути навантаження з дуже великим опором (50-100 МОм), тому амплітудні вольтметри будують за першою схемою детектор-підсилювач, оскільки підсилювач постійного струму має великий вхідний опір.

В детекторах середньоквадратичного значення використовуються діоди з квадратичною ділянкою вольт-амперної характеристики або термоперетворювачі.

Розрізняють детектори з відкритим та закритим входами



Детектор з відкритим входом



Детектор з закритим входом

В детекторах із відкритим входом постійна складова вимірюваної напруги проходить через діод на вихід детектора, а в детекторах із закритим входом – не проходить.

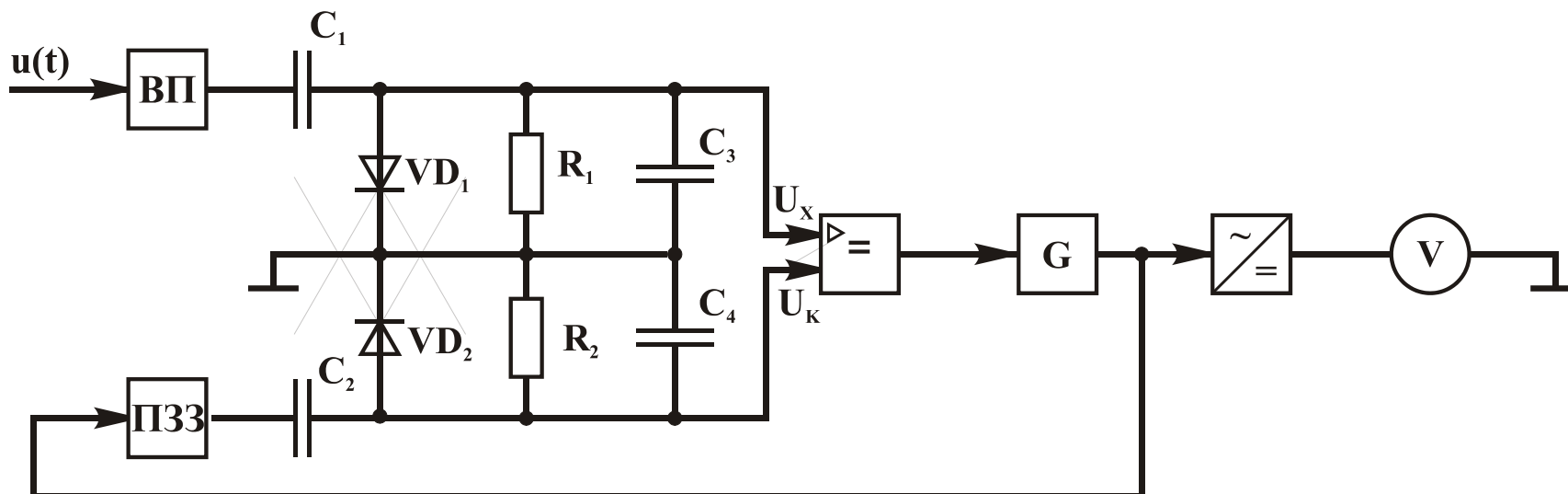
У відповідності з тим, який детектор застосовується, вольтметри мають такі ж назви: **вольтметри амплітудного, середнього та середнього квадратичного значення.**

Одним із найважливіших вузлів, які визначають основні метрологічні характеристики вольтметра, є підсилювач (або постійного, або змінного струму). Основним недоліком ППС є дрейф нуля.

Від підсилювачів змінного струму вимагається високий та стабільний коефіцієнт підсилення, малі нелінійні спотворення, нечутливість до зовнішніх факторів. Для цього в підсилювачі (як правило, багатокаскадні) вводиться зворотний зв'язок.

Вольтметри амплітудного та середнього значення мають похибки, які залежать від форми кривої вимірюваної напруги. Вольтметри середнього значення найчастіше градууються в середніх квадратичних (діючих) значеннях напруги синусоїдної форми. Для визначення діючих значень напруг, форма яких відрізняється від синусоїди, потрібно знати коефіцієнт форми кривої. Якщо це не враховувати, то при вимірюваннях можуть виникати великі похибки.

Амплітудний (піковий) вольтметр



Покази амплітудного вольтметра прямо пропорційні амплітудному значенню змінної напруги незалежно від форми кривої напруги.

Такої властивості не має жодна із систем електромеханічних приладів.

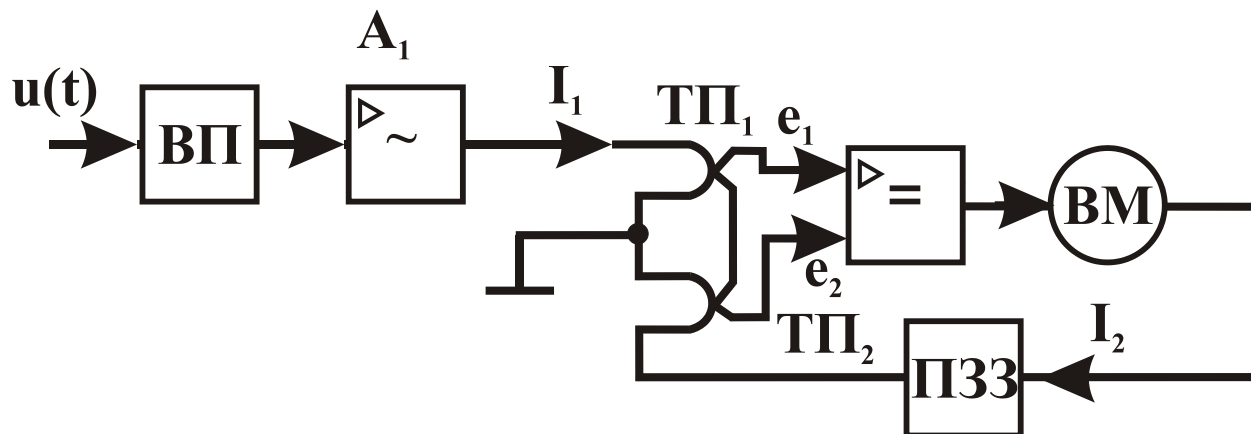
Амплітудні вольтметри будуються за схемою детектор-підсилювач і тому мають найширший частотний діапазон.

Вимірювана напруга $u(t)$ подається через вхідний пристрій **ВП** на вхід пікового детектора із закритим входом **VD₁, C₁**. На ідентичний піковий детектор **VD₂, C₂** подається компенсувальна напруга, сформована у колі зворотного зв'язку генератором-модулятором.

Постійні напруги, що дорівнюють амплітудним значенням вимірюваної **U_x** і компенсувальної **U_k** напруг, порівнюються на резисторах **R₁, R₂**. Різницева напруга **U_x – U_k** фільтрується конденсаторами **C₃** і **C₄** та подається на підсилювач постійного струму із високим коефіцієнтом підсилення. Якщо напруга на його виході має позитивну полярність **U_x – U_k > 0**, що свідчить про перевищення вимірюваної напруги **U_x** над компенсувальною **U_k**, або відсутність останньої, то запускається раніше закритий генератор-модулятор, і компенсувальна напруга надходить через подільник зворотного зв'язку **ПЗЗ** на детектор **VD₂, C₂** і паралельно на перетворювач змінної напруги у постійну, яка вимірюється магнітоелектричним вольтметром **V**.

Перевищення **U_k** над **U_x** призводить до закривання генератора-модулятора **G**.

Вольтметр середніх квадратичних значень



Вимірювання середніх квадратичних значень (СКЗ) змінних напруг вимагає перетворювача змінної напруги в постійну, що має квадратичну характеристику. Якщо цю постійну напругу подати на магнітоелектричний вольтметр, то покази останнього будуть пропорційні квадрату СКЗ. Тому **під час градуювання шкали необхідно виконати операцію добування кореня.** Але в даному випадку шкала вольтметра буде нерівномірною.

У цьому вольтметрі діючих значень із рівномірною шкалою використовується два квадратичних перетворювачі $T_{п1}$ і $T_{п2}$, один з яких ввімкнено в коло негативного зворотного зв'язку.

В якості таких перетворювачів використовуються термoperетворювачі з термо-ЕРС:

$$e_1 = k_1 I_1^2 \quad e_2 = k_2 I_2^2$$

Вихідний струм I_1 широкопasmового підсилювача A_1 змінного струму пропорційний вимірюваній напрузі

$$I_1 = K_{п} U_x$$
$$e_1 = k_1 I_1^2 = k_1 K_{п}^2 U_x^2$$

Відхилення кута повороту рухомої частини магнітоелектричного вимірювального механізму

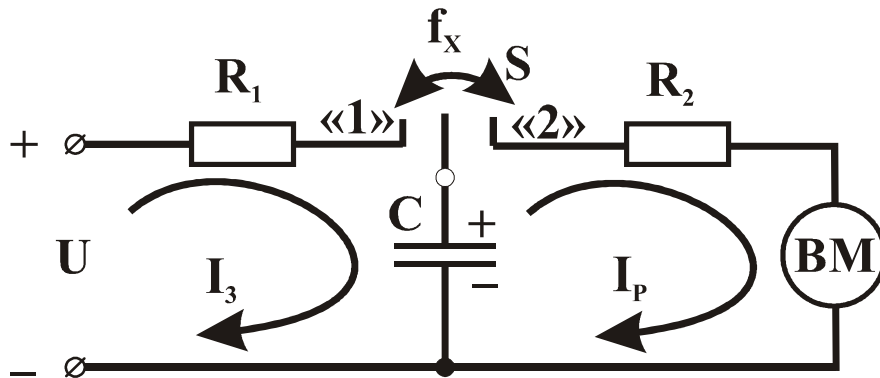
$$\alpha = S_v I_2 = S_v K_{п} \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} U_x = K_v U_x$$

Електронні частотоміри

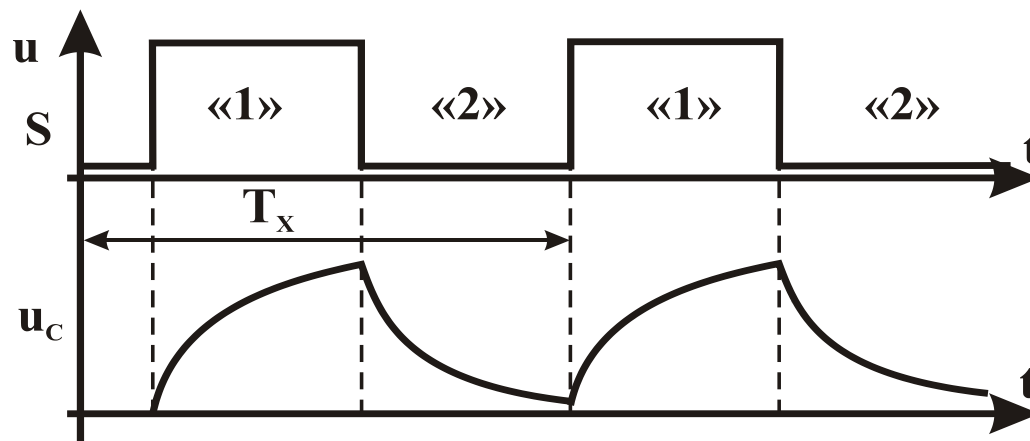
В основу побудови електронних частотомірів покладені такі методи вимірювання:

- заряду і розряду конденсатора;
- резонансний метод;
- дискретної лічби.

Методу заряду і розряду конденсатора ґрунтується на вимірюванні середнього струму розряду зразкового конденсатора, який перемикається із заряду на розряд з вимірюваною частотою f_x .



R_1, R_2 – струмообмежувальні резистори;
 C – зразковий конденсатор;
 S – перемикач;
 BM – вимірювальний механізм магнітоелектричної системи;
 I_3 – струм заряду конденсатора;
 I_p – струм розряду конденсатора



В положенні “1” перемикача S конденсатор C заряджається. Струм заряду проходить такий шлях:

$$+U \rightarrow R1 \rightarrow S(1) \rightarrow C \rightarrow -U$$

В положенні “2” перемикача S конденсатор C розряджається. Струм розряду проходить такий шлях:

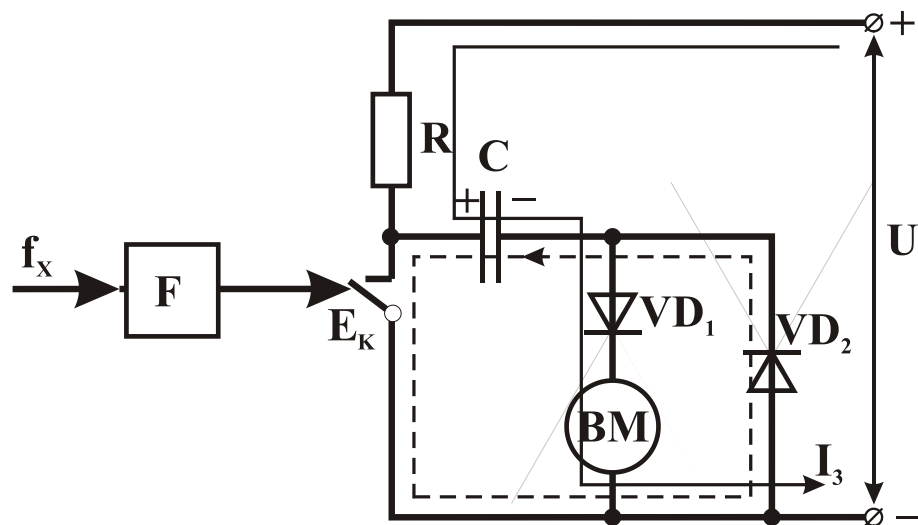
$$+C \rightarrow R2 \rightarrow BM \rightarrow -C.$$

Таким чином, за один період T_x через BM проходить заряд $q = C U$

Середнє значення струму в його колі пропорційне вимірюваній частоті

$$I_{\text{ср}} = \frac{q}{T_x} = q f_x = C U \cdot f_x$$

Електронний конденсаторний частотомір



Напруга вимірюваної частоти f_x подається на вхід формувача **F**, вихідними прямокутними імпульсами якого керується схема електронного ключа **E_к**.

За один період вимірюваної частоти через рамку вимірювального механізму магнітоелектричної системи протікає струм, середнє значення якого становить

$$I_{\text{ср}} = \frac{q}{T_x} = q f_x = C U \cdot f_x$$

Рівняння перетворення конденсаторного частотоміра

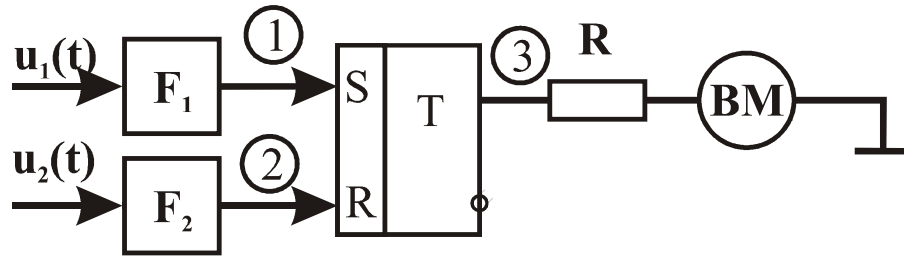
$$\alpha = S_{\text{ВП}} I_{\text{ср}} = S_{\text{ВП}} C U \cdot f_x = K_{\text{ч}} f_x$$

Електронні фазометри

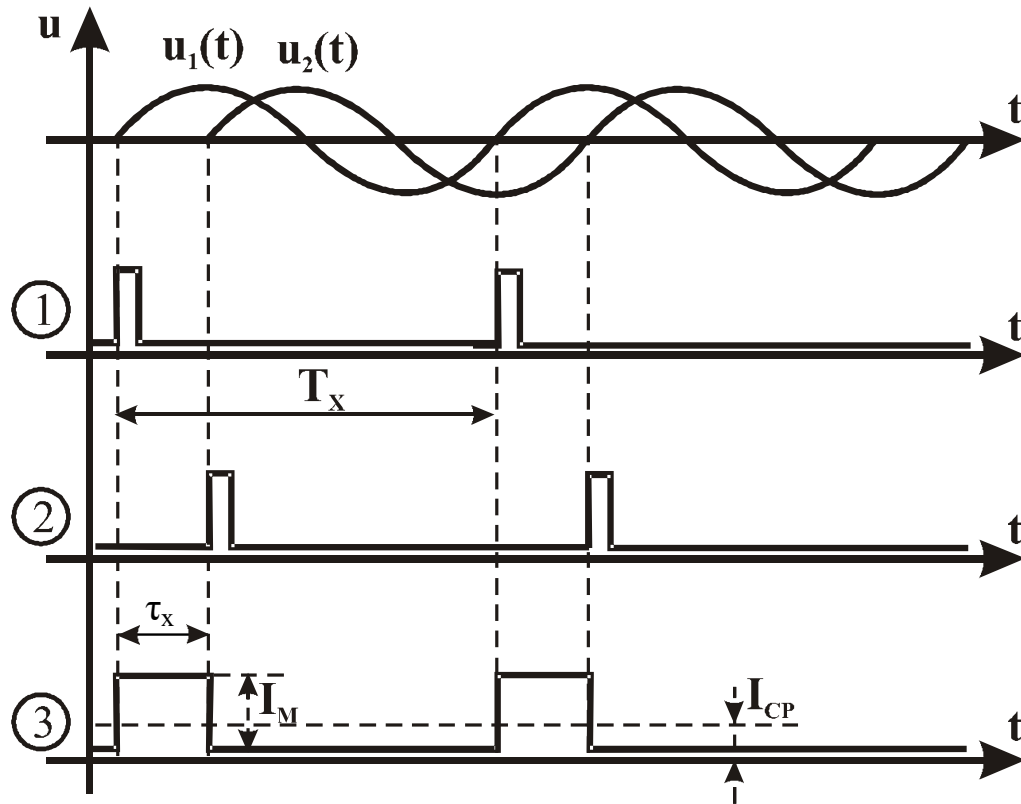
Залежно від способу перетворення різниці фаз в проміжну фізичну величину в основу побудови електронних фазометрів покладено такі методи:

- перетворення різниці фаз в часовий інтервал;
- вимірювання різниці фаз за допомогою осцилографа;
- вимірювання різниці фаз методом дискретної лічби.

Суть методу часового перетворення полягає в перетворенні двох синусоїдних напруг у часовий інтервал, що формується у моменти переходу цих напруг через рівні нуля з похідними однакового знаку.



Напруги $u_1(t)$ і $u_2(t)$, різницю фаз φ_x між якими необхідно виміряти, надходять на входи формувачів F_1 і F_2 .



В моменти переходу синусоїдних напруг $u_1(t)$ і $u_2(t)$ через рівні нуля на виходах формувачів формуються короткі прямокутні імпульси, які надходять на S і R -входи тригера T . За допомогою SR -тригера T в кожному періоді T_x синусоїдних напруг $u_1(t)$ і $u_2(t)$ формується часовий інтервал τ_x , пропорційний різниці фаз φ_x .

Якщо цю послідовність імпульсів τ_x подати на магнітоелектричний вимірювальний перетворювач **ВМ**, то його покази будуть відповідати середньому значенню струму

$$I_{\text{ср}} = \frac{I_m \tau_x}{T_x} = I_m \tau_x f_x$$

Залежність між різницею фаз φ_x і часовим інтервалом τ_x :

$$\varphi_x = \varphi_2 - \varphi_1 = \omega t_2 - \omega t_1 = \omega \cdot (t_2 - t_1) = \omega \cdot \tau_x = 2\pi f_x \cdot \tau_x$$

$$\tau_x = \frac{\varphi_x}{2\pi f_x}$$

$$I_{\text{ср}} = I_m \frac{\varphi_x}{2\pi f_x} f_x = \frac{I_m}{2\pi} \cdot \varphi_x$$

Рівняння перетворення фазометру

$$\alpha = S_{\text{ВП}} I_{\text{ср}} = \frac{S_{\text{ВП}} I_m}{2\pi} \cdot \varphi_x$$

Тема 7. Електронно-променеви́й осцилограф

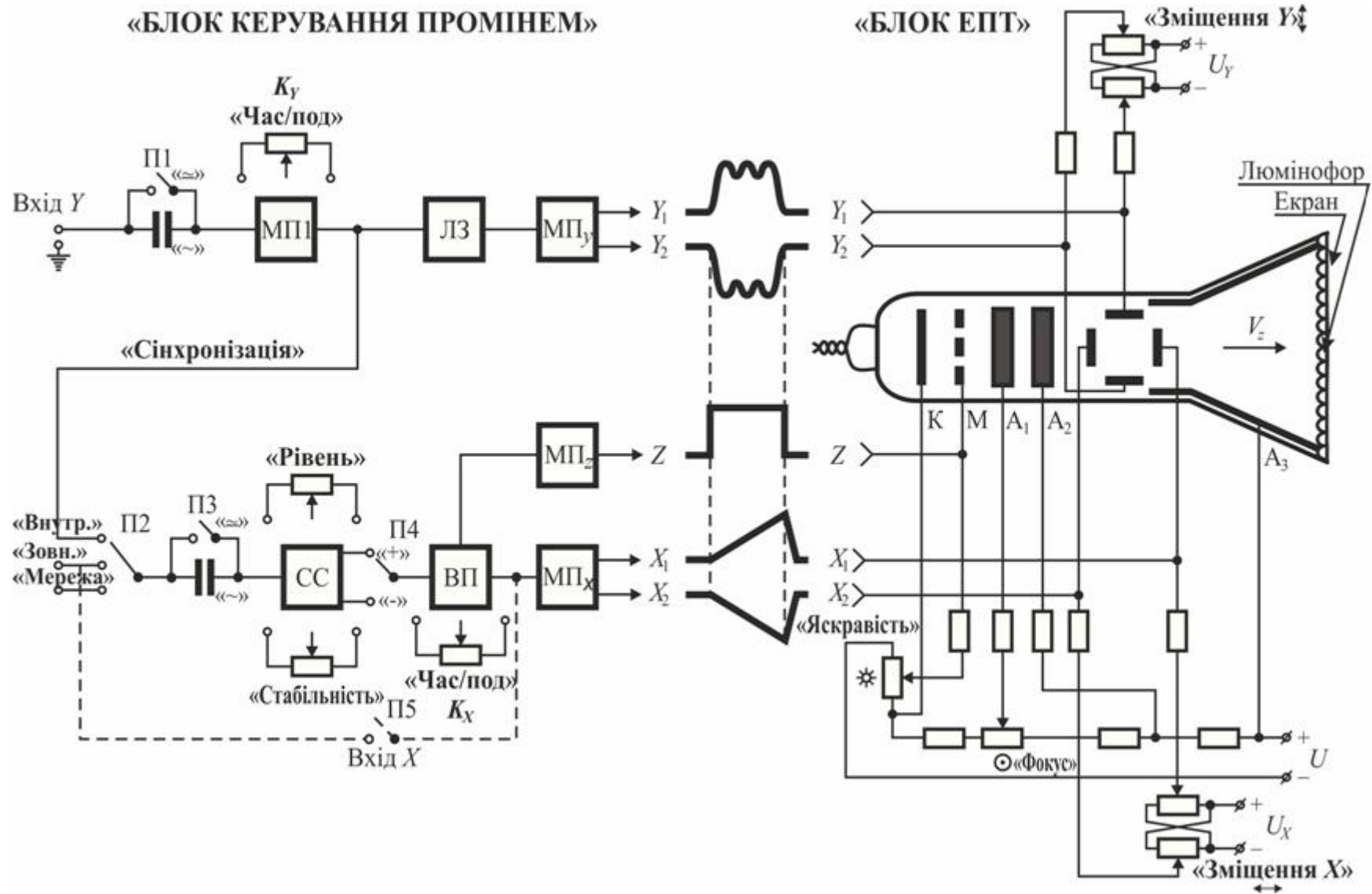
Осцилограф – це прилад, призначений для спостереження, реєстрації та вимірювання параметрів досліджуваного сигналу (напруги), який залежить від часу.

Вони використовуються як окремі прилади, а також у складі різноманітних контрольно-вимірювальних систем і комплексів.

Крім електронних осцилографів існують електромеханічні.

Основним вимірювальним елементом електронного осцилографа є електронно-промене́ва трубка. Досліджуваний сигнал перетворюється у відхилення потоку електронів, який, потрапивши на люмінесцентний екран електронно-променевої трубки, створює лінію, яка світиться. Форма цієї лінії відповідає сигналу, який змінюється в часі.

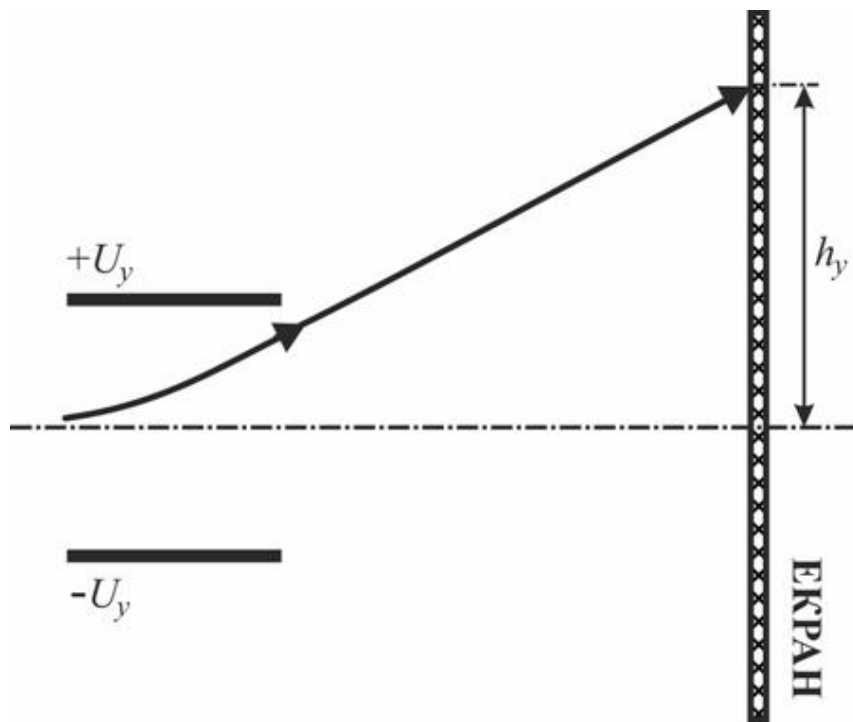
Функціональна схема електронного осцилографа



Електронний прожектор складається з підігрівного **катода К** (джерела електронів), **модулятора М** (діафрагма з отвором), **анодів А1, А2** (циліндри, на які подаються високі позитивні потенціали відносно катода).

Фокусування променя здійснюється сильно неоднорідним електричним полем між електродами прожектора. Змінити фокусування можна, регулюючи **напругу «фокус»**, а струм променя, а отже, яскравість світної точки на екрані регулюють зміною від'ємної відносно катода напруги на **модуляторі «яскравість»**. Поперечні розміри електронного променя у площині екрана – десяті долі міліметра.

На шляху до екрана електронний промінь проходить між двома **парами відхильних пластин Х та Y**. Наявність напруги між відхильними пластинами кожної пари створює між ними електростатичне поле, яке викликає відхилення електронного променя. Одна пара пластин відхиляє промінь у горизонтальному напрямі (**пластини Х**), а інша – у вертикальному (**пластини Y**).



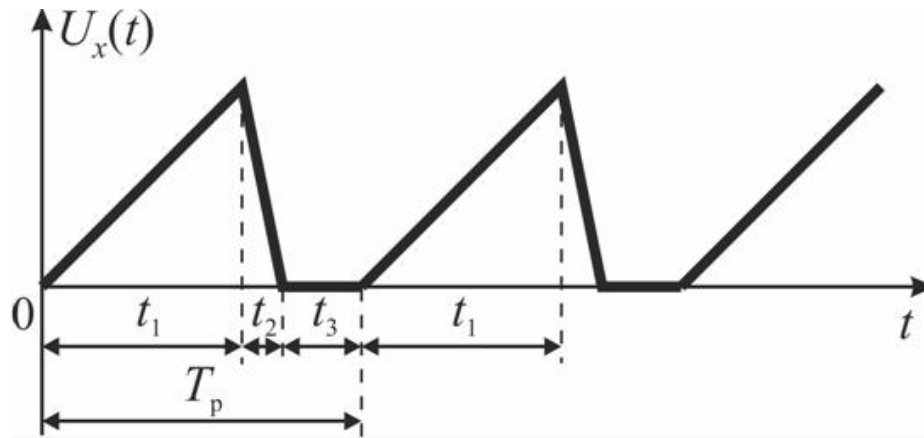
Відхилення світлової плями на екрані

$$h_x = \varepsilon_x \cdot U_x$$

$$h_y = \varepsilon_y \cdot U_y$$

Відхилення світної плями відносно центра екрана h_x , h_y пропорційне напругам U_x , U_y , прикладеним до відхильних пластин, а коефіцієнти пропорційності ε_x , ε_y мають розмірність [мм/В] і називаються чутливістю пластин.

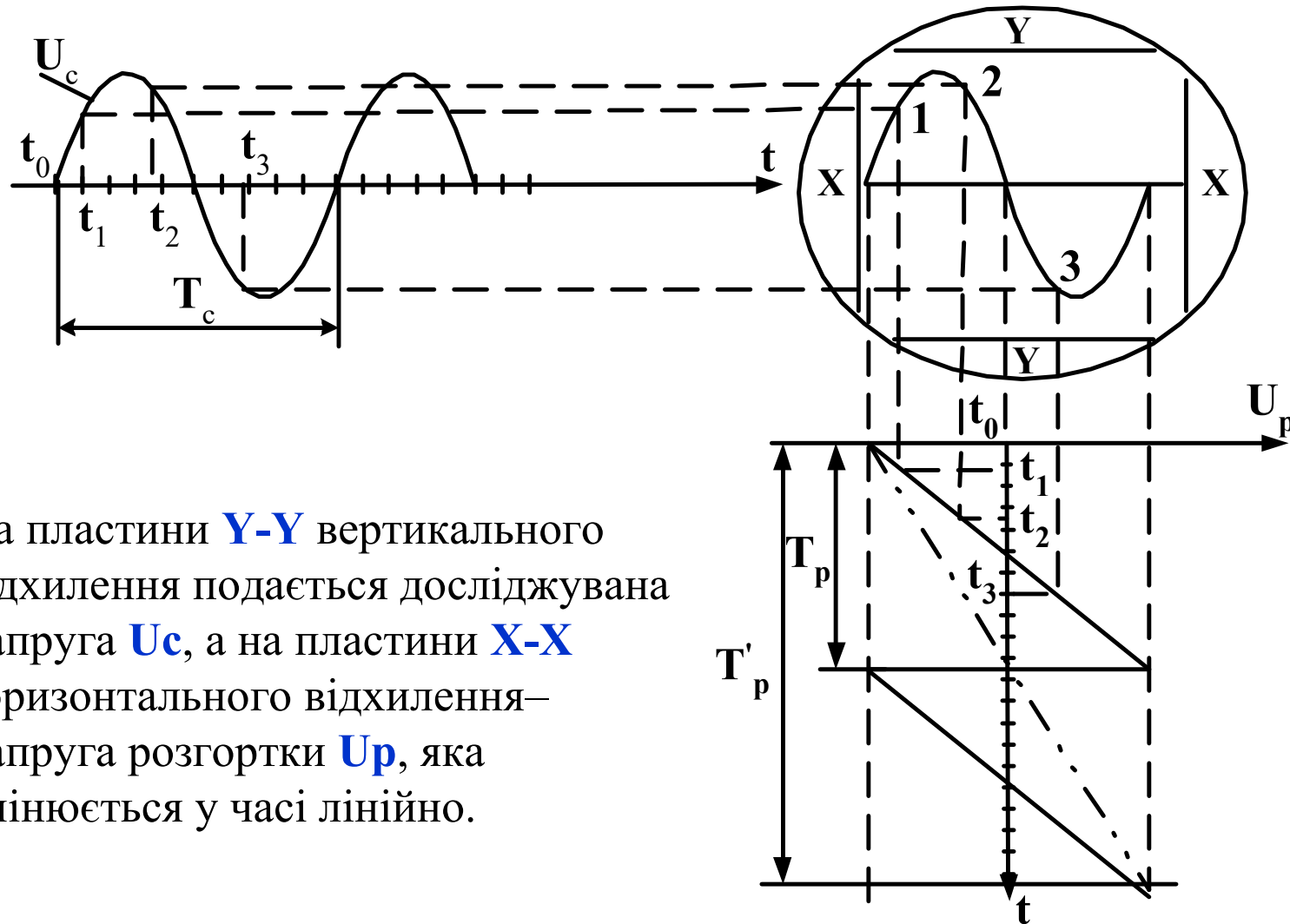
Напруга розгортки



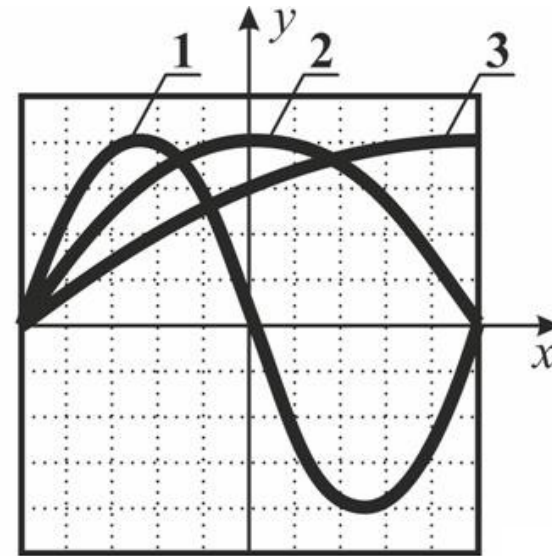
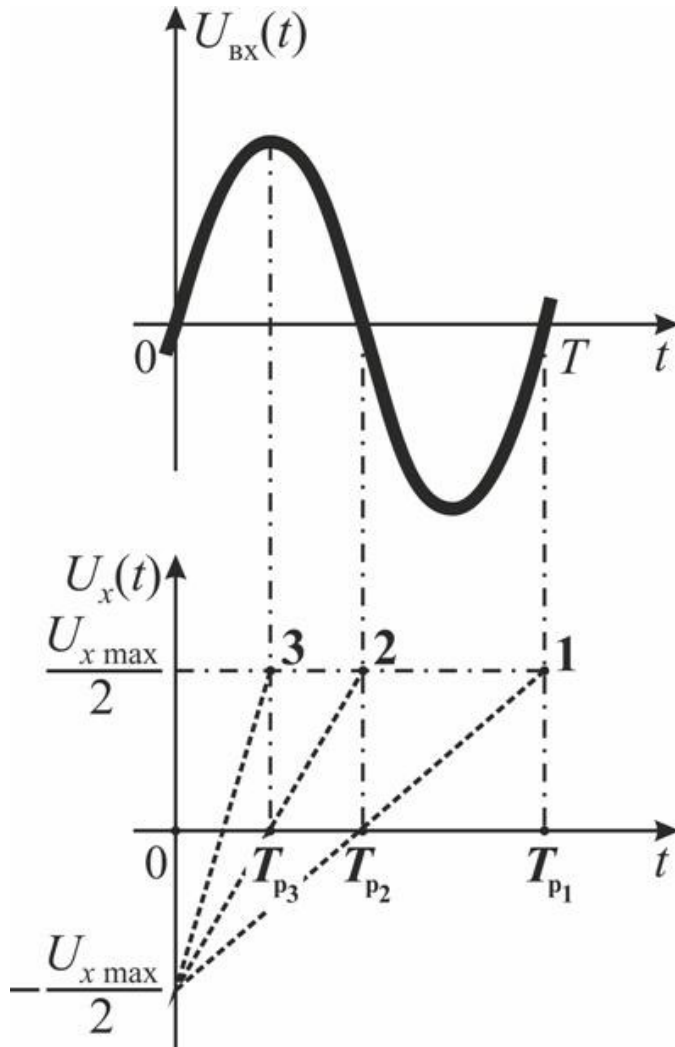
Проміжок часу t_1 називають **часом прямого (робочого) ходу променя**. Протягом цього часу під дією напруги $U_x(t)$ світна точка переміщується екраном зліва направо з рівномірною швидкістю і створює на ньому суцільну лінію.

Протягом **часу t_2 зворотного ходу** промінь повертається справа наліво у початкове положення, щоб у наступний період повторити прямий хід і т.д. Щоб протягом часу t_2 світної точки на екрані не було видно, на цей час вимикають електронний промінь, подаючи на модулятор трубки заперну напругу. А протягом прямого ходу розгортки t_1 електронний промінь відпирають спеціальними прямокутними імпульсами позитивної полярності, які формуються в генераторі розгортки і після підсилення в каналі **Z** подаються на модулятор трубки.

Принцип одержання зображення періодичного сигналу



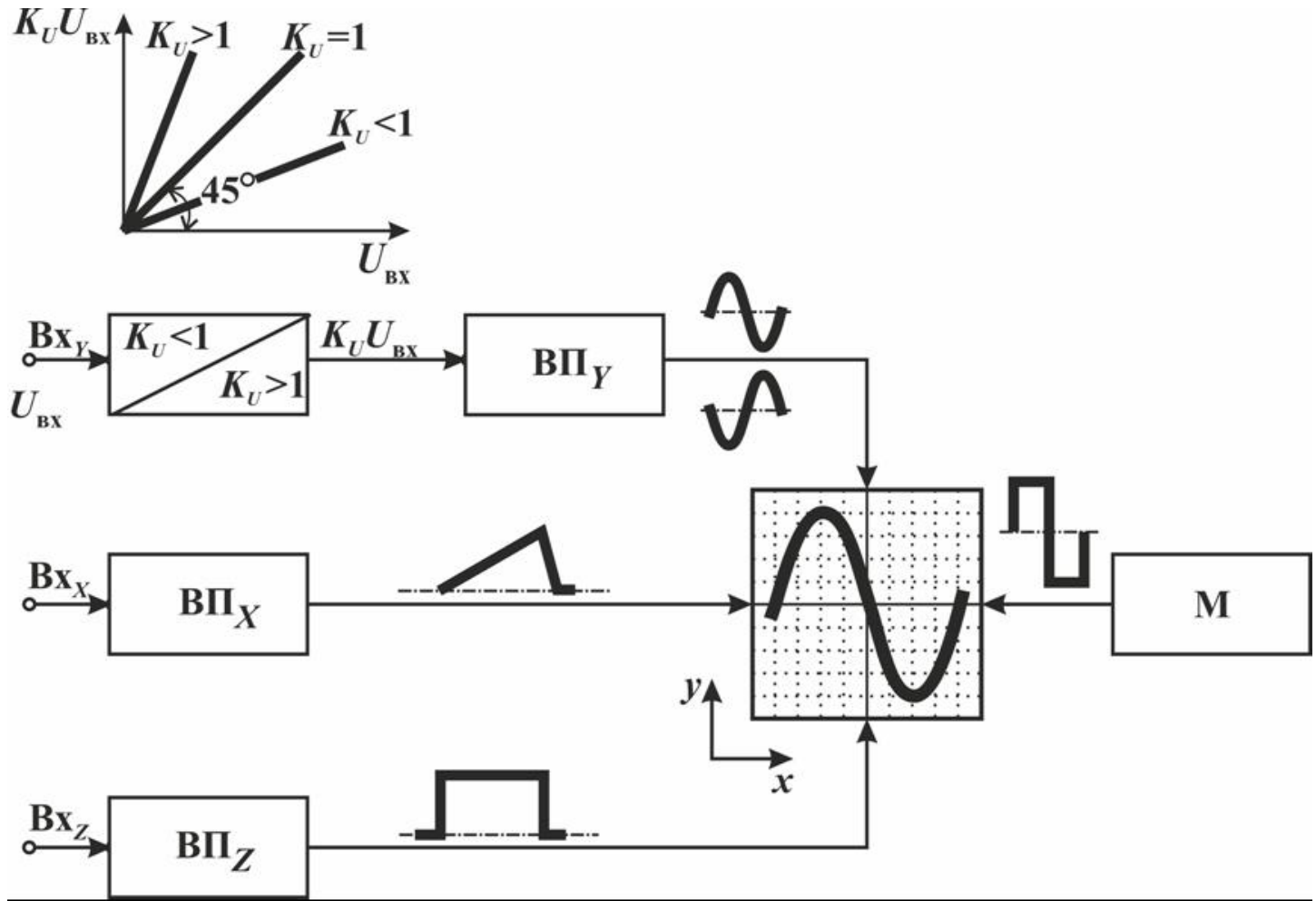
На пластини **Y-Y** вертикального відхилення подається досліджувана напруга **Uc**, а на пластини **X-X** горизонтального відхилення— напруга розгортки **Up**, яка змінюється у часі лінійно.



Приклад відображення вхідного гармонічного сигналу $U_{BX}(t)$ на екрані осцилографа для трьох тривалостей розгортки.

Тривалість розгортки вибрана рівною періоду синусоїдального сигналу (осцилограма 1), його половині (осцилограма 2) і четвертій частині (осцилограма 3).

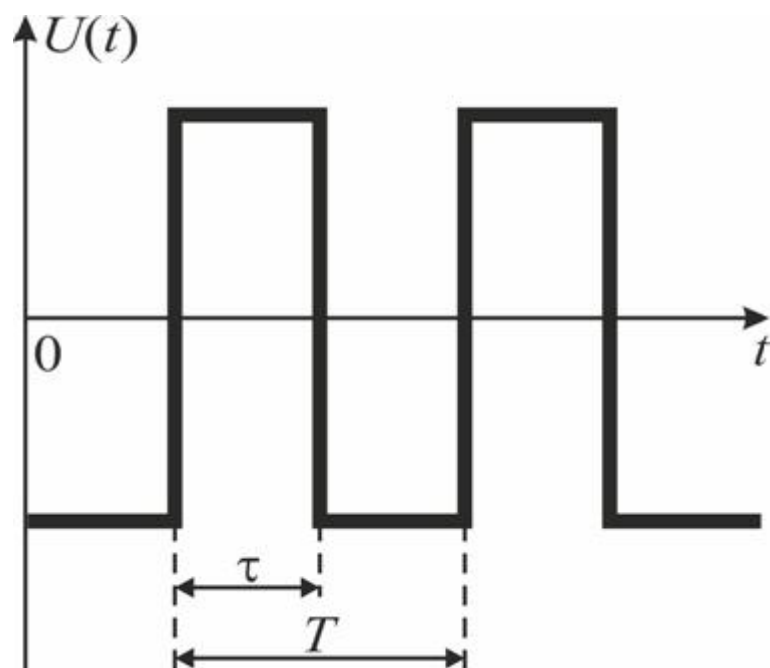
Метрологічна схема осцилографа



На канал Z подається сигнал керування яскравістю зображення.

Перед початком вимірювань осцилограф потрібно відкалібрувати. Калібрування полягає в перевірці та встановлення коефіцієнтів K_x і K_y за допомогою нерегульованої міри напруги і часу (калібратора).

Сигнал калібратора має строго прямокутну форму з частотою $1 \dots 2$ кГц і шпаруватістю $Q = 2$. Основна похибка калібрування напруги і часу складає $\sim 1 \%$.



Калібрувальний сигнал

τ – тривалість імпульсу;

T – період імпульсу

Блок розгортки може працювати в двох режимах: неперервному (автоколивальному) і очікувальному. В режимі неперервної розгортки пауза відсутня. Однак в цьому режимі зображення на екрані буде доволіно рухатись, що незручно для спостереження. Воно стане нерухомим, якщо період напруги розгортки T_p буде дорівнювати або буде кратним періоду досліджуваної напруги T : $T_p = n \cdot T$.

В режимі очікувальної розгортки момент початку прямого ходу променя синхронізується з початком досліджуваного сигналу. Після закінчення зворотного ходу променя блок розгортки «очікує», поки досліджувана напруга знову не досягне початкового рівня запуску.

Примусова генерація генератором розгортки напруги з частотою, яка дорівнює або кратна частоті досліджуваного сигналу, називається **синхронізацією**.

Для здійснення синхронізації до генератора розгортки (ГР) подається синхронізуючий сигнал. Ним може бути досліджуваний сигнал, що подається з каналу Y (внутрішня синхронізація). При зовнішній синхронізації до ГР підводиться зовнішня синхронізуюча напруга.

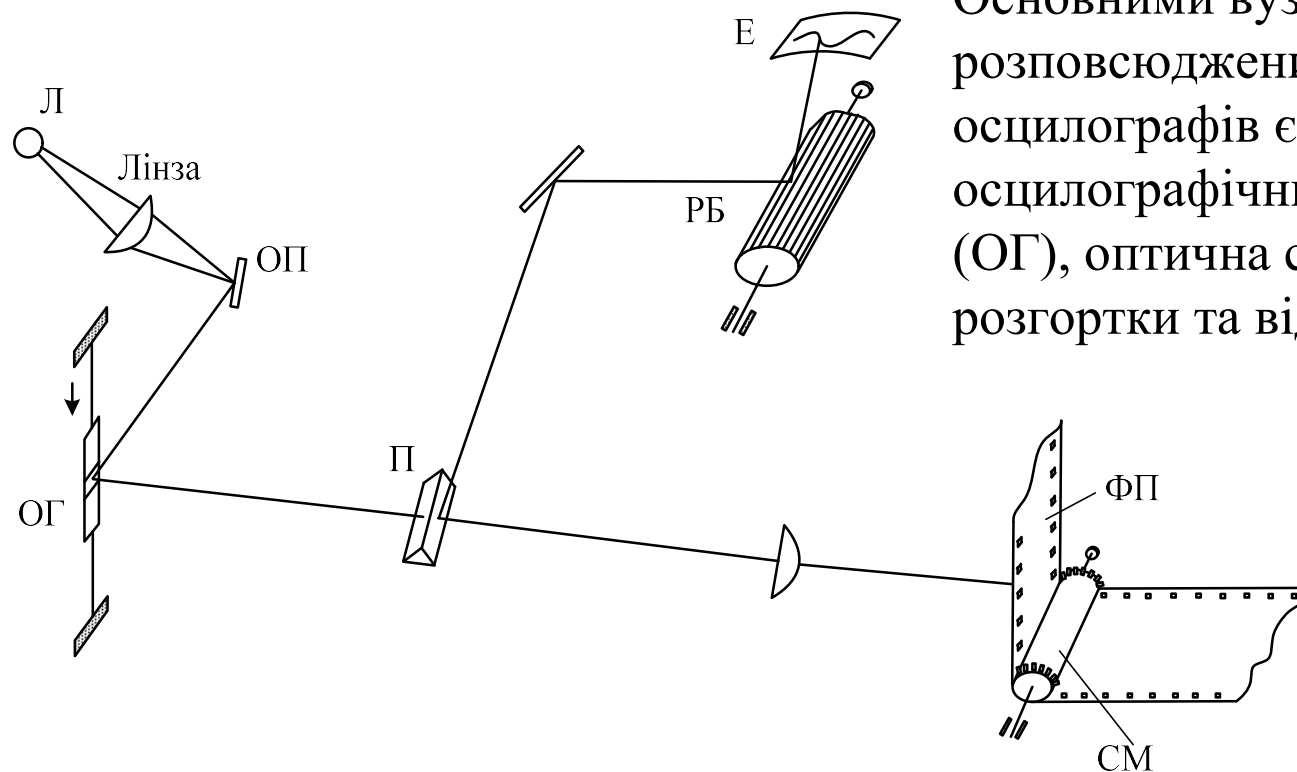
В електронному осцилографі є затримка початку горизонтальної розгортки через деяку інерційність як блоків синхронізації і підсилення, так і генератора розгортки. Ця затримка становить десятки наносекунд. Для узгодження досліджуваного сигналу з початком горизонтальної розгортки в каналі Y передбачена лінія затримки (ЛЗ). Вона затримує вхідний сигнал і компенсує, таким чином, затримку появи розгортки в каналі X.

Осцилографи поділяються на універсальні, швидкісні, стробоскопічні, запам'ятовувальні, багатопроменеві, спеціальні.

Найбільше розповсюдження отримали **універсальні осцилографи.**

Світлопроменевий осцилограф

Світлопроменеві осцилографи являють собою електромеханічні прилади, призначені для реєстрації та спостережень змінних у часі електричних сигналів за допомогою світлового променя.



Основними вузлами найбільш розповсюджених світлопроменевих осцилографів є: магнітний блок з осцилографічними гальванометрами (ОГ), оптична система, пристрій розгортки та відмітник часу.

Тонкий промінь світла за допомогою оптичного пристрою від лампочки **Л** направляється на дзеркальце осцилографічного гальванометра **ОГ**.

Осцилографічний гальванометр являє собою закріплену на розтяжках мініатюрну рухому рамку магнітоелектричного вимірювального механізму, поміщену в металевий немагнітний кожух з полюсними наконечниками з магнітом'якого матеріалу.

Така конструкція гальванометра з кожухом та ручкою для встановлення в гнізда магнітного блока називається **гальванометром–вставкою**.

Магнітний блок складається з одного спільного для декількох вставок постійного магніту з магнітопроводом з гніздами для вставок. Рамка **ОГ** знаходиться в сильному магнітному полі постійного магніту.

Промінь світла від дзеркальця **ОГ**, проходячи через призму **П**, розділяється на два, один з них потрапляє на фотоплівку, а другий – спочатку на барабан розгортки **РБ**, а потім – на матовий екран **Е**. При протіканні струму через рамку **ОГ**, вона відхиляється. Ці відхилення фіксуються на фотоплівці **ФП** і спостерігаються на екрані **Е**. Стрічкопротяжний механізм для фотоплівки і дзеркальний барабан приводяться в рух двигуном.

Тема 8. Цифрові вимірювальні прилади

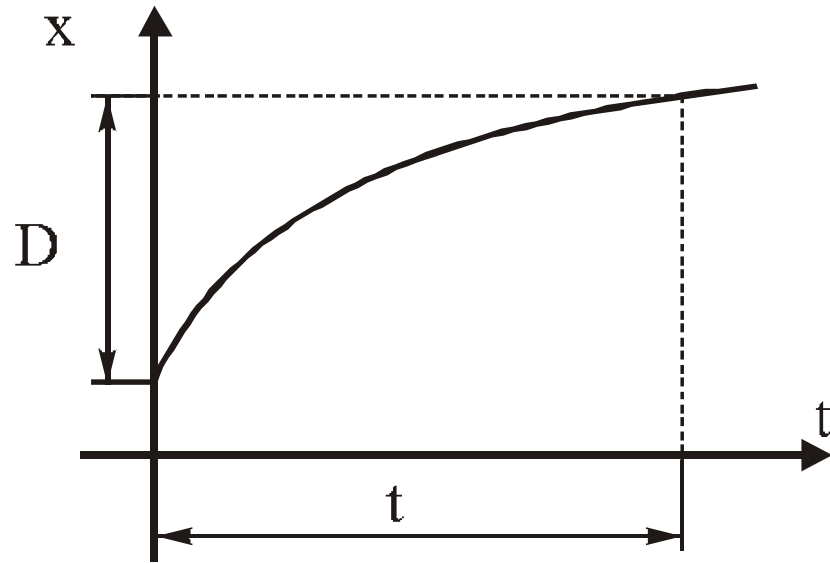
Цифровими називаються такі **вимірювальні прилади**, в яких вимірювана величина автоматично в результаті квантування, дискретизації, порівняння, цифрового кодування і відповідних обчислень постає у вигляді коду.

Принцип роботи цифрових вимірювальних приладів (ЦВП) засновано на дискретному відображенні неперервних величин.

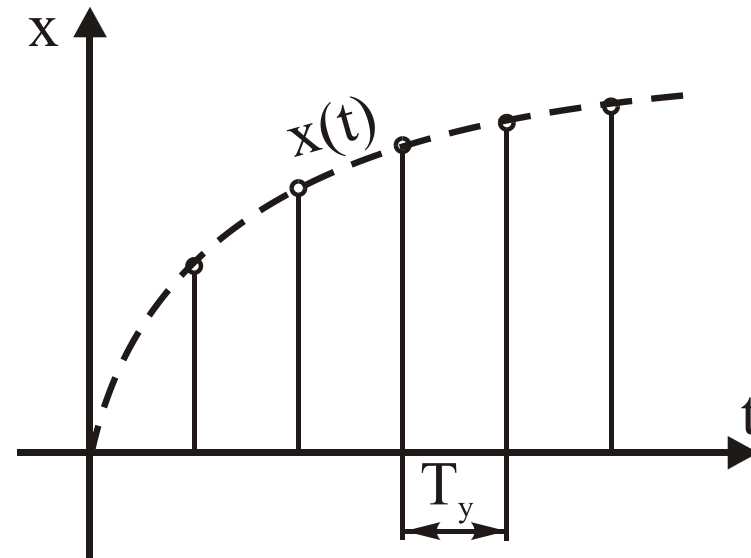
Неперервна величина $X(t)$ - це величина, яка може мати в заданому діапазоні D нескінченно велике число значень в інтервалі часу t при нескінченно великому числі моментів часу. Величина може бути неперервною або за значенням, або у часі.

Величина, неперервна за значенням і перервна у часі, називається **дискретизованою**

Кроком дискретизації називається проміжок часу між двома сусідніми миттєвими значеннями сигналу.



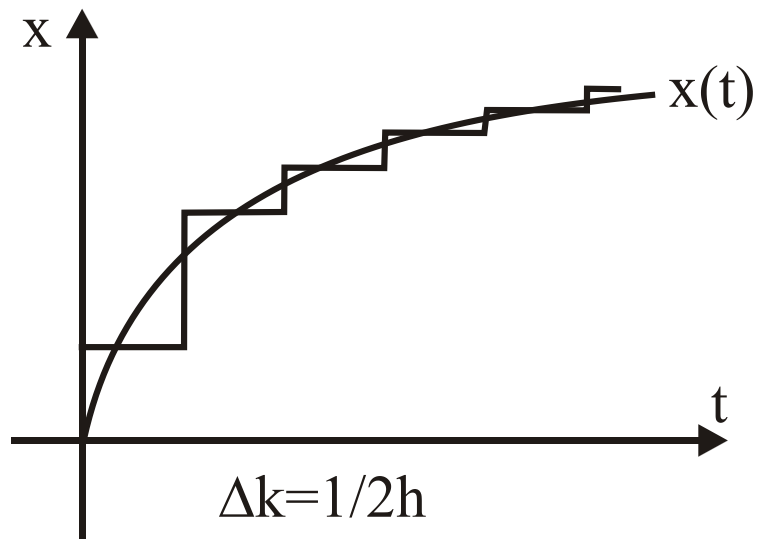
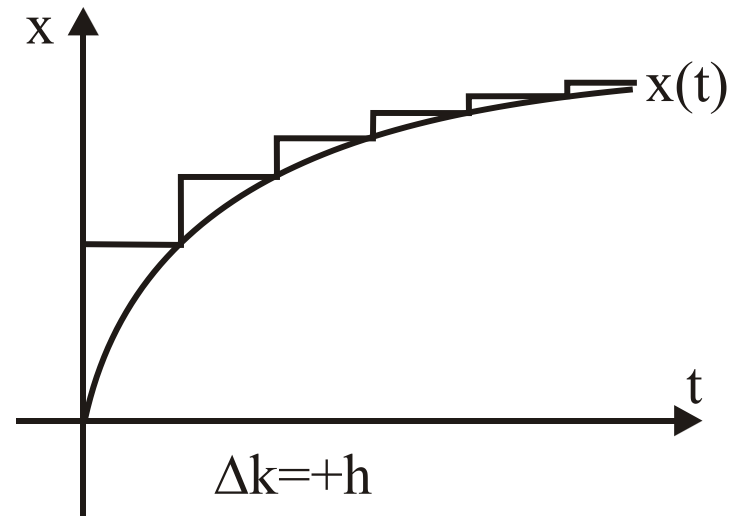
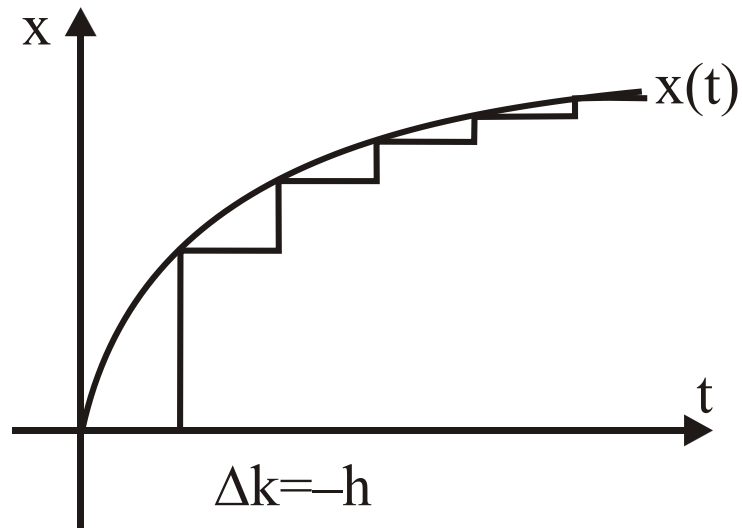
Неперервна величина



Дискретизована величина

Процес перетворення неперервної у часі величини в дискретизовану шляхом збереження її миттєвих значень тільки в детерміновані моменти часу t_1, t_2, \dots, t_n називається **дискретизацією**.

Величина, неперервна в часі і перервна за значенням, називається **квантованою**



Квантована величина

Вимірювальне перетворення аналогової величини у ступінчасто-змінювану із заданими розмірами квантів називається квантуванням.

Кроком квантування h називається різниця між двома сусідніми заданими значеннями квантованої величини. Крок квантування може бути змінним або постійним.

Неперервна величина може бути дискретизованою в часі і квантованою за значенням. Аналогова величина $X(t)$ після квантування за рівнем і дискретизацією у часі в ЦВП обмежується кількістю значень цифрового відлікового пристрою. Як наслідок, **у результаті квантування і дискретизації втрачається інформація, що є причиною виникнення похибок квантування і дискретизації.**

Основні похибки цифрових вимірювальних приладів складаються з **похибки квантування ΔX_k , дискретизації ΔX_d і інструментальної ΔX_i :**

$$\Delta X_{\text{ЦВП}} = f(\Delta X_k, \Delta X_d, \Delta X_i)$$

Похибка квантування ΔX_k - це методична похибка, що виникає через обмежене число рівнів квантування h внаслідок заміни неперервної величини квантованою:

$$\Delta X_k = \frac{1}{2} h$$

Похибка ΔX_k належить до статичних.

Динамічна похибка – це похибка, що виникає внаслідок зміни вимірюваної величини під час вимірювань:

$$\Delta X_d = \frac{1}{2} T_d \frac{dX}{dt}$$

T_d - крок дискретизації;

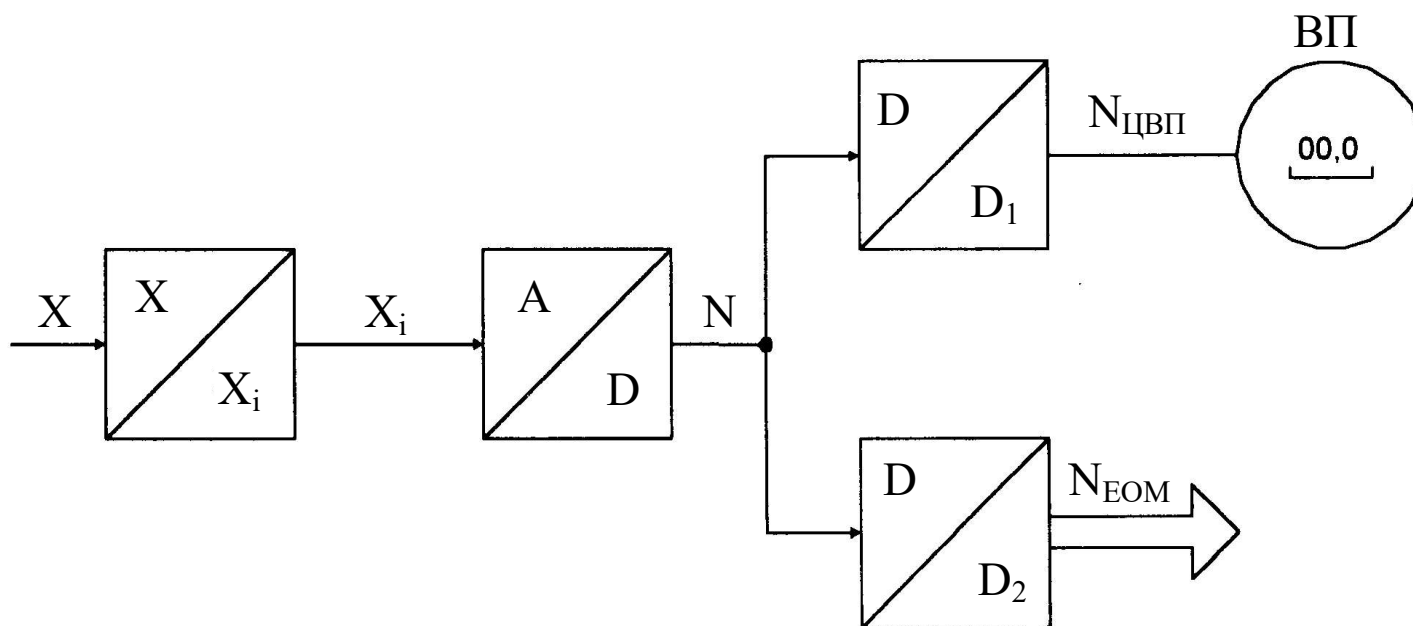
$\frac{dX}{dt}$ - швидкість зміни вихідної величини.

Динамічна похибка зумовлена обмеженим часом вимірювання $T_{\text{вим}} = T_d$, протягом якого вимірювана величина може значно змінюватися.

Динамічна похибка обмежує швидкість зміни вимірюваної величини.

Похибки, пов'язані або викликані порогом чутливості пристрою порівняння або його нестабільністю, похибки від впливу завад на елементи цифрових вимірювальних приладів складають **інструментальні похибки ΔX_i**

Класифікація цифрових вимірювальних приладів



Узагальнена структурна схема ЦВП складається з **вимірювального перетворювача** вхідної електричної величини X у вихідну електричну величину X_i , достатню для надійної роботи **анало-цифрового перетворювача** A/D , **перетворювачів код-код** D/D і **цифрового відлікового пристрою** ВП .

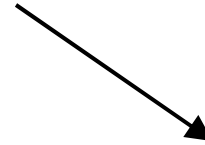
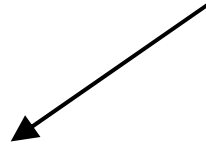
Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) перетворює аналогову (вимірювану) величину в цифровий двійковий код, а ВП відображає це значення в десятковій системі числення.

Крім АЦП до цифрових перетворювачів відносяться **цифро-аналогові перетворювачі** ЦАП, які призначені для перетворювання двійкового коду в аналогову квантовану величину.

Необхідність **перетворювачів код-код D/D** пояснюється тим, що код, потрібний для роботи цифрового відлікового пристрою, може не відповідати вихідному коду A/D. На виході A/D найчастіше формується двійковий код, а оператору для сприйняття найбільш зручний десятковий.

Другий перетворювач код-код D/D2 необхідний для уніфікації коду і подальшого спряження з персональними комп'ютерами.

Цифрові вимірювальні прилади



Прилади зрівноважування

(Структурна схема замкнена)

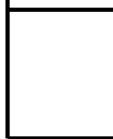
Прилади зіставлення

(Структурна схема розімкнена)



Прилади слідкувального зрівноважування.

Прилади розгортального зрівноважування.



алгоритми послідовного наближення

алгоритми порозрядного зрівноваження

Прилади зіставлення (розімкненого типу) містять ряд послідовно ввімкнених вимірювальних перетворювачів.

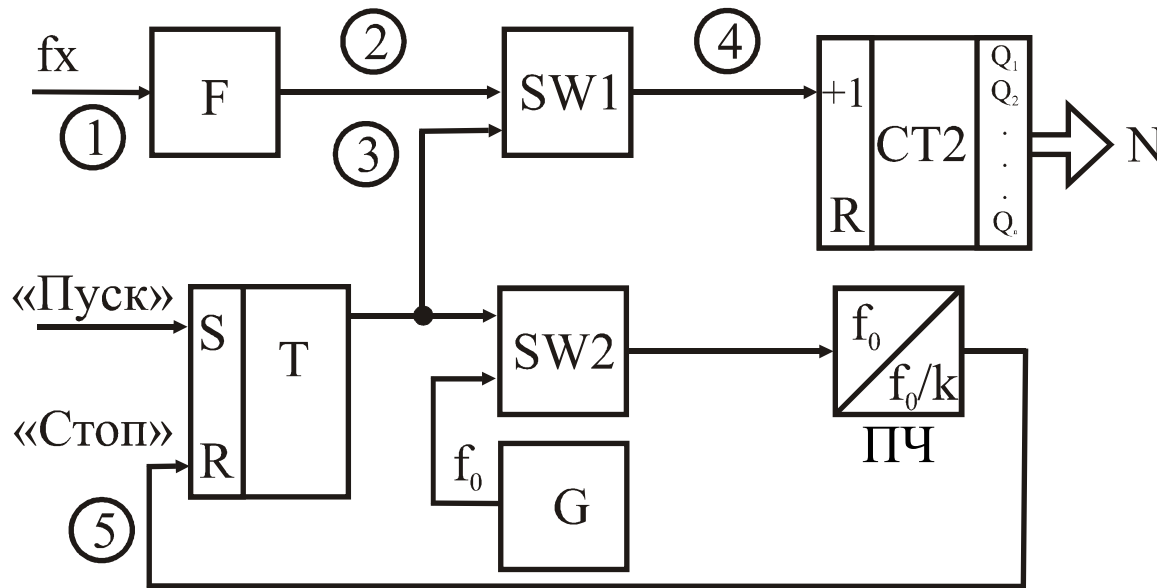
Характерною особливістю структури таких вимірювальних пристроїв є відсутність загального зворотного зв'язку з виходу на вхід. **Засоби вимірювання цього типу характеризуються більш високою швидкістю і більшою похибкою порівняно з ЦВП зрівноважування.**

У **цифрових слідкувальних приладах** компенсувальна величина постійно слідкує за змінами вхідної величини.

У **цифрових приладах розгортального зрівноважування** компенсувальна величина змінюється примусово циклами, які повторюються за раніше заданою програмою в бік збільшення чи зменшення керувальним автоматом і мірою.

За видом вхідної (вимірюваної) величини ЦВП поділяються на цифрові частотоміри, фазометри, вольтметри та вимірювачі параметрів електричних кіл.

Цифровий частотомір середніх значень



F – формувач імпульсів

T – RS-тригер

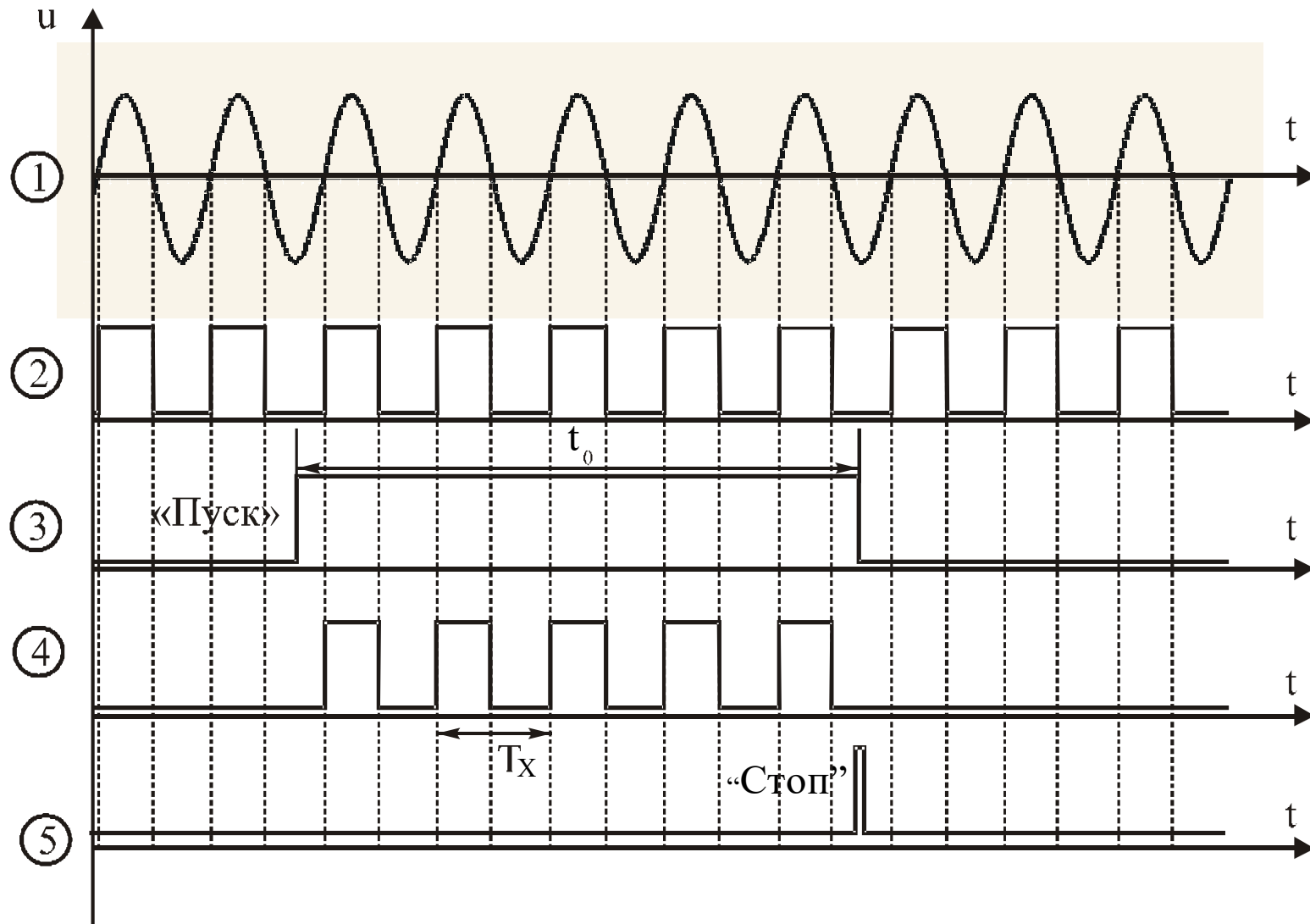
SW – схема збігу

G – генератор
зразкової частоти

ПЧ – подільник частоти

CT2 – двійковий
лічильник

Принцип дії цифрового частотоміра середніх значень засновано на підрахунку кількості імпульсів невідомої частоти f_x за зразковий часовий інтервал t_0 , який формується зразковою мірою часу.



Часові діаграми роботи цифрового частотоміра середніх значень

Робота цифрового частотоміра середніх значень

За командою "Пуск" тригер **T** приймає стан логічної одиниці і таким чином відкриває схеми збігу **SW1** і **SW2**.

Імпульси, які проходять із частотою f_x через формувач **F** і відкриту схему **SW1**, надходять на вхід двійкового лічильника **CT2**, який здійснює їх підрахунок. В цей самий момент часу через відкриту схему **SW2** імпульси f_0 із виходу генератора **G** зразкової частоти надходять на вхід подільника частоти, коефіцієнт ділення якого розраховують з урахуванням забезпечення потрібного часового інтервалу t_0 .

Після закінчення зразкового часового інтервалу заднім фронтом імпульсу t_0 тригер **T** встановлюється у стан логічного нуля, схеми збігу **SW1** і **SW2** закриваються і в лічильнику **CT2** фіксується код **N**.

Кількість імпульсів, які підраховує двійковий лічильник за час t_0 :

$$N_i = \int_{t_1}^{t_2} T_x dt = \frac{t_0}{T_x} = t_0 f_x$$

Зразковий часовий інтервал формується в подільнику частоти

$$t_0 = k T_0$$

Тоді рівняння перетворення цифрового частотоміра середніх значень матиме вигляд:

$$N_F = k T_0 f_x = \frac{k f_x}{f_0}$$

Статична характеристика цифрового частотоміра середніх значень лінійна

За умови постійної абсолютної похибки в діапазоні зміни вимірюваної величини межа допуску основної похибки нормується у вигляді максимальної зведеної похибки

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_H} 100\% = \frac{1}{N} 100\%$$

Похибка квантування цифрового частотоміра середніх значень

$$\delta_{kF} = \frac{1}{N_F} 100\% = \frac{f_0}{k f_x} 100\%$$

Похибка квантування зменшується при збільшенні зразкового часового інтервалу t_0 . Однак, збільшення t_0 приводить до зростання часу вимірювання, а, отже, до зниження швидкодії.

Другою складовою похибки вимірювання частоти є **похибка зразкової міри часу** $\delta_{\text{змч}}$, яка зумовлена неточністю первинного встановлення значення t_0 і його наступними часовими та температурними змінами.

Нижня межа вимірювання:

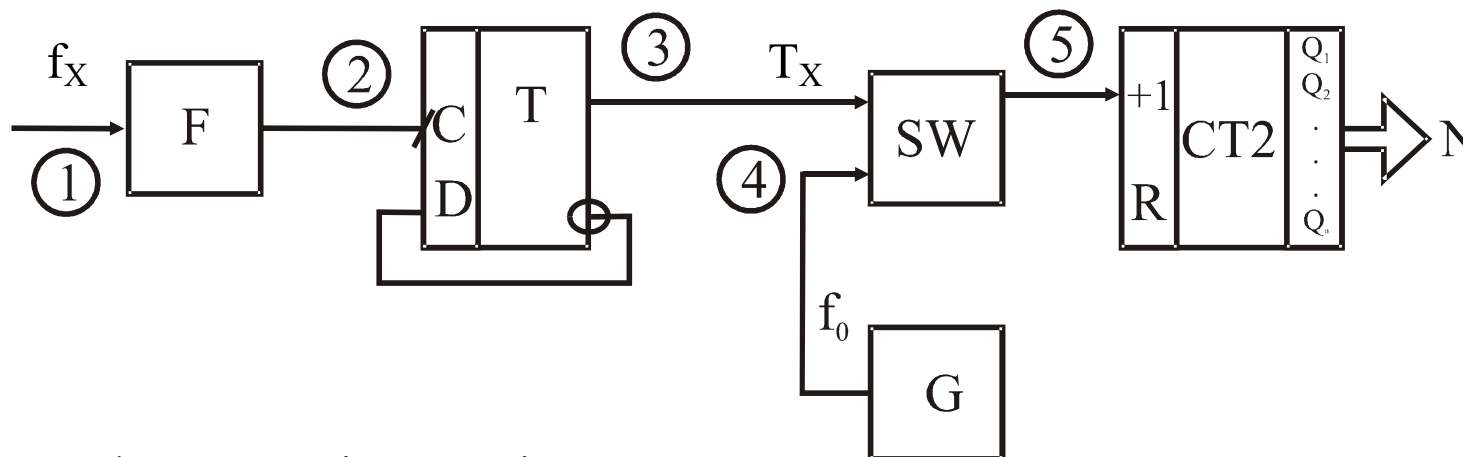
$$f_{x \min} = \frac{f_0}{k \delta_{\text{кн}}} 100\%$$

Верхня межа вимірювання:

$$f_{x \max} = \frac{2^n f_0}{k}$$

Під час вимірювання низьких частот похибка велика, і тому область застосування таких частотомірів – вимірювання середніх частот (>1000 Гц).

Цифровий періодомір (частотомір миттєвих значень)



F – формувач імпульсів

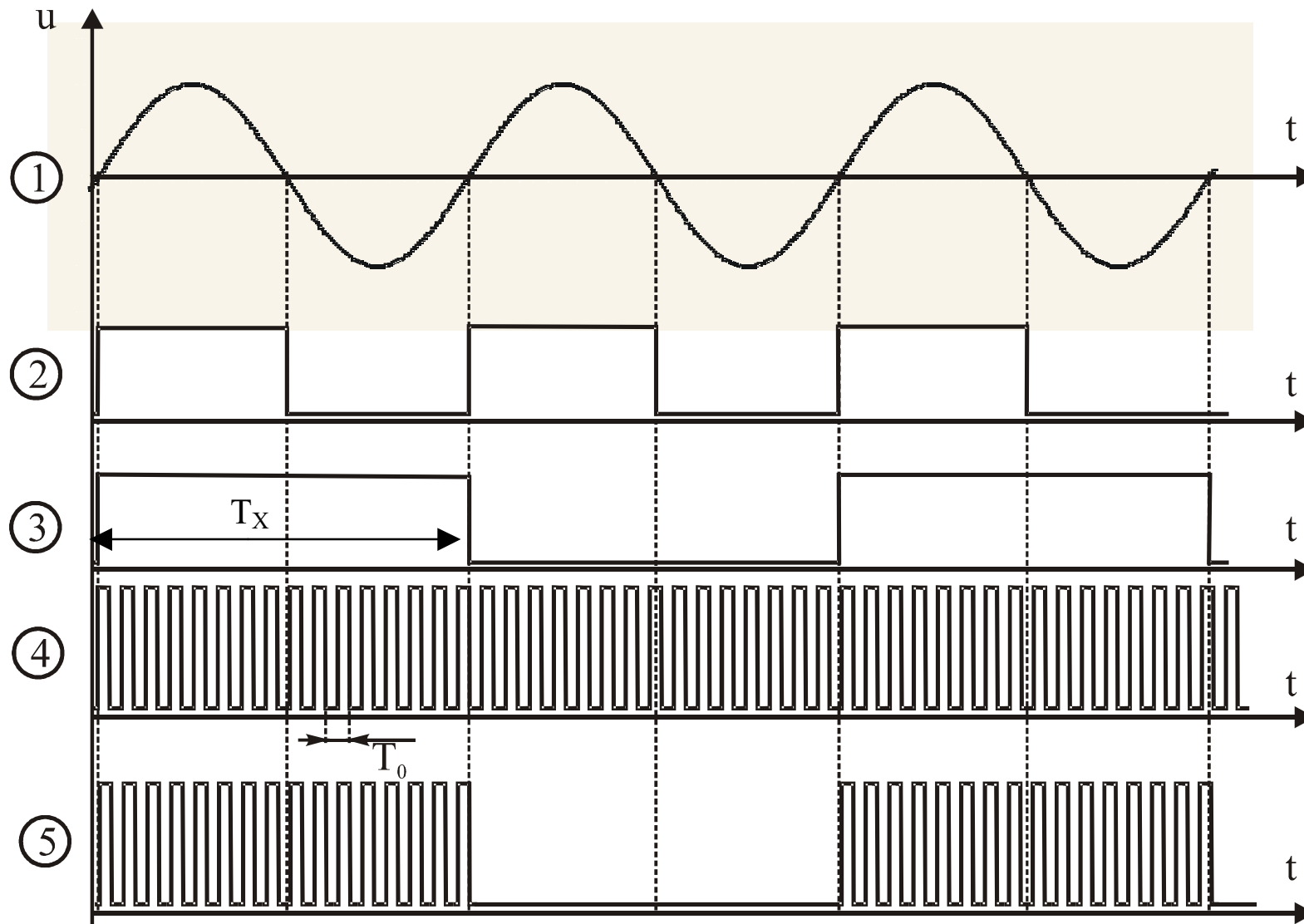
T – D-тригер

SW – схема збігу

G – генератор зразкової частоти

$CT2$ – двійковий лічильник

Принцип дії цифрового періодоміра заснований на квантуванні невідомого періоду сигналу T_x імпульсами зразкової частоти f_0 , що їх формує зразкова міра частоти (ЗМЧ)



Часові діаграми роботи цифрового частотоміра миттєвих значень

Калібровані за амплітудою і тривалістю імпульси з виходу формувача **F** надходять на вхід **пристрою виділення періоду** (ПВП). **ПВП** являє собою **лічильний тригер T**, на прямому виході якого з імпульсів із частотою **f_x** формується період **T_x**, що вимірюється.

Період **T_x** у схемі збігу **SW** квантується імпульсами зразкової частоти **f₀**. Протягом кожного періоду **T_x** схема **SW** відкрита. Імпульси **f₀** із виходу генератора **G** через відкриту схему **SW** надходять на вхід лічильника **СТ2**. У лічильнику після закінчення кожного періоду **T_x** формується код

$$N_T = \int_{t_1}^{t_2} T_0 dt = \frac{T_x}{T_0} = T_x f_0 = \frac{f_0}{f_x}$$

Значення **похибки квантування** цифрового періодоміра

$$\delta_{кТ} = \frac{1}{N} 100\% = \frac{1}{T_x f_0} 100\% = \frac{f_x}{f_0} 100\%$$

Аналіз рівняння **похибки квантування** показує, що можливим шляхом її зменшення є **збільшення частоти квантування f_0 і вимірюваної величини T_x** .

Збільшення частоти f_0 обмежене швидкістю елементної бази, на якій реалізується частотомір. Тому для зменшення цієї складової похибки для фіксованих T_0 і T_x квантують не один, а декілька періодів невідомої частоти.

Крім похибки квантування в частотомірі миттєвих значень виникає **похибка зразкової міри часу $\delta_{змч}$** , яка зумовлена неточністю первинного встановлення частоти генератора G , її часовою і температурною нестабільностями, а також похибкою виділення періоду.

Доповнивши структуру періодоміра **перетворювачем N_T/N_f** , в якому виконується операція $1/T_x$, одержують схему цифрового частотоміра миттєвих значень.

Нижня межа вимірювань обмежена максимальною ємністю двійкового лічильника

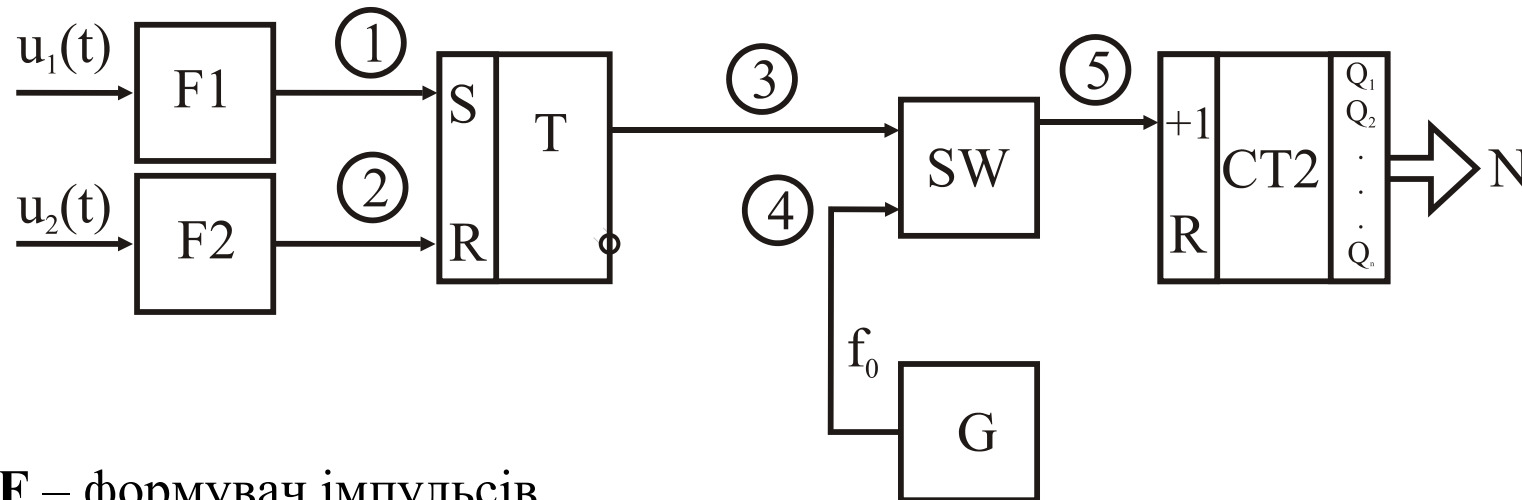
$$N_{\max} = \frac{f_0}{f_x} \Rightarrow 2^n = \frac{f_0}{f_{x\min}} \Rightarrow f_{x\min} = \frac{f_0}{2^n}$$

Верхня межа вимірювання визначається нормованим значенням похибки квантування

$$\delta_{\text{кн}} = \frac{f_{x\max}}{f_0} 100\% \Rightarrow f_{x\max} = \frac{\delta_{\text{кн}} f_0}{100\%}$$

Галузь застосування цифрового частотоміра миттєвих значень – вимірювання низьких та інфранизьких частот (до одиниць кілогерц).

Цифровий фазометр миттєвих значень



F – формувач імпульсів

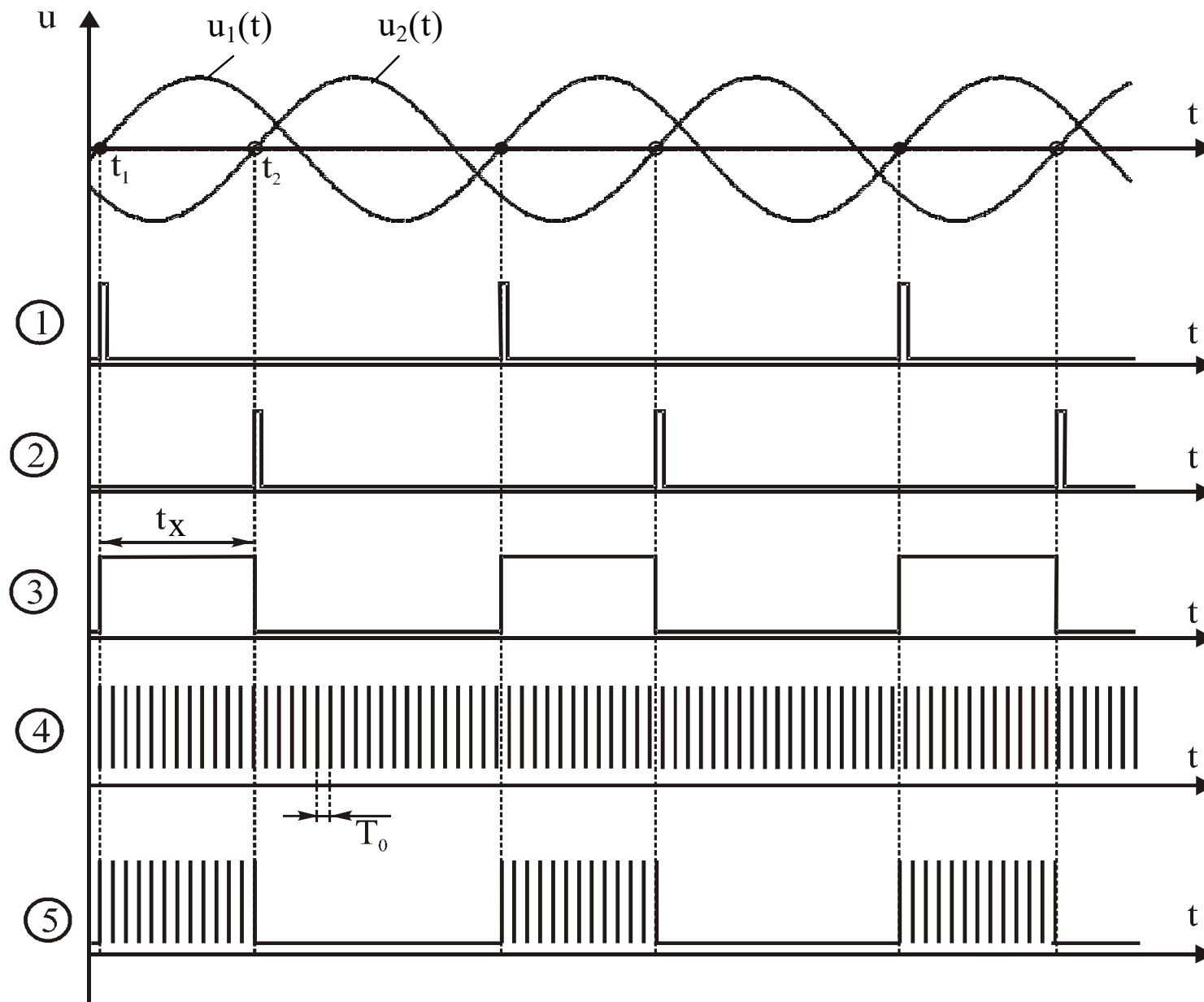
T – RS-тригер

SW – схема збігу

G – генератор
зразкової частоти

CT2 – двійковий
лічильник

Принцип дії цифрових фазометрів заснований на перетворенні різниці фаз двох електричних сигналів однакової частоти у часовий інтервал t_x із наступним його квантуванням імпульсами зразкової частоти f_0 .



Часові діаграми роботи цифрового фазометра миттєвих значень

У момент переходу напруги $u_1(t)$ через рівень нуля на виході формувача **F1** формується короткий імпульс, що встановлює тригер **T** в стан логічної одиниці. Цим рівнем відкривається схема **SW**, і імпульси зразкової частоти f_0 із виходу генератора **G** через відкриту схему **SW** надходять на **CT2**. У лічильнику **CT2** відбувається підрахунок імпульсів f_0 .

Цей процес відбувається доти, поки напруга $u_2(t)$ не перейде рівень нуля. В момент переходу $u_2(t)$ через нульовий рівень на виході формувача **F2** формується короткий імпульс, що встановлює тригер **T** в стан логічного нуля. Цим рівнем закривається схема **SW**, і припиняється надходження імпульсів із частотою f_0 на вхід лічильника **CT2**. Кількість імпульсів із частотою f_0 , що надійшли до лічильника **CT2** за часовий інтервал t_x , визначається як

$$N_{\text{фм}} = \int_{t_1}^{t_2} T_0 dt = \frac{t_x}{T_0} = t_x f_0$$

Різниця фаз φ_x , що вимірюється, є різницею початкових фаз напруг $u_1(t)$ і $u_2(t)$

$$\varphi_x = \varphi_2 - \varphi_1 = \omega t_2 - \omega t_1 = \omega t_x = 2\pi f_x t_x$$

Рівняння перетворення цифрового фазометра миттєвих значень

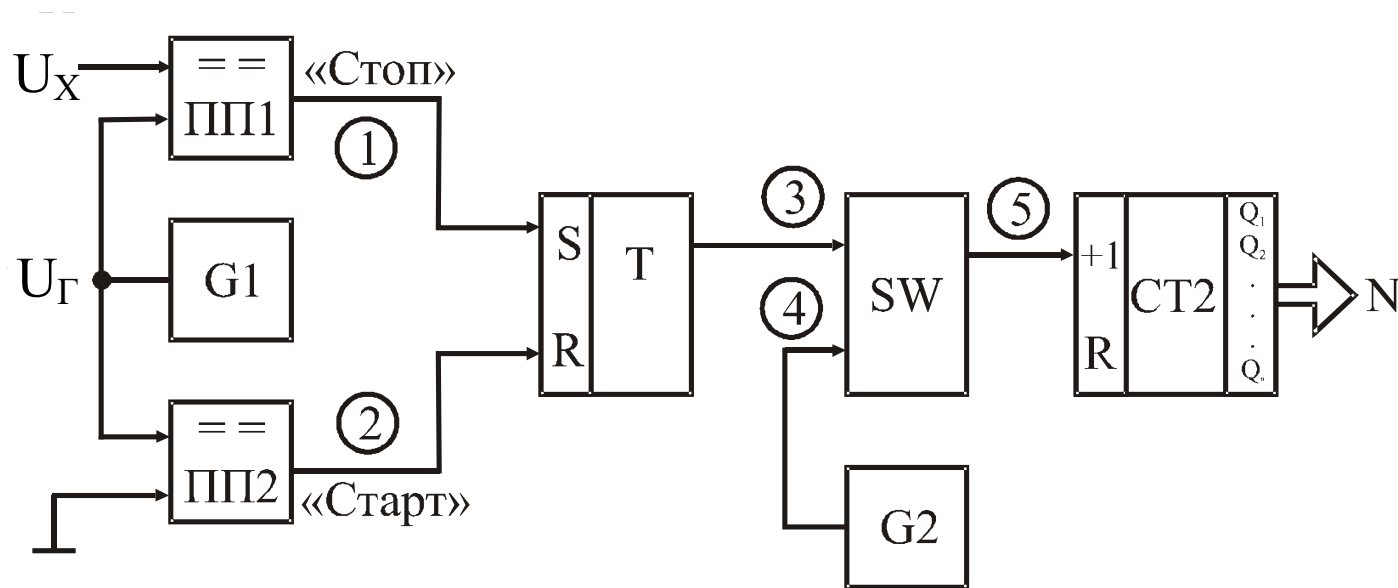
$$N_{\text{фм}} = t_x f_0 = \frac{1}{2\pi} \frac{f_0}{f_x} \varphi_x$$

Рівняння похибки квантування цифрового фазометра миттєвих значень

$$\delta_{\text{фм}} = \frac{1}{N_{\text{фм}}} 100\% = \frac{2\pi f_x}{\varphi_x f_0} 100\%$$

Результати вимірювань залежать від частоти вхідних сигналів f_x при постійних f_0 та φ_x . Для усунення цього недоліку застосовують усереднення вимірюваних інтервалів t_x протягом часу вимірювання t_v .

Цифровий вольтметр час-імпульсного перетворення



T – RS-тригер

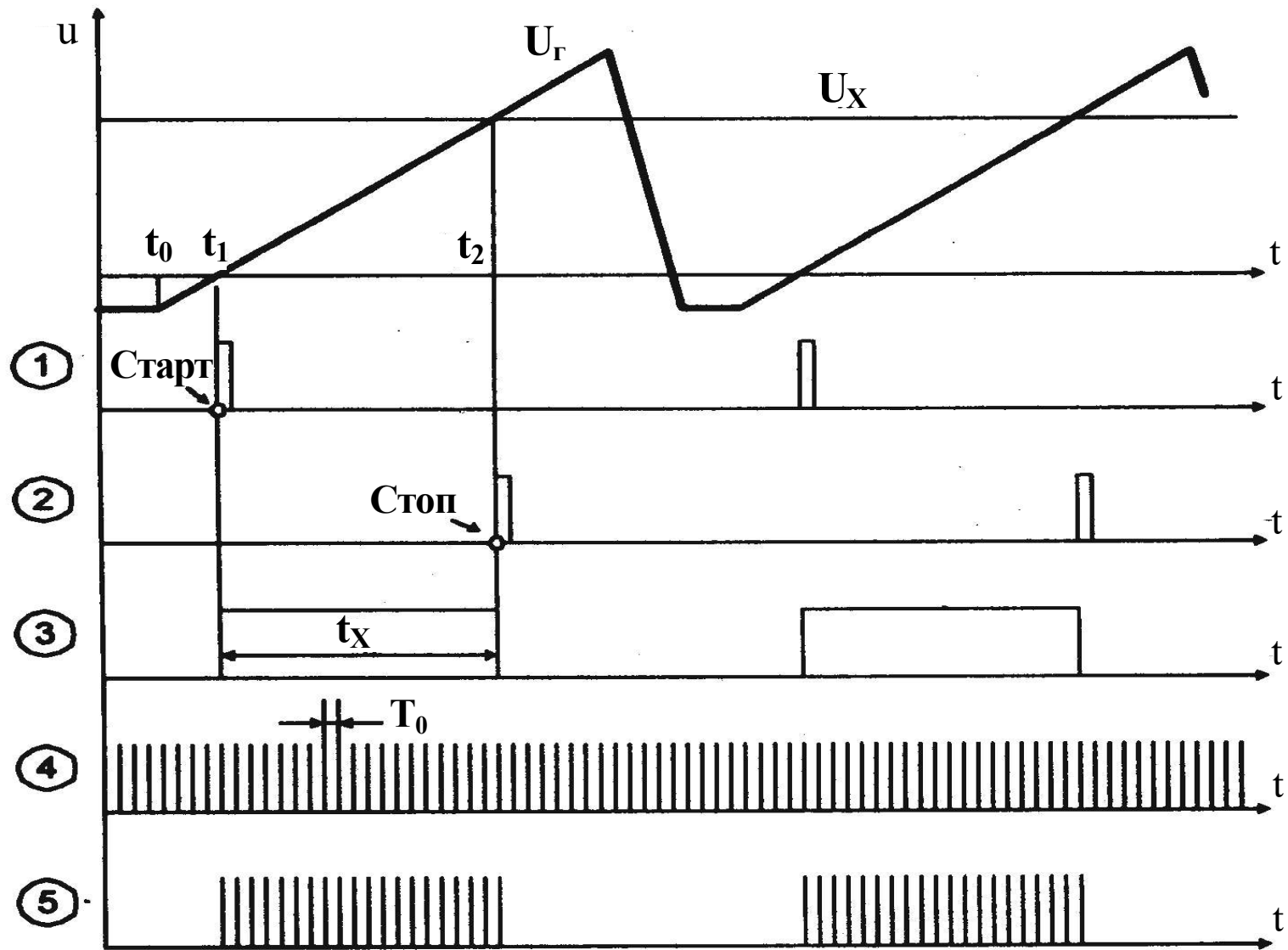
SW – схема збігу

ПП – компаратор

G – генератор
зразкової частоти

CT2 – двійковий
лічильник

Принцип дії заснований на перетворенні вимірюваної напруги U_x в часовий інтервал t_x , із наступним його квантуванням імпульсами зразкової частоти f_0 .



Часові діаграми роботи цифрового вольтметра час-імпульсного перетворення

Двійковий лічильник **СТ2** підраховує кількість імпульсів f_0 за час t_x . У момент часу t_0 сигналом **«Пуск»** запускається генератор **G1** напруги $U_{г}$, яка змінюється лінійно. Напруга $U_{г}$ одночасно подається на входи компараторів **ПП1** і **ПП2**, які по черзі спрацьовують у моменти часу t_1 і t_2 .

При переході напруги $U_{г}$ через рівень нуля (момент часу t_1) спрацьовує компаратор **ПП2**, і на його виході формується імпульс **«Старт»**, що по S-входу встановлює в одиничний стан **тригер Т**. Рівнем логічної одиниці відкривається схема **SW**, і імпульси зразкової частоти f_0 із виходу генератора **G2** надходять на вхід лічильника **СТ2**. Напруга $U_{г}$ зростає, поки не стане рівною U_x . Момент рівності $U_{г} = U_x$ (момент часу t_2) фіксує компаратор **ПП1** і на своєму виході формує сигнал **«Стоп»**. Тригер **Т** встановлюється в нульовий стан і закриває схему **SW**. На цьому процес вимірювання U_x закінчується.

Таким чином, **на виході тригера Т формується часовий інтервал t_x , пропорційний вимірюваній напрузі U_x , який квантується імпульсами зразкової частоти f_0 з виходу G2.**

Кількість імпульсів із частотою f_0 , що надходять на лічильник СТ2 за час t_x , визначається так

$$N_v = \int_{t_1}^{t_2} t_x dt = \frac{t_x}{T_0} = t_x f_0$$

Рівняння перетворення цифрового вольтметра час-імпульсного перетворення

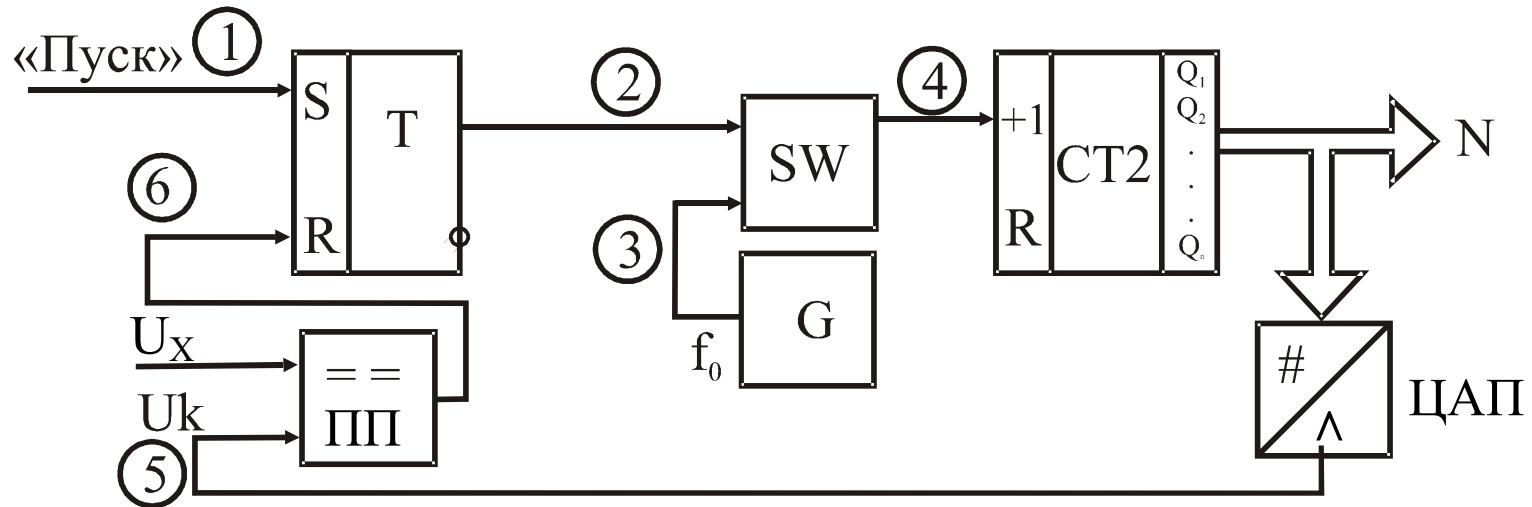
$$N_v = k U_x f_0$$

Рівняння похибки квантування подається співвідношенням

$$\delta_{kv} = \frac{1}{N_v} 100\% = \frac{1}{k U_x f_0} 100\%$$

Похибка в основному зумовлена нелінійністю та нестабільністю лінійно змінюваної напруги U_g , нестабільністю порогу чутливості компаратора і нестабільністю частоти зразкового генератора.

Цифровий вольтметр послідовного наближення



T – RS-тригер

III – компаратор

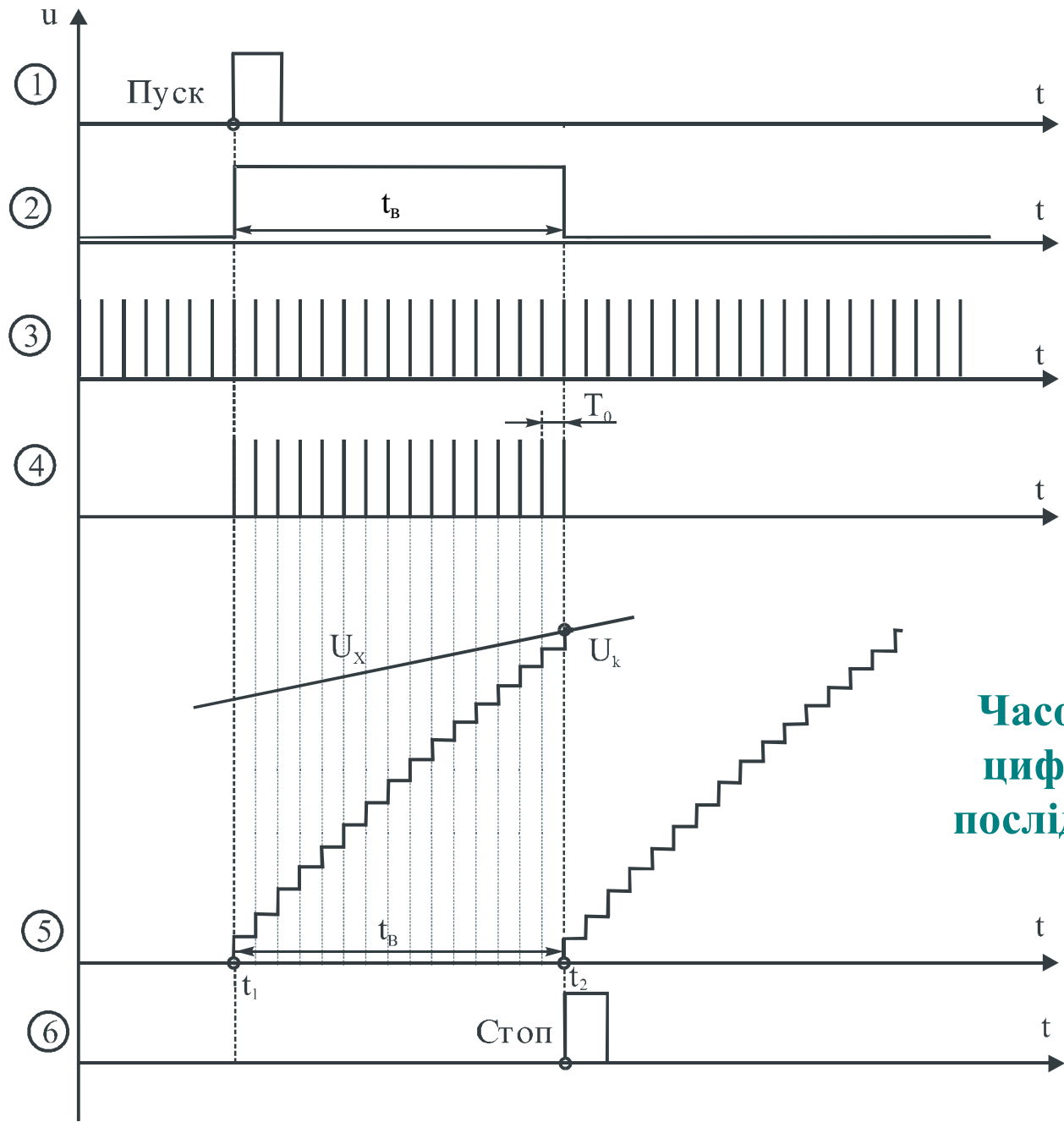
ЦАП – цифро-аналоговий
перетворювач

SW – схема збігу

G – генератор
зразкової частоти

CT2 – двійковий лічильник

Суть алгоритму послідовного наближення полягає у зрівноваженні вимірюваної напруги U_x компенсувальною напругою U_k , яка змінюється рівномірними ступенями. Даний алгоритм називають ще «молодшими розрядами вперед»



Часові діаграми роботи цифрового вольтметра послідовного наближення

За командою **«Пуск»** (момент часу t_1) **тригер Т** встановлюється в одиничний стан і відкриває схему **SW**. Імпульси зразкової частоти f_0 із виходу генератора **G** через відкриту схему **SW** надходять на вхід двійкового лічильника **СТ2**, змінюючи тим самим двійковий код на його виходах. З паралельних виходів **СТ2** двійковий код надходить на входи **ЦАП** і перетворюється там в аналоговий сигнал **Uк**.

Прихід кожного імпульсу f_0 від генератора **G** формує нову сходинку компенсувальної напруги **Uк** на виході цифро-аналогового перетворювача. У момент часу t_2 , коли $U_x = U_k$, **тригер Т** сигналом **«Стоп»**, який формується на виході компаратора, встановлюється в нульовий стан і закриває схему **SW**.

Таким чином, у лічильнику **СТ2** сформується двійковий код

$$N_{vp} = \frac{U_x}{h} = \frac{U_x}{U_0} 2^n$$

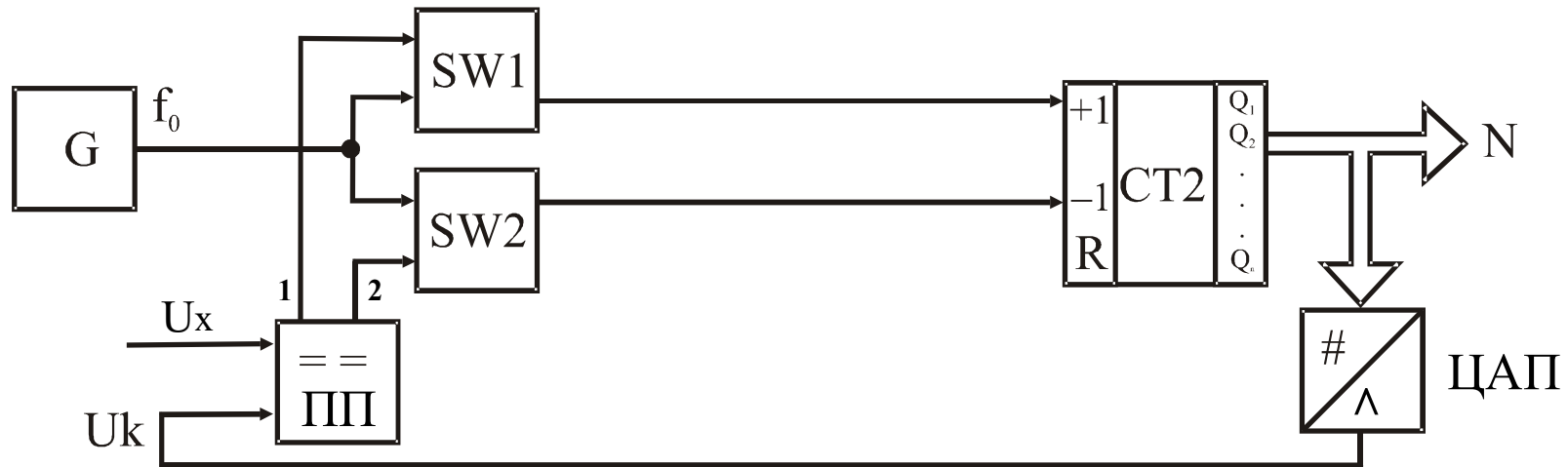
$$h = U_0 / 2^n \text{ - крок квантування}$$

Похибка квантування вольтметра послідовного наближення

$$\delta_{\text{kvp}} = \frac{1}{N_{\text{vp}}} 100\% = \frac{U_0}{U_x 2^n} 100\%$$

Час перетворення та похибка квантування вольтметрів послідовного наближення залежать від вимірюваної величини, а значення δ_{kvp} в основному визначається розрядністю ЦАП і зоною нечутливості компаратора.

Цифровий вольтметр слідкувального зрівноважування



SW – схема збігу

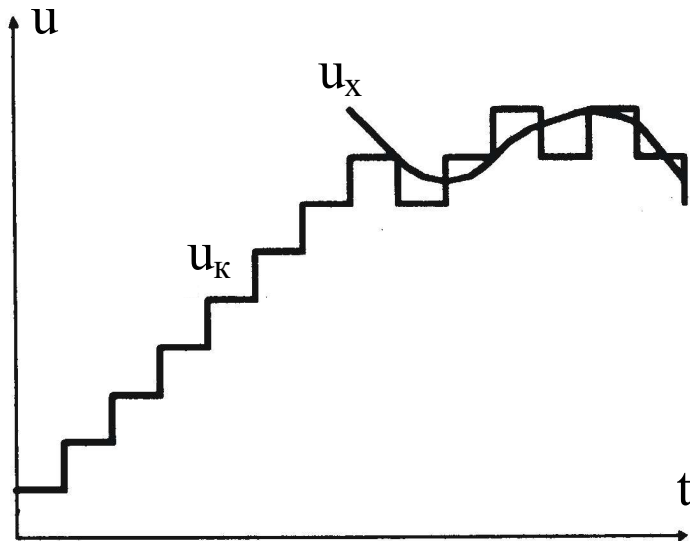
ПП – компаратор

ЦАП – цифро-аналоговий
перетворювач

G – генератор
зразкової частоти

СТ2 – двійковий
лічильник

Алгоритм слідкувального зрівноваження полягає в постійному слідкуванні компенсувальної напруги за змінами вимірюваної (інформативного параметра).



Особливістю побудови структурної схеми цифрового вольтметра слідкувального зрівноважування є наявність реверсивного двійкового лічильника **СТ2** і двох схем збігу **SW1** і **SW2**, які керуються вихідними сигналами компаратора **ПП**. В залежності від співвідношення напруг u_x і u_k

Компаратор ПП може знаходитися в одному з трьох можливих станів, що визначаються різницею ($u_x - u_k$):

1. Напряга на обох виходах (1 і 2) компаратора дорівнює нулю при виконанні умови ($u_x = u_k$). У цьому стані обидві схеми збігу закриті і імпульси з виходу генератора **G** не надходять на входи лічильника

2. При виконанні умови $u_x > u_k$ на першому виході компаратора формується одиничний рівень, який відкриває схему збігу **SW1**, і імпульси зразкової частоти надходять на інкрементувальний вхід реверсивного лічильника **CT2**. Схема збігу **SW2** закрита нульовим рівнем.

3. Схема **SW2** відкрита одиничним рівнем з другого виходу компаратора при виконанні умови $u_x < u_k$. У цьому випадку працює декрементувальний вхід реверсивного лічильника, тому що схема **SW1** закрита.

При роботі реверсивного лічильника в режимі підсумовування або віднімання напруга на виході цифроаналогового перетворювача **ЦАП** відповідно збільшується або зменшується так, що різниця напруг ($u_x - u_k$) прямує до деякого мінімального значення, яке характеризується похибкою квантування Δk . Крок квантування вибирається відповідно до ширини зони нечутливості компаратора.

Тема 9. Мікропроцесорні вимірювальні системи

Продуктивність процесорів у першу чергу залежить від тактової частоти й архітектури процесорів.

Прийнята така класифікація процесорних пристроїв, реалізованих на одному кристалі:

- мікропроцесори загального призначення для числової обробки (універсальні мікропроцесори);
- мікроконтролери для простих систем керування/контролю;
- сигнальні процесори для цифрової обробки сигналів;
- програмовані логічні інтегральні схеми.

Універсальні мікропроцесори призначені для використання в обчислювальних системах: персональних ЕОМ, робочих станціях, масово-паралельних супер-ЕОМ. Основною їх характеристикою є наявність розвинутих приладів для реалізації операцій із плаваючою точкою.

Цифрові сигнальні процесори розраховані на обробку в реальному часі цифрових потоків, утворених шляхом оцифрування аналогових сигналів. Це зумовлює їх порівняно малу розрядність і переважно цілочисельну обробку.

Програмовані логічні інтегральні схеми – це матричні інтегральні схеми, що дозволяють програмно скомпонувати в одному корпусі електронну схему, еквівалентну схемі, що містить від кількох десятків до кількох сотень інтегральних схем стандартної логіки. У порівнянні з іншими мікроелектронними технологіями, технологія програмованих логічних інтегральних схем забезпечує короткий проектно-технологічний цикл, мінімальні затрати на проектування, максимальну гнучкість при необхідності модифікації апаратури.

Найбільша спеціалізація і різноманітність функцій у **мікроконтролерах**, які використовуються у вбудованих системах вимірювання та керування, у тому числі і в побутових приладах.

Функції, що виконуються мікропроцесорами у вимірювальних системах

- багатофункціональність приладів,
- спрощення керування процесом виміру,
- автоматизація регулювання,
- самокалібрування й автоматична перевірка,
- поліпшення метрологічних характеристик,
- виконання обчислювальних процедур,
- статистична обробка результатів спостережень,
- визначення і переклад у лінійну форму функції вимірюваної фізичної величини,
- створення програмувальних, цілком автоматизованих приладів.

З'явився новий клас «інтелектуальних» приладів, названих також «думаючими» чи «розумними».

Багатофункціональність.

До застосування МП багатофункціональні прилади являли собою сукупність декількох функціональних вузлів, об'єднаних в одне конструктивне ціле. Алгоритм роботи засобу вимірювання, закладений при його розробці, у процесі експлуатації зберігається незмінним. Інакше кажучи, **традиційні багатофункціональні прилади виконані за схемою з твердою логікою.** Для неї характерне протиріччя між багатофункціональністю і числом можливих функцій приладу, з одного боку, і економічною, а також технічною ефективностями - з іншого.

Мікропроцесорна система, введена до складу багатофункціонального засобу вимірювання, радикально змінила його, перетворила пристрій із твердою логікою роботи в програмно-керований пристрій. **Функціональні можливості такого пристрою визначаються виконуваною програмою і можуть бути легко видозмінені шляхом переходу до іншої програми, збереженої в постійній пам'яті.**

Підвищення точності приладів.

Похибки засобу вимірювань відносяться до його метрологічних характеристик. Можна перерахувати **такі шляхи підвищення точності вимірювального приладу, які досягаються в результаті введення мікропроцесорної системи до складу приладу:**

- автоматична компенсація (вилучення) систематичної похибки, зокрема автоматичне встановлення нуля перед початком вимірювань;
- автоматичне виконання градуовальної операції (самокалібрування);
- виконання самоконтролю;
- зменшення впливу випадкових похибок шляхом проведення багаторазових спостережень (одиничних вимірів) з наступним усередненням їхніх результатів;
- виявлення і вилучення промахів;
- виведення на дисплей інформації про числові значення похибок вимірювання.

Розширення вимірювальних можливостей.

Застосування МП дозволяє істотно розширити можливості вимірювання широкого переліку параметрів сигналів і характеристик пристроїв. Це пов'язано з використанням непрямих і сукупних видів вимірювань.

Складність використання непрямих вимірів традиційно пов'язана з необхідністю застосування декількох приладів, зняття ряду відліків і наступних обчислень. Крім того, не дуже простою є процедура оцінки похибок непрямих вимірювань.

Докорінно змінюється ситуація при включенні до складу приладу мікропроцесорної системи. За командою з клавіатури вона автоматично, відповідно до заданої програми вибирає режими вимірювань, запам'ятовує результати прямих вимірювань, проводить необхідні обчислення і видає знайдене значення вимірюваної фізичної величини на дисплей. Хоча вимірювання за своєю природою залишаються непрямими, експериментатор сприймає їх як прямі, оскільки, підключивши прилад до об'єкта дослідження, безпосередньо отримує результат.

Спрощення керування приладом.

Одним із критеріїв високого рівня програмного забезпечення вимірювального приладу є ступінь складності його передньої панелі.

Прийнято вважати, що «розумний» прилад повинен мати простий набір органів керування. Для сучасних приладів, що містять МП, характерна кнопкова система керування, конструктивно оформлювана у вигляді клавіатури.

Радикально зменшує число органів керування автоматизація вибору меж вимірювання, інтервалу дискретизації напруги досліджуваного сигналу й інших режимів роботи приладу. У деяких приладах передбачена сигналізація про некоректні кроки експериментатора і видача на дисплей відповідних інструкцій.

Підвищення надійності приладів.

Зумовлено зменшенням числа елементів схем, здійсненням автодіагностики, застосуванням вузлів з некаліброваними характеристиками, можливістю виконання корекції похибок, що поліпшує метрологічну надійність.

Можливість одержання математичних функцій вимірюваних значень.

У залежності від розв'язуваної задачі експериментатора можуть цікавити не значення фізичної величини, а її різні математичні функції. Багато приладів, що містять мікропроцесорні системи, дозволяють автоматично виконувати запрограмовані функціональні перетворення.

Прикладами таких перетворень можуть служити:

1. Множення знайденого значення A на константу C .
2. Одержання відхилень результату вимірювання A від номінального значення A_n
3. Обчислення відношень: ділення на константу, знаходження частки від ділення одного результату вимірювання на інший.
4. Подання результату вимірювання в логарифмічних одиницях.
5. Лінеаризація залежностей.

Одержання статистичних характеристик.

Ряд вольтметрів, у складі яких є мікропроцесорна система, дозволяють формувати оцінки таких ймовірнісних характеристик аналізованої випадкової змінної, як **середнє значення, середня потужність, середнє квадратичне значення, дисперсія, середнє квадратичне відхилення а також коефіцієнт кореляції двох випадкових змінних**. Мікропроцесорні прилади, спеціально призначені для вимірювання статистичних характеристик сигналів, мають більш широкі можливості.

Мініатюризація й економічність апаратури.

Різде зменшення числа компонентів у схемі приладу внаслідок виконання багатьох функцій мікропроцесорною системою, їх відносно невисока вартість, значне зниження споживаної потужності дозволяють будувати малогабаритні та економічні прилади.

Скорочення тривалості розробки.

Часто для одержання нових властивостей приладу, виконуваного на основі мікропроцесорної системи, не потрібно значних змін у схемі і тим більше в конструкції приладу. **Основний зміст розробки полягає в створенні необхідного програмного забезпечення.** З огляду на те, що для широкозастосовуваних МП уже накопичена бібліотека досить розроблених типових прикладних програм та вимірювальних процедур, **у багатьох випадках розробка програмного забезпечення приладу в значній мірі зводиться до раціонального вибору наявних програм.**

Організація вимірювальних систем.

Прилад, що містить МП, оснащений інтерфейсами, які дозволяють підключати його до стандартної інтерфейсної шини. Це дає можливість поєднувати велику кількість приладів у єдину вимірювальну систему.

Архітектура мікропроцесорної системи

Мікропроцесорна система (МПС) – це зібрана в єдине ціле сукупність взаємодійних інтегральних схем цифрової логіки та аналогових схем, організована в обчислювальну або в керувальну систему з мікропроцесором (мікроконтролером) як вузлом обробки інформації.

Узагальнена структура мікропроцесорної системи містить:

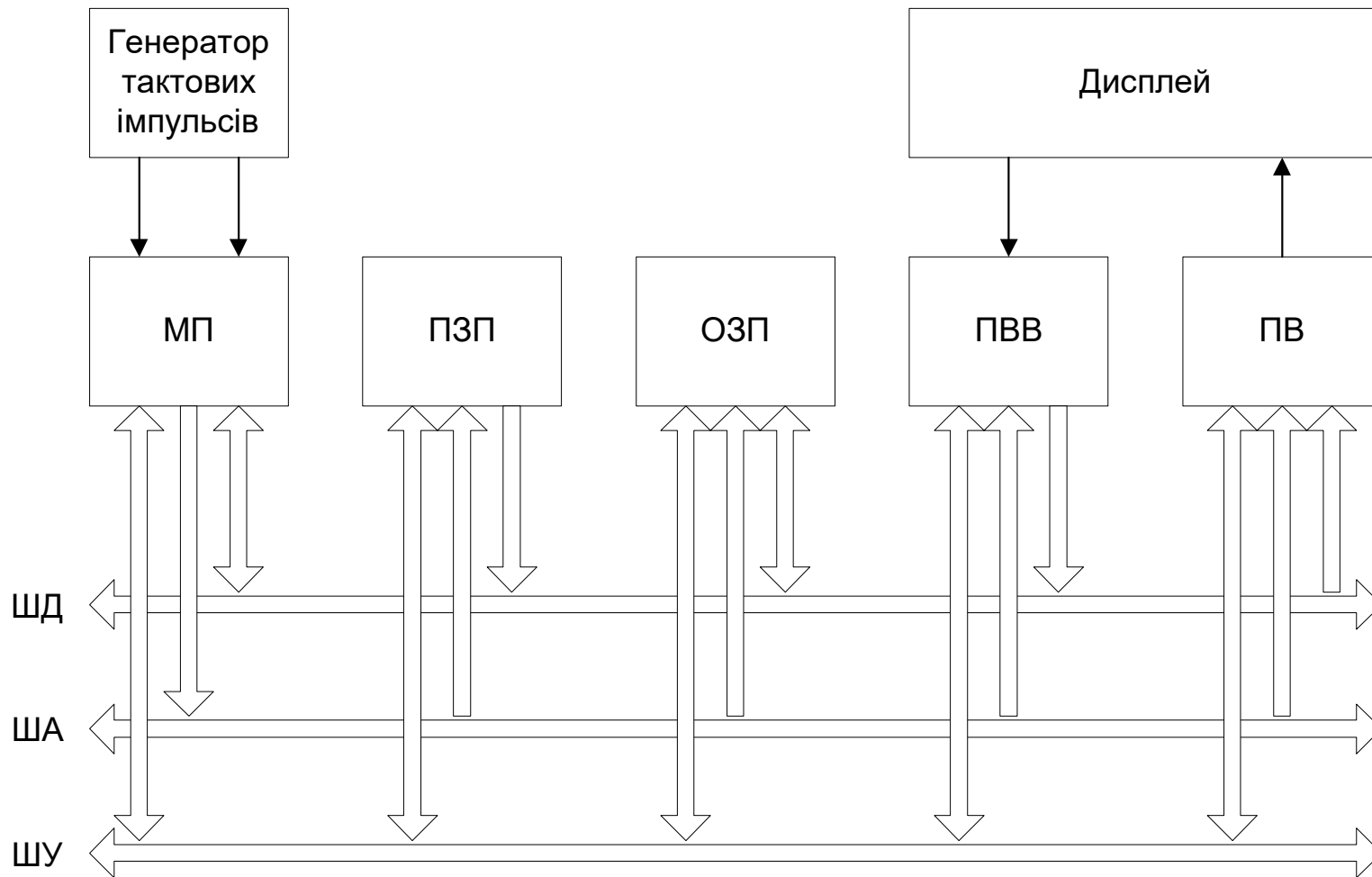
Генератор тактових імпульсів - джерело послідовності прямокутних імпульсів, за допомогою яких здійснюється керування роботою МП у часі.

Основна пам'ять системи (зовнішня щодо МП) складається з **постійного (ПЗП)** і **оперативного (ОЗП) запам'ятовувальних пристроїв**.

ПЗП – це пристрій, в якому зберігається програма та сукупність констант. Вміст ПЗП не стирається при відключенні живлення. ПЗП використовується як пам'ять програми.

ОЗП - це пам'ять програм, даних, що підлягають обробці, і результатів обчислень.

Пристрій введення-виведення (ПВВ) здійснює введення в систему даних, що підлягають обробці. Пристрій виведення перетворює вихідні дані у форму, зручну для сприйняття користувачем або зберігання. ПВВ є клавіатура, дисплей, АЦП, ЦАП, принтери тощо.



Шиною називається група ліній передачі, що використовуються для виконання певної функції. Особливістю структури МПС є **магістральна організація зв'язків між модулями, що входять у її систему**. Вона здійснюється за допомогою трьох шин. Ці шини з'єднують МП із ПЗП, ОЗП і інтерфейсами введення-виведення, внаслідок чого створюється можливість обміну даними між модулями системи.

Шина даних (ШД) - це двонаправлена шина: по ній дані можуть направлятися в МП або з нього. **Одночасна передача даних в обох напрямках неможлива**. Ці процедури рознесені в часі за допомогою часового мультиплексування.

По **шині адреси (ША)** інформація передається тільки в одному напрямі - від МП до модуля пам'яті або ПВВ.

Шина управління (ШУ) використовується для передачі сигналів, що обслуговують взаємодію, синхронізацію роботи всіх модулів системи і внутрішніх вузлів МП.

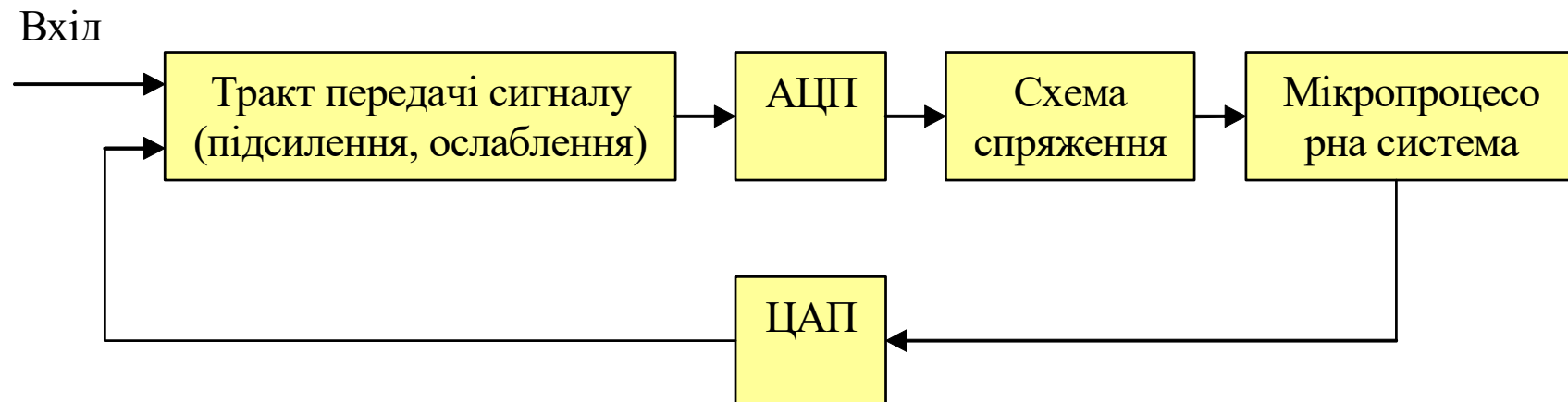
Перевагою шинної структури є можливість вмикання до МПС нових модулів, наприклад кількох блоків ОЗП і ПЗП, для одержання потрібного обсягу пам'яті.

Покращення метрологічних характеристик

Вилучення систематичної похибки.

Найбільш часто систематичні похибки обумовлені **зсувом нуля, невідповідністю реального значення коефіцієнта передачі номінальному значенню, нерівномірністю амплітудно-частотної характеристики тракту передачі сигналу, впливом характеристики АЦП.**

Принцип корекції систематичної похибки, пов'язаної з тим, що значення коефіцієнта передачі вимірювального каналу відрізняється від номінального.



У пам'яті мікропроцесорної системи зберігається число \mathbf{B} , що відповідає строго визначеному значенню \mathbf{A}_0 вхідної напруги, тобто число, що повинно бути отримане на виході АЦП, якщо на вхід вольтметра надходить напруга із значенням \mathbf{A}_0 , і коефіцієнт передачі тракту сигналу, а також коефіцієнт перетворення АЦП відповідають своїм номінальним значенням.

При підведенні числа \mathbf{B} до входів ЦАП на його виході формується напруга, значення якої дорівнює \mathbf{A}_0 . Ця напруга подається на вхід приладу. У результаті аналого-цифрового перетворення виходить число \mathbf{B}' , що відрізняється від числа \mathbf{B} через наявність систематичної похибки. Її характеризує відношення чисел $\alpha = \mathbf{B}/\mathbf{B}'$.

Значення коефіцієнта α обчислює мікропроцесор, і воно фіксується в пам'яті. Таким чином, у пам'яті міститься коригувальний коефіцієнт.

Зменшення впливу випадкової похибки.

Вплив випадкової похибки можна зменшити раціональною обробкою результатів спостережень. Для оцінки випадкових похибок користуються ймовірнісними характеристиками.

Проведення багаторазових вимірювань з наступним усередненням – ефективний спосіб зменшення впливу випадкової похибки на результат вимірювання.

Компенсація внутрішніх шумів.

Ця операція дозволяє підвищити чутливість вимірювального приладу, розширити діапазон вимірюваних значень напруги в сторону малих значень.

Процесорні похибки вимірювань

Процедура процесорних вимірювань може розглядатися як послідовності виконання аналогових, аналого-цифрових і цифрових вимірювальних перетворень, що дозволяє подати похибку у вигляді суми відповідних компонент.

Відмінність результатів цифрових вимірювальних перетворень від дійсних визначають процесорні похибки вимірювань. Для вивчення цього виду похибок виділяють три причини їх появи:

- **алгоритмічна похибка**, зумовлена відмінністю прийнятого алгоритму вимірювання від адекватного (гіпотетичного);
- **похибка округлення**, викликана наявністю округлень проміжних цифрових перетворень у результатах вимірювань;
- **динамічна процесорна похибка**, джерелом появи якої є обмеженість швидкодії мікропроцесора (процесора).

Коли існує **гіпотетичний алгоритм вимірювань**, він дозволяє одержати істинне значення вимірюваної величини. Тоді **виникнення алгоритмічної похибки буде зумовлено відмінністю прийнятого алгоритму вимірювання від гіпотетичного.**

Застосування мікропроцесорів у вимірювальних приладах пов'язано з необхідністю оцінювати інструментальні **похибки, які можуть виникнути при виконанні обчислювальних процедур через обмеженість розрядної мережі процесора.** Вони називаються **похибками округлення.**

Операції округлення в МП здійснюються, як правило, простим відсіканням невраховуваних розрядів або симетричним округленням з урахуванням значення старшого неврахованого розряду.

Похибки відсікання мають негативний знак для будь-яких арифметичних операцій над числами. Тому **при значній кількості послідовних операцій похибки можуть накопичуватись і перевищити припустимий рівень.** Особливо важливо проводити оцінку цієї похибки при розрядній мережі мікропроцесорної системи, близької до розрядності АЦП.

У засобах вимірювання, що працюють під управлінням МП, суттєву роль відіграють часові затримки запуску АЦП порівняно з потрібним графіком вимірювань. Ці **затримки значною мірою визначаються затратами процесорного часу на обробку переривань, управління, запам'ятовування, виконання інтерфейсних функцій**. Тому при метрологічних випробуваннях мікропроцесорних засобів вимірювань, де похибка датування відліку залежить від стану вимірювальних модулів і програмних драйверів, необхідно передбачати експериментальну оцінку цієї похибки.

$$\Delta = \Delta_{\text{МПЗВ}} + dx/dt \delta_t$$

$\Delta_{\text{МПЗВ}}$ - абсолютна похибка мікропроцесорного засобу вимірювання;

δ_t - похибка датування відліків.

При організації опитування АЦП їх швидкодію вибирають такою, щоб у межах припустимих похибок можна було між двома послідовними вимірюваннями використати лінійну інтерполяцію dx/dt