

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Полтавський національний технічний університет  
імені Юрія Кондратюка

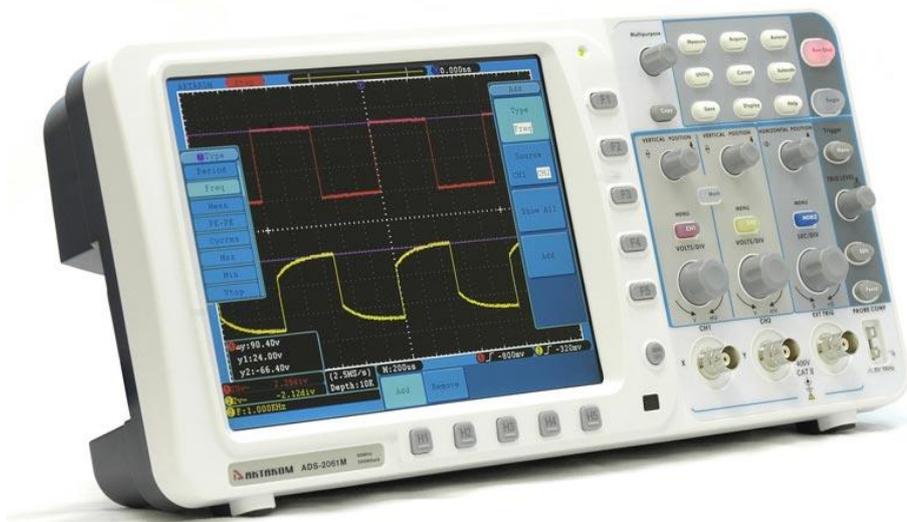
Кафедра автоматики та електропривода

## НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

ДО САМОСТІЙНОГО ВИВЧЕННЯ КУРСУ

“ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ І  
ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ”

для студентів спеціальності 141  
„Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка”  
денної та заочної форм навчання



Полтава 2017

Навчальний посібник до самостійного вивчення курсу "Основи метрології і електричних вимірювань" для студентів спеціальності 141 „Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” денної та заочної форм навчання. – Полтава: ПолтНТУ, 2017. - 141 с.

Укладачі: Н.В. Єрмілова, кандидат технічних наук, доцент,  
С.Г. Кислиця, кандидат технічних наук, доцент.

Відповідальний за випуск: завідувач кафедри автоматичної та електропривода: О.В. Шульга, доктор технічних наук, доцент.

Рецензент: О.В. Шефер, кандидат технічних наук, доцент.

Затверджено науково-методичною  
радою університету  
від \_\_\_\_\_ 20\_\_ р., протокол № \_\_\_\_

## ВСТУП

Вимірювання фізичних величин все ширше застосовується не тільки в технічних науках і в промисловості, але й біології, медицині, сільському господарстві, в охороні довкілля.

Вимірювання є гарантом забезпечення ефективності технологічних процесів та високої якості продукції. Без вимірювань немислимі всі дослідження науки і техніки. Загальний рівень розвитку науки та техніки, технічний прогрес у всіх галузях народного господарства завжди визначався і визначатиметься рівнем розвитку вимірювальної техніки. Це твердження впливає з ролі вимірювань як джерела найоб'єктивнішої інформації про навколишній матеріальний світ.

Особливо важлива роль електричних вимірювань, які завдяки ряду переваг над неелектричними вимірюваннями стали основними. А перевага електричних вимірювань полягає в універсальності, тобто в можливості вимірювань не тільки електричних величин, але й неелектричних, попередньо перетворених на електричні; дистанційності, що визначається можливістю передавання вимірювальної інформації у вигляді електричних сигналів на практично довільні відстані від досліджуваного об'єкта; можливості вимірювань швидкозмінних величин за допомогою малоінерційних електричних засобів вимірювальної техніки; можливості забезпечення високої чутливості та потрібної точності, можливості комп'ютеризації вимірювань.

В наш час вимірювальна техніка, що являє собою сукупність методів й засобів для отримання достовірної кількісної інформації про характеристики речовин, матеріалів, виробів, технологічних процесів та фізичних явищ, є одним з рішучих факторів технічного прогресу в усіх галузях народного господарства. Екстремальний характер умов багатьох галузей сучасного виробництва й наукових досліджень (дуже високі та низькі температури та тиски, агресивні середовища, надвисокі швидкості протікання процесів, великий діапазон вимірюваних величин) вимагає широкої автоматизації процесів вимірювань. Виникають нові вимоги до засобів вимірювань, які характеризуються переходом до використання результатів не окремих вимірювань, а потоків вимірювальної інформації. Це призводить до інтенсивного розвинення інформаційно-вимірювальних систем.

# 1. ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ

## 1.1. Загальні відомості про метрологію

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 із заданою ймовірністю.

Вимірювання забезпечують зв'язок з об'єктом досліджень чи керування в тій чи іншій галузі техніки. На першому етапі розвитку вимірювань діяли, головним чином, тенденції диференціації: кожна галузь вимірювань розвивалась відокремлено. Виникли окремі галузі вимірювальної техніки — техніка вимірювань механічних величин, електричних величин і т.д. Метрологія об'єднує єдиною теорією, єдністю понять, методів і засобів різні галузі вимірювальної техніки. Сьогодні, коли створюються складні вимірювальні інформаційні системи, для оптимального розв'язання непростих вимірювальних задач необхідне широке узагальнення результатів, отриманих у різних галузях вимірювань. Ці обставини і сприяють посиленню інтеграції в сучасній метрології та вимірювальній техніці.

Метрологія розвивається як єдина наука, що охоплює філософські питання вимірювань і вирішує такі основні завдання: створення еталонів та мір, вимірювальних приладів і вимірювальних інформаційних систем, розроблення методів вимірювальних перетворень, методів оцінювання точності результатів вимірювань тощо. Такий розвиток метрології об'єднує набутий досвід всіх метрологів, працівників приладобудівних вимірювальних служб і відображає тенденції до інтеграції.

Предмет, методи та засоби метрології можна сформулювати так. 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.

Для забезпечення високого рівня вимірювань не досить мати теоретичну базу та засоби вимірювальної техніки, необхідно також вміти правильно користуватись ними. Тому метрологія виступає в двох аспектах

– науково-технічному та законодавчому. В науково-технічному аспекті змістом метрології є вирішення наукових і технічних задач, які забезпечують створення сучасних еталонів, засобів та методів вимірювань, методів оцінювання точності вимірювань тощо, а в законодавчому — створення регламентованих державою загальних правил, вимог та норм, які забезпечували б високий рівень вимірювальної справи і мали би наукову основу.

Необхідно відзначити взаємний зв'язок метрології та стандартизації. Стандартизація — це діяльність, що полягає у розробленні та встановленні вимог, правил, норм, чи то характеристик з метою досягнення оптимальної узгодженості в певній галузі, результатом чого є підвищення ступеня відповідності продукції її функціональному призначенню. Стандарти встановлюють відповідні вимоги до матеріалів, виробів, технічної та технологічної документації, методів досліджень тощо.

Взаємозв'язок метрології та стандартизації проявляється в тому, що вимірювання, з одного боку, пронизані різними стандартами (на засоби вимірювальної техніки, методики і ін.), а, з іншого боку, стандарти забезпечуються методами та засобами контролю їх виконання. Тому метрологія і стандартизація в Україні об'єднані в єдину державну службу, якою є Державний комітет України зі стандартизації, метрології та сертифікації (Держстандарт України).

В Україні діють Державні стандарти України (ДСТУ), Міждержавні, а також чинними до моменту прийняття ДСТУ є деякі стандарти (ГОСТ) Радянського Союзу.

Стандартизація і метрологія, особливо останніми роками у зв'язку з успішним розвитком міжнародного співробітництва, набувають міжнародного характеру. Україна є активним членом багатьох міжнародних організацій: Міжнародної організації зі стандартизації, Міжнародної організації законодавчої метрології, Міжнародного комітету мір та ваг, Міжнародної електротехнічної комісії.

## **1.2. Одиниці фізичних величин**

Одиниця фізичної величини – це певний розмір даної величини, прийнятий за угодою (Генеральною конференцією з мір та ваг) для кількісного відображення однорідних з нею величин. Одиниця фізичної величини є величиною, якій за визначенням присвоєне числове значення 1.

В природі фізичні величини пов'язані між собою залежностями, які виражають одні величини через інші і називаються рівняннями зв'язку між величинами. Сукупність пов'язаних такими залежностями величин, серед яких одні умовно називаються незалежними, а інші виражаються через них, називають системою величин. Незалежні величини цієї системи

називають основними, а всі інші — похідними. Сукупність основних та похідних одиниць певної системи величин становлять систему їх одиниць.

Одиниці, які не належать ні до основних, ні до похідних одиниць цієї системи називаються додатковими (радіан — рад; стерадіан — ср), а одиниці, що не входять в цю систему, є позасистемними (літр — л; тонна — т; градус — ° та ін.). До позасистемних належать також відносні одиниці: відсоток — %; промілле — ‰, мільйонна частка — млн<sup>-1</sup>.

Одиниця, що в ціле число разів більша за системну або позасистемну, називається кратною одиницею, а одиниця, що в ціле число разів менша за системну або позасистемну, називається частковою одиницею (табл.1.1).

Таблиця 1.1

### Префікси для утворення десяткових кратних і часткових одиниць

Множник	Префікс	Позначення префікса		Множник	Префікс	Позначення префікса	
		міжнародне	українське			міжнародне	українське
10 <sup>18</sup>	екса	E	Е	10 <sup>-1</sup>	Деци	d	д
10 <sup>15</sup>	пета	P	П	10 <sup>-2</sup>	Сант	c	с
10 <sup>12</sup>	тера	T	Т	10 <sup>-3</sup>	Мілі	m	м
10 <sup>9</sup>	гіга	G	Г	10 <sup>-6</sup>	Мікро	μ	мк
10 <sup>6</sup>	мега	M	М	10 <sup>-9</sup>	Нано	n	н
10 <sup>3</sup>	кіло	k	к	10 <sup>-12</sup>	Піко	p	п
10 <sup>2</sup>	гекто	h	г	10 <sup>-15</sup>	Фемто	f	ф
10 <sup>1</sup>	дека	da	да	10 <sup>-18</sup>	Акто	a	а

Не зупиняючись на різновидах систем одиниць з точки погляду їх історичного розвитку, зупинимось на Міжнародній системі одиниць (Система Інтернаціональна — CI, System International — SI), прийнятій на XI Генеральній конференції з мір та ваг в 1960 році. Основними одиницями CI є метр, кілограм, секунда, ампер, кельвін, кандела, моль (остання одиниця прийнята в 1971р.), а додатковими — радіан та стерадіан. Система CI — практична, когерентна, раціоналізована.

### 1.3. Засоби електричних вимірів

Засоби електричних вимірів — це технічні засоби, які використовують для електричних вимірів і мають нормовані метрологічні якості.

В метрології розрізняють 5 видів засобів технічних вимірів :

- Міри;
- Електровимірювальні прилади;
- Вимірювальні перетворювачі;
- Електровимірювальні установки;
- Інформаційно-вимірювальні системи ( ІВС ).

1) Міри — засоби електричних вимірів, які призначені для відтворення фізичної величини заданого розміру.

Існують зразкові та робочі міри. Зразкові міри призначені для відтворювання та збереження одиниць виміру та передачі їх значень робочим мірам. Найвищою зразковою мірою вважають державний еталон. Робочі міри призначені для цілей вимірювання на підприємстві.

Міри бувають однозначні та багатозначні. Однозначна міра відтворює величину одного розміру. Багатозначна — відтворює ряд однойменних величин різного розміру.

2) Електровимірювальні прилади — засоби електричних вимірів, призначені для вироблення сигналів вимірювальної інформації у формі, зручній для безпосереднього сприйняття спостерігачем.

Прилади, показання яких є неперервною функцією зміни величини, що вимірюється, зветься аналоговими. Прилади, показання яких є дискретною функцією вимірюваної величини, представлені у цифровій формі, зветься цифровими. Також всі прилади поділяються на показуючі та реєструвальні. Показуючі прилади здійснюють тільки зчитування інформації, а реєструвальні — зчитування та реєстрацію інформації. Реєструвальні, у свою чергу, можуть бути самопишучі та друкуючі. Самопишучі прилади здійснюють запис показань у вигляді діаграм та графіків. Друкуючі прилади здійснюють друк результатів у цифровій формі.

3) Вимірювальні перетворювачі — засоби електровимірів, які призначені для вироблення сигналів вимірювальної інформації у формі, зручній для обробки, зберігання та подальшої передачі інформації, але недосяжній безпосередньому сприйманню спостерігачем. Поділяються на електричні та неелектричні перетворювачі. Електричні перетворювачі здійснюють перетворення електричних величин у електричні, але іншого розміру чи фізичної природи (наприклад, шунти, мостові схеми, підсилювачі та ін.). Неелектричні перетворювачі здійснюють перетворення неелектричних величин у електричні (термоопори, індуктивні та ємнісні перетворювачі, фотоелементи та ін.).

4) Електровимірювальні установки - сукупність функційно об'єднаних засобів вимірів (мір, вимірювальних приладів та перетворювачів), а також допоміжних пристроїв, які призначені для вироблення вимірювальної інформації, зручної для безпосереднього сприйняття спостерігачем та розташованих в одному місці. Загальними вимогами пристроїв, які належать до електровимірювальної установки, є злагожденість по точності, швидкодії та вимірянній величині.

5) Інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) - сукупність засобів вимірів та допоміжних пристроїв, з'єднаних між собою загальними каналами зв'язку. Вони призначені для автоматичного одержання вимірювальної інформації від ряду джерел, а також для передачі, обробки

та представлення її у тій чи іншій формі. Пристрої, які належать до ІВС, територіально можуть бути віддалені одне від одного. Сучасні ІВС являють собою мікропроцесорні системи.

#### 1.4. Види та методи вимірювань

Розрізняють два основні **види вимірювань**: прямі та непрямі.

*Пряме* вимірювання — це вимірювання однієї величини, значення якої знаходять безпосередньо (за показом відповідного засобу вимірювань, наприклад, вимірювання довжини лінійкою, напруги — вольтметром).

*Непряме* вимірювання — це вимірювання, в якому значення однієї чи декількох вимірюваних величин знаходять після обчислення за відомими залежностями їх від декількох величин аргументів, що вимірюються прямо. Непрямі вимірювання можуть бути опосередкованими, сукупними або сумісними.

При *опосередкованому* вимірюванні значення однієї величини визначають за результатами прямих вимірювань інших величин, з якими вимірювана величина пов'язана явною функціональною залежністю. Наприклад, значення електричного опору  $R=U/I$  знаходять за результатами прямих вимірювань напруги  $U$  вольтметром та сили струму  $I$  амперметром. Опосередковані вимірювання виконують тоді, коли значення величин неможливо або складно виміряти прямо, або ж коли опосередковані вимірювання забезпечують вищу точність, ніж прямі.

*Сукупними* називають непрямі вимірювання, в яких значення декількох одночасно вимірюваних однорідних величин отримують розв'язанням рівнянь, що пов'язують різні сполучення цих величин, які вимірюються прямо або опосередковано. Прикладом сукупних вимірювань може бути визначення опорів  $R_1 R_2 R_3$  резисторів, що сполучені трикутником. При цьому вимірюють опори між кожною парою вершин трикутника і одержують систему рівнянь.

$$R_{1,2} = \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}; R_{2,3} = \frac{R_2(R_1 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3}; R_{3,1} = \frac{R_3(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + R_3};$$

розв'язки якої

$$R_1 = \frac{A}{2(R_{23} + R_{31} - R_{12})}; R_2 = \frac{A}{2(R_{31} + R_{12} - R_{23})}; R_3 = \frac{A}{2(R_{12} + R_{23} - R_{31})};$$

де

$$A = 4R_{23}R_{31} - (R_{23} + R_{31} - R_{12})^2.$$

*Сумісними* називають непрямі вимірювання, в яких значення декількох одночасно вимірюваних різнорідних величин отримують розв'язанням рівнянь, які пов'язують їх з іншими величинами, що

вимірюються прямо або опосередковано. Наприклад, відомо, що опір терморезистора

$$R_t = R_0(1 + \alpha t),$$

де  $R_0$  — опір резистора при температурі  $0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  — температурний коефіцієнт опору.

Якщо значення  $R_0$  та  $\alpha$  не можна знайти прямими чи опосередкованими вимірюваннями, то вимірюють опір  $R_{t_1}$  при температурі  $t_1$  та  $R_{t_2}$  при температурі  $t_2$  і складають систему рівнянь

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

розв'язуючи яку, знаходять потрібні значення

$$R_0 = \frac{R_{t_2}t_1 - R_{t_1}t_2}{t_1 - t_2} \text{ Ом},$$
$$\alpha = \frac{R_{t_1} - R_{t_2}}{R_{t_2}t_1 - R_{t_1}t_2} \text{ } 1/^\circ\text{C}.$$

Сумісні вимірювання використовуються також для визначення залежності між величинами.

Під **методом вимірювань** розуміють сукупність способів використання засобів вимірювальної техніки та принципу вимірювань для створення вимірювальної інформації. А принципом вимірювання називають сукупність явищ, на яких засноване вимірювання, наприклад, вимірювання температури з використанням термоелектричного ефекту.

Послідовність вимірювальних операцій, що забезпечує вимірювання згідно з обраним методом, називають процедурою вимірювань. А сукупність процедур і правил, виконання яких забезпечує одержання результатів з потрібною точністю, називають методикою виконання вимірювання.

Методи вимірювань поділяються на методи одночасного та різночасного порівняння. Методи *різночасного* порівняння часто називають методами безпосереднього оцінювання на тій підставі, що вони ґрунтуються на використанні вимірювальних приладів із заздалегідь проградуєваними в одиницях вимірюваної величини шкалами. До методів безпосереднього оцінювання належать прямі вимірювання, за винятком методів, заснованих на безпосередньому порівнянні розміру вимірюваної величини з розміром величини, що відтворюється мірою (вимірювання довжини за допомогою лінійки з поділками).

Методи, засновані на *одночасному* порівнянні, об'єднані загальною назвою методів порівняння. До них належать: метод зіставлення, метод

збігу, метод зрівноваження з регульованою мірою та диференційний метод.

Суть методу зіставлення полягає у прямому вимірюванні з одноразовим порівнянням вимірюваної величини зі всіма вихідними величинами багатозначної нерегульованої міри, наприклад, вимірювання довжини лінійкою з поділками, вимірювання інтервалу часу годинником.

Метод збігу (метод ноніуса) — це 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. Прикладом такого методу вимірювань може бути вимірювання лінійного розміру (діаметра) за допомогою штангенциркуля з ноніусом (рис. 1.1). Основна шкала проградуйована в міліметрах, а шкала ноніуса має 10 поділок по 1,8 мм. Тому порядковий номер поділки ноніуса, що збігається з будь-якою поділкою основної шкали, дає число десятих часток міліметра.

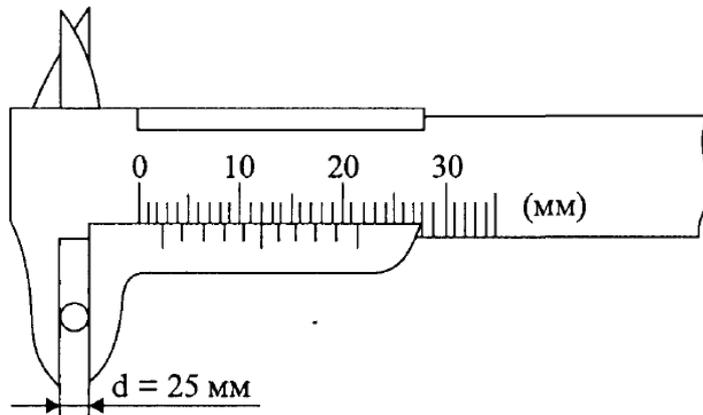


Рис.1.1 Вимірювання за методом збігу

Метод подвійного збігу (метод коінциденції, coincidence — збіг) — це метод прямого вимірювання з одноразовим порівнянням двох квантованих фізичних величин: вимірюваної та відтворюваної багатозначною нерегульованою мірою, наприклад, вимірювання інтервалу часу  $T_x$  з використанням послідовності періодичних імпульсів з відомим значенням їх періоду  $T_0$  (рис. 1.2).

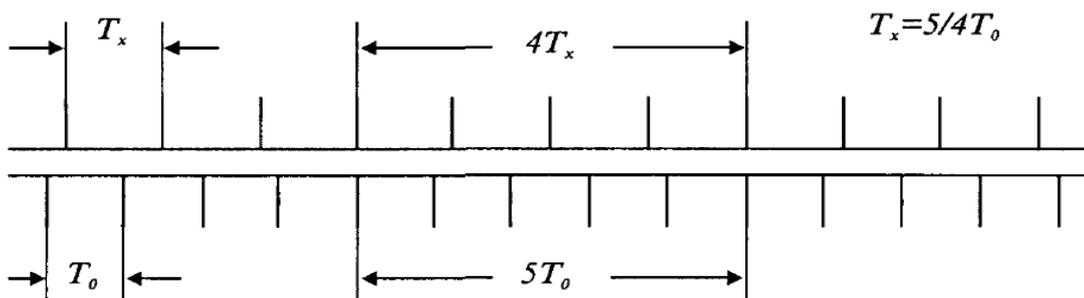


Рис.1.2 Вимірювання за методом подвійного збігу

Метод зрівноваження з регульованою мірою (нульовий метод, null method of measurement) — це метод прямого вимірювання з багаторазовим порівнянням вимірюваної величини та величини, що відтворюється регульованою мірою до їх повного зрівноваження, як, наприклад, вимірювання електричної напруги компенсатором.

Суть диференційного, або різницевого методу полягає у вимірюванні, при якому невелика різниця між вимірюваною величиною та вихідною величиною одноканальної міри вимірюється відповідним засобом вимірювань.

Особливо цікавим з погляду досягнення високої точності вимірювань є метод заміщення. Це метод непрямого вимірювання з багаторазовим порівнянням до повного зрівноваження вихідних величин вимірювального засобу при почерговій дії на його вході вимірюваної величини та регульованої міри. Іншими словами, суть цього методу полягає у порівнянні вимірюваної величини з мірою заміщенням цієї вимірюваної величини відомою величиною, відтворюваною мірою. При цьому методі передбачається запам'ятовування ефекту дії на засіб вимірювань вимірюваної величини (тобто запам'ятовування значення вихідної величини вимірювального засобу), що потім відновлюється при заміщенні вимірюваної величини регульованою багатозначною мірою.

Прикладом може бути вимірювання за допомогою порівняно неточного моста з використанням як заміщуючого засобу (міри) зразкового магазину опорів. Метод заміщення в цьому випадку дозволяє майже повністю виключити похибку моста з результату вимірювань.

### **1.5. Основні характеристики засобів вимірювання. Класи точності приладів**

Будь-який вимірювальний прилад повинен мати визначені характеристики, які забезпечують отримання найбільш точних результатів вимірювання. До них відносяться:

1) Можливість вимірювання тієї чи іншої фізичної величини у прийнятих одиницях вимірювання.

2) Діапазон вимірів приладу – різниця між найбільшим та найменшим значеннями величин, які можуть вимірюватися з вимагаємою точністю. Найбільше та найменше значення діапазону вимірювань називають відповідно нижньою та верхньою границями вимірювань або початковим та кінцевим значенням шкали.

3) Точність вимірів – ступінь наближеності результату вимірювання до його справжнього значення.

Точність вимірювання аналогових приладів характеризується похибками засобів вимірювань:

а) **абсолютна похибка** засобів вимірювань

$$\Delta A = A_x - A_0;$$

де  $A_x$  – виміряне значення;

$A_0$  – дійсне значення.

б) **поправка** – величина, яка дорівнює абсолютній похибці з протилежним знаком

$$P = -\Delta A = A_0 - A_x;$$

в) **відносна похибка** – відношення абсолютної похибки до дійсного значення, взяте у відсотках

$$\delta = \frac{\Delta A}{A_0} \cdot 100\%.$$

Дуже часто у знаменнику для відносної похибки замість  $A_0$  беруть  $A_x$  і тоді відносна похибка

$$\delta = \frac{\Delta A}{A_x} \cdot 100\%,$$

що доцільно, оскільки значення  $A_x$  відоме, а різниця між обома виразами для відносної похибки є дуже малою величиною і тим меншою, чим менша абсолютна похибка вимірювання;

г) **зведена похибка** – відношення абсолютної похибки до нормованого значення, взяте у відсотках

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_N} \cdot 100\%,$$

де  $A_N$  – нормоване значення.

Нормоване значення  $A_N$  для приладів з нулем із одного боку шкали дорівнює кінцевому значенню діапазону. Для шкал з нулем всередині шкали – арифметичній сумі по модулю граничних значень діапазону;

д) **варіація** — різниця між значеннями вимірюваної величини при прямому та зворотньому ході стрілки приладу

$$\Delta B = A_{x(np)} - A_{x(3e)}.$$

Варіація виникає внаслідок недосконалості механічної частини приладу: тертя в опорах, зазорів, люфтів;

е) **зведена варіація** – відношення варіації до нормованого значення, взяте у відсотках

$$B\% = \frac{\Delta B}{A_N} \cdot 100\%$$

Для визначення класа точності прилада розраховують зведену похибку і зведену варіацію в кожній оціфрованій точці шкали. Вибірають найбільше одержане значення і порівнюють зі стандартною шкалою класів точності приладів:

**0.05; 0.1; 0.2; 0.5; 1.0; 1.5; 2.5; 5.0 .**

**Класом точності** вважається найближче більше число з цієї шкали.

Для цифрових приладів абсолютна похибка підраховується як і для аналогових

$$\Delta A = A_x - A_0.$$

Відносна похибка цифрових приладів підраховується за формулою

$$\delta = \pm \left[ c + d \cdot \left( \frac{A_N}{A_x} - 1 \right) \right] \%,$$

де  $c$  – величина, яка чисельно дорівнює зведений похибці цифрового приладу;

$d$  – безрозмірний коефіцієнт, який вибирається із ряду

$$(10; 6; 5; 3; 2; 1.5) \cdot 10^{-n}$$

при  $n = 1, 2, 3, \dots$

Класи точності цифрових приладів завжди записують у вигляді дроби:

$$c/d ,$$

причому повинна виконуватися нерівність  $c/d > 1$ .

4) Швидкодія приладів, яка визначається часом встановлення показань. Відлік показань приладу можна робити тільки після приходу рухомої системи в стає положення, тому різні прилади мають різну швидкодію. Згідно стандарту швидкодія приладу визначається максимальним числом вимірів в одиницю часу, яке може бути зроблено з нормованою точністю.

5) Чутливість прилада – це його реакція на вхідний сигнал. Визначається як співвідношення похідної вихідного сигналу до похідної вхідного:

$$S = dY / dX .$$

Вживають також поняття відносної чутливості, яку визначають як відношення відносної зміни вихідної величини до відносної зміни вхідної величини:

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

Для стрілкових приладів чутливість визначається як похідна кута відхилення рухомої частини  $\alpha$  по величини  $X$ , яка вимірюється:

$$S = da / dx.$$

Поняття „чутливість” не слід ототожнювати з поняттям „поріг чутливості”. Поріг чутливості для приладів – мінімальне значення вхідного сигналу, при якому відбувається помітна зміна вихідного сигналу.

6) Вид рівняння шкали приладу. Визначається його статичною характеристикою. Шкали бувають: лінійні (рівномірні) та квадратичні (нерівномірні). Більш зручними у використанні є прилади з лінійними шкалами. Такі прилади не мають зони нечутливості – зони, обмеженої на шкалі чорною крапкою, у якій не зберігається вказаний клас точності. На шкалі приладу завжди нанесені поділки. Поділкою шкали називають частину шкали між двома сусідніми позначками, а ціна поділки  $C_{\text{п}}$  — різниця значень величини, яка відповідає одній поділці (двом сусіднім позначкам) шкали. Ціною найменшого розряду цифрового вимірювального приладу є різниця між двома найближчими показами цього засобу вимірювань.

7) Метрологічна надійність приладу – визначає ймовірність отримання певних результатів за допомогою прилада протягом даного часу. Це поняття зв'язують не з явними відмовами (механічна поламка, втрата працездатності), а з прихованими відмовами, під якими, у даному випадку, належить розуміти вихід похибки вимірювання за межі встановленого допуску при збереженні загальної працездатності прилада.

Метрологічна надійність визначає частоту міжповірочних інтервалів.

8) Ряд загальних вимог до прилада: вага, габарити, технологічність виготовлення, вартість, ремонтоздатність, зручність в експлуатації.

### 1.6. Класифікація та характеристики електричних сигналів

Сигнал вимірювальної інформації – це сигнал, функціонально зв'язаний з фізичною величиною, що вимірюється, який несе інформацію про її значення. Класифікація сигналів представлена на рис. 1.3.

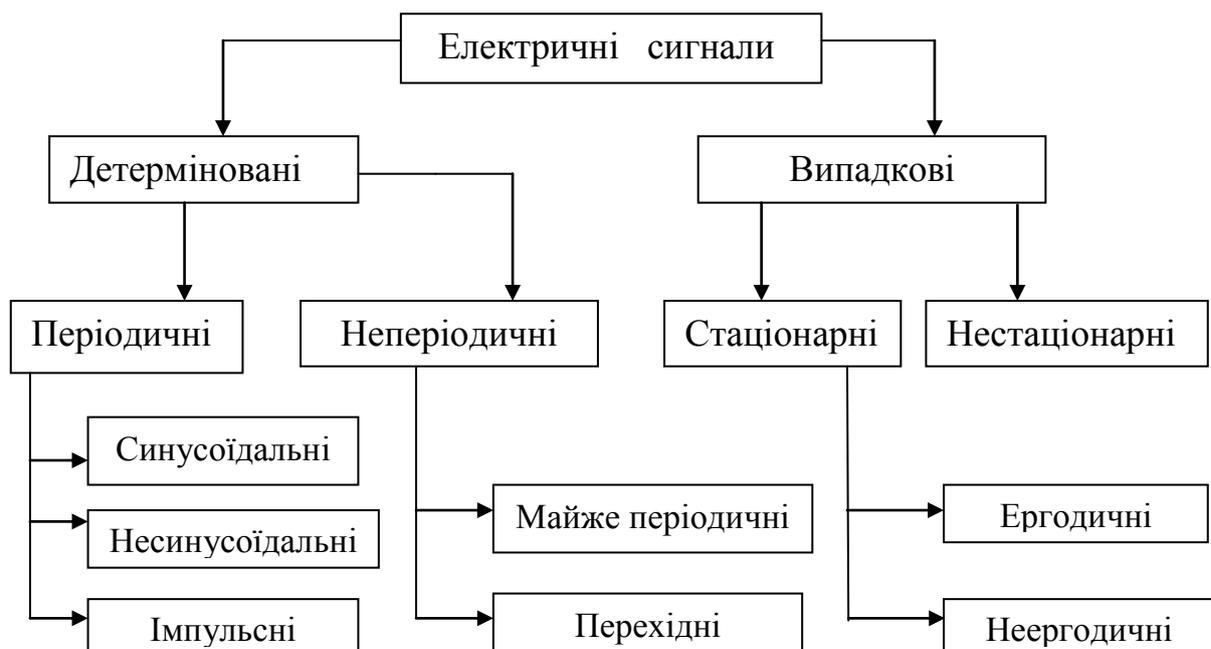


Рис. 1.3 Класифікація електричних сигналів

Особливостями, які характеризують електровиміри, є багаточисельність величин, що вимірюються, великі межі значень, які вимірюються (мілівольти — кіловольти, постійний струм – сотні ГГц змінного струму).

За характером зміни в часі усі сигнали можна класифікувати на детерміновані та випадкові (недетерміновані).

Детерміновані сигнали - це сигнали, миттєві значення яких у будь-який момент часу відомі. Вони можуть бути неперервними та дискретними (імпульсними). Неперервні сигнали можуть бути періодичними або неперіодичними. Періодичні неперервні сигнали діляться на синусоїдальні (гармонічні) та несинусоїдальні (полігармонічні). До неперіодичних сигналів відносяться майже періодичні та перехідні.

**Синусоїдальний** сигнал можна описати функцією часу  $t$ :

$$u(t) = U_{\max} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi),$$

де  $u(t)$  – миттєве значення;

$U_{\max}$  – амплітуда сигналу (найбільше значення за період);

$f$  – частота;

$\varphi$  – початкова фаза.

**Несинусоїдальний** сигнал можна представити рядом Фур'є:

$$u(t) = U_o + \sum_{k=1}^n U_{\max.k} \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t + \varphi_k),$$

де  $U_o$  – середнє значення сигналу за період  $T$  (постійна складова);

$U_{\max.k}$  – амплітуда сигналу  $k$ -ї гармоніки;

$k$  – номер гармоніки;

$\omega$  – це швидкість зміни змінної величини ( $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ );

$\varphi_k$  – початкова фаза  $k$ -ї гармоніки.

Можна вимірювати наступні параметри електричних сигналів як синусоїдальної, так і несинусоїдальної форми:

1) Постійну складову сигналу – середнє значення за період  $T$ :

$$U_{\text{сеп}} = U_o = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt;$$

2) Середньовипрямлене значення сигналу за період – середнє значення модуля сигналу:

$$U_{\text{сеп.в}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |u(t)| dt;$$

(використовують лише для сигналів, симетричних вісі часу).

3) Середньоквадратичне значення сигналу за період (діюче, ефективне):

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) dt}.$$

Між цими значеннями сигналів існує зв'язок, який виражається через коефіцієнти амплітуди та форми:

$$K_A = \frac{U_{\max}}{U}; \quad K_\phi = \frac{U}{U_{\text{сеп}}}.$$

Значення коефіцієнтів для різних стандартних форм електричних сигналів відомі і зведені у спеціальні таблиці.

**Імпульсні** сигнали – детерміновані сигнали, які відрізняються від нуля на протязі обмеженого інтервалу часу. Вони підрозділяються на:

а) відеоімпульси – однополярні імпульси струму або напруги, які можуть бути додатньої або від'ємної полярності відносно визначеного рівня, прийнятого за нульовий;

б) радіоімпульси – серія високочастотних коливань, яка утворюється при дії відеоімпульсів на коливання високої частоти.

Відеоімпульси можуть бути різної форми. Найчастіше зустрічаються імпульси прямокутної форми (тривалість плоскої частини такого імпульсу повинна бути не менше 0,7 від тривалості усього імпульсу, яка звичайно відраховується на половині амплітудного значення  $0,5U_m$ ).

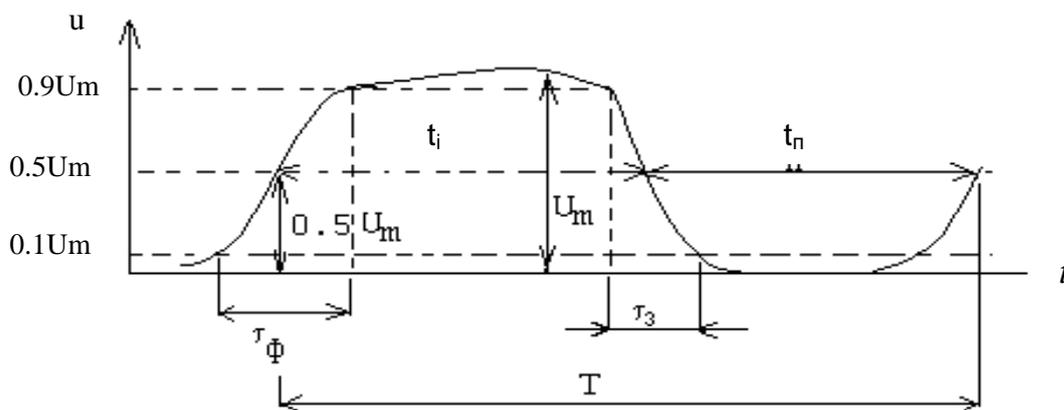


Рис. 1.4 Основні характеристики імпульсних сигналів

Розрізняють наступні параметри імпульсів:

- амплітуда імпульсу  $U_m$  [В];
- тривалість імпульсу  $t_i$  та паузи  $t_n$  [с], відраховують на рівні  $0,5U_m$ ;
- тривалість фронту  $\tau_\phi$  та зрізу  $\tau_z$ , визначається часом наростання сигналу від величини  $0,1U_m$  до  $0,9U_m$  та спаду від  $0,9U_m$  до  $0,1U_m$ ;

- період слідування імпульсів  $T$  (визначають на рівні  $0,5U_m$ );
- частота слідування  $f$  – величина, обернена періоду  $T$ ;
- коефіцієнт заповнення імпульсної послідовності:

$$K = \frac{t_i}{T};$$

- скважність (шпаруватість) – величина, обернена коефіцієнту заповнення:

$$S = \frac{T}{t_i} .$$

До **випадкових** (недетермінованих) відносяться сигнали, які змінюються у часі нерегулярно, непередбачувано, їх майбутні значення можна прогнозувати лише з певною часткою ймовірності. Функція часу, що описує випадковий сигнал, має назву вибіркової функції (або при кінцевому інтервалі – реалізацією функції). Багаточисельність реалізацій цієї функції складає ансамбль, котрий формує випадковий сигнал. Повне описання випадкових сигналів здійснюється за допомогою низки імовірнісних характеристик. Розрізняють стаціонарні та нестаціонарні випадкові сигнали. Стаціонарні, у свою чергу, можуть бути ергодичними та неергодичними.

**Стаціонарним** називається сигнал, ймовірнісні характеристики котрого не залежать від часу, а нестаціонарним, якщо його характеристики залежать від часу.

Випадковий сигнал називають ергодичним, якщо він є стаціонарним та його ймовірнісні характеристики не залежать від номеру реалізації, тобто ці характеристики можуть бути визначені по одній реалізації. На практиці більшість випадкових сигналів, що відповідають стаціонарним фізичним явищам, мають властивість ергодичності. До **нестационарних** сигналів відносяться усі випадкові сигнали, які не володіють вищепереліченими властивостями.

### 1.7. Загальна класифікація похибок вимірювання

Кінцевою метою всякого вимірювання є знаходження результату вимірювання як оцінки істинного значення вимірюваної величини. Позитивною якісною ознакою вимірювання є точність вимірювання, що характеризує близькість результату до істинного значення. Чим ближче результат до істинного значення, тим точніше вимірювання і навпаки. Спеціального кількісного визначення точність не має. Традиційно для кількісного оцінювання якості вимірювання застосовують негативну характеристику — похибку результату вимірювання або часто просто похибку вимірювання як відхилення результату вимірювання  $X$  від істинного (справжнього) значення вимірюваної величини.

Використання похибки як характеристики якості вимірювань зумовлено тим, що принаймні похибки засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) можна визначити (можливо наближено) експериментальним шляхом, наприклад, подаючи на його вхід відоме значення величини і зіставляючи з ним результат вимірювання. Експериментально можна перевірити також методики вимірювань певних величин, що виконуються певними ЗВТ в певних умовах.

Похибки вимірювань виникають внаслідок різноманітних причин (див. рис.1.5). Під час глибокого вивчення об'єкта і вимірювальної величини, покращення засобів вимірювальної техніки, способів їх використання, методик виконання вимірювань, корекції та опрацювання результатів тощо, вплив похибок на результат вимірювання зменшують, а отже, і зменшують похибку вимірювання. Однак принципово зазначені фактори не можна усунути чи виключити повністю. Тому в наведеному рівнянні похибки залишаються дві невідомі величини — похибка  $\Delta$  та істинне значення вимірюваної величини  $X$  (інакше відпала би потреба у вимірюванні). Отже, теоретично за відомого результату вимірювання  $x$  неможливо визначити ні істинне значення величини, ні фактичне значення похибки. Оскільки неможливе абсолютно точне вимірювання, то і неможливо точно визначити похибку вимірювання, що є одним з головних протиріч вимірювань.

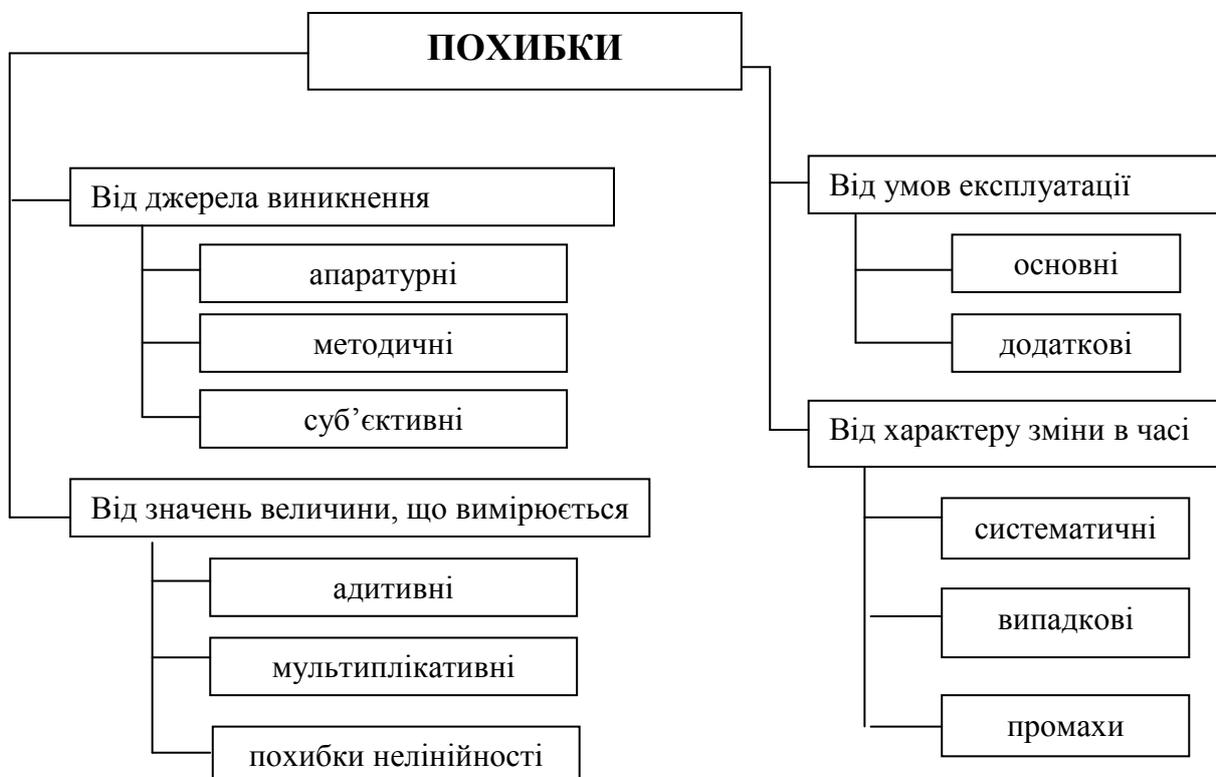


Рис. 1.5 Класифікація похибок вимірювання

На практиці, щоб вийти з цього протиріччя, визначають не точне значення похибки вимірювання, а оцінюють певні її характеристики, зокрема деякий інтервал, в якому вона може знаходитися. При цьому цей інтервал може бути з твердими, або з безумовними границями, в тому сенсі, що ні за яких умов похибка вимірювання не вийде з цього інтервалу, або з м'якими, чи умовними (імовірнісними, довірчими чи вірогідними) границями, в тому сенсі, що похибка вимірювання знаходиться в цьому інтервалі лише з певною ймовірністю.

Кінцевою метою аналізу похибок вимірювань якраз є оцінювання границь (умовних чи безумовних), в яких знаходиться фактичне значення похибки. Вважають, що результат вимірювання разом з інтервалом, що визначається границями похибки вимірювання, накриває з певною ймовірністю істинне значення вимірюваної величини. Невідомість істинного значення величини і неможливість точного визначення похибки вимірювання спричинилися до створення міжнародними організаціями з метрології та вимірювань (ISO, IEC, IMECO та ін.) нормативних документів, в яких для оцінювання якості вимірювань застосовується термін "невизначеність" ("непевність") результату вимірювання. Офіційне означення: невизначеність (непевність) — це пов'язаний з результатом вимірювання параметр, котрий характеризує розсіювання значень, які можна обґрунтовано приписати вимірюваній величині.

1) В залежності від джерела виникнення визначають наступні похибки вимірювання:

– **апаратурні** – виникають внаслідок похибок вимірювальних приладів, що використовуються; причиною є недосконалість самих засобів вимірювання;

– **методичні** похибки – виникають з-за недосконалості застосовуваних методів вимірювання. Ці похибки пов'язані з невідповідними (неадекватними) моделями вимірюваних об'єктів і їх величин, в тому числі спрощеннями залежностей, та зумовлені взаємодією засобів вимірювальної техніки та об'єктів. В певних вимірюваннях методичні похибки можуть бути великими — до 10, 100% і більше, а в інших настільки малими, що ними можна знехтувати. Наприклад, при вимірюванні сили змінного електричного струму в провіднику найчастіше приймається його гармонійна модель. Насправді форма кривої струму може бути спотворена, він може мати вищі гармоніки, а також сталу складову. Крім того, дія зовнішнього електромагнітного поля спричиняє до наведення електричних завад в провіднику в різних частотних діапазонах. У провіднику генеруються також власні температурно-залежні електричні шуми. Зовнішні наведення та внутрішні шуми, за певних умов (наприклад, низький рівень струму) можуть суттєво спотворити вимірюваний струм. При вимірюванні струму неврахування зазначених ефектів може спричинити суттєву похибку вимірювання. Крім того, протікання

вимірюваного струму спричиняє нагрівання резистора, що, у свою чергу, може викликати зміну струму через нього.

На вибір моделі вимірюваної величини значною мірою впливає конкретна мета вимірювання, яка встановлює потрібну точність вимірювання. Якщо потрібна точність вимірювання не отримана, а інші оцінені складові похибки вимірювання є малими, то модель об'єкта і вимірюваної величини необхідно уточнити, можливо навіть і ускладнити.

Іншою складовою методичної похибки є похибка від небажаної взаємодії засобу з об'єктом. Наприклад, при вимірюванні струму амперметром та напруги вольтметром виникає методична помилка внаслідок власного споживання потужності цими приладами.

При послідовному вмиканні амперметра у електричний ланцюг опір ланцюга збільшується, а струм, відповідно, зменшується. Ця зміна струму і є абсолютною методичною похибкою.

Відносна методична похибка вимірювання струму амперметром:

$$\delta_{\mu I} = -\frac{1}{1 + \frac{R}{R_A}} \cdot 100\%,$$

де  $R_A$  – опір амперметра;

$R$  – еквівалентний опір усього ланцюга відносно зажимів амперметра.

З цієї формули зрозуміло, що для зниження методичної похибки потрібно вибирати амперметри з мінімальним опором.

При паралельному ввімкненні у ланцюг вольтметра напруга між його жабимами зменшується внаслідок зменшення опору між точками ввімкнення прилада. Зміна напруги є абсолютною методичною похибкою вимірювання.

Відносна методична похибка вимірювання напруги вольтметром:

$$\delta_{\mu U} = -\frac{1}{1 + R_V / R} \cdot 100\%,$$

де  $R_V$  — опір вольтметра;

$R$  – еквівалентний опір усього ланцюга відносно зажимів вольтметра.

Таким чином, необхідно вибирати вольтметри з максимальним власним опором.

– **суб'єктивні** похибки – відбивають недосконалість органів почуттів оператора, його недостатню кваліфікацію або увагу. У досвідчених операторів існує власна похибка.

2) В залежності від значення величини, яка вимірюється, похибки поділяють на адитивні, мультиплікативні та похибки нелінійності.

Похибки вимірювань (абсолютні) можуть залежати від значення вимірюваної величини або бути незалежними від нього. Якщо абсолютна похибка не залежить від значення вимірюваної величини, то вона

називається **адитивною** — така, що додається до вимірюваної величини (рис. 1.6,а). Відповідно до означення її модель

$$\Delta_0 = \Delta X_a,$$

а результат вимірювання, що спотворений адитивною похибкою  $\Delta_0$ ,

$$x = X + \Delta X_a.$$

Адитивні похибки проявляються як зміщення покажчика аналогових приладів з нульової позначки, а в електронних приладах — як ненульовий показ при нульовому значенні вимірюваної величини.

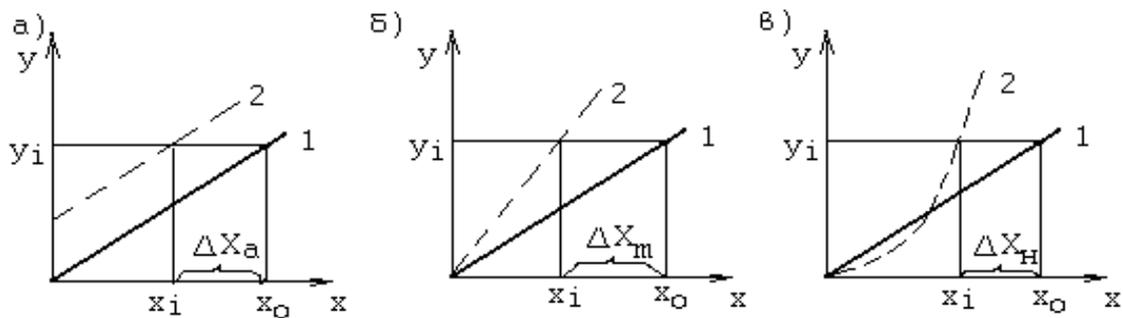


Рис 1.6 Аддитивна, мультиплікативна та похибка нелінійності

1 – ідеальна характеристика;

2 – а) характеристика з аддитивною похибкою;

$\Delta X_a$  – величина аддитивної похибки;

б) характеристика з мультиплікативною похибкою;

$\Delta X_m$  – величина мультиплікативної похибки;

в) характеристика з похибкою нелінійності;

$\Delta X_n$  – величина похибки нелінійності.

Якщо абсолютна похибка прямопропорційно залежить від значення вимірюваної величини, то вона називається **мультиплікативною** (рис. 1.6,б). Відповідно до означення її модель

$$\Delta X_m = \delta_s \cdot X,$$

де  $\delta_s$  — відносна мультиплікативна похибка, а результат вимірювання, що спотворений такою похибкою,

$$x = X + \delta_s \cdot X.$$

При нульовому значенні вимірюваної величини ця похибка також має нульове значення. Мультиплікативна похибка вимірювання зумовлена похибками коефіцієнтів перетворення вимірювальних перетворювачів, зокрема, масштабних — вимірювальних підсилювачів, подільників, трансформаторів. Похибки еталонних (зразкових) величин можуть стати

також причиною мультиплікативних похибок. Наприклад, похибка ЕРС нормального елемента при вимірюванні компенсатором спричиняє мультиплікативну похибку. Загалом мультиплікативні похибки спричинені похибками (змінюю) чутливості елементів вимірюваного кола. Це може бути старіння елементів та вузлів, тертя в опорах, вплив зовнішніх факторів.

Похибка вимірювань може складніше залежати від вимірюваної величини, наприклад квадратично, чи за іншим законом (рис. 1.6,в). В цьому випадку говорять про **нелінійну похибку**  $\Delta X_n(X)$  і результат вимірювання, що містить таку похибку

$$x = X + \Delta X_n.$$

Нелінійні похибки виникають при застосуванні для вимірювань ЗВТ з нелінійними характеристиками, а також внаслідок трансформації адитивних та мультиплікативних похибок при нелінійних залежностях між вимірюваними величинами, зокрема при опосередкованих, сумісних та сукупних вимірюваннях.

У практиці вимірювань всі перелічені складові можуть одночасно спотворювати результат вимірювання. За певних умов деякими складовими можна знехтувати і розглядати лише одну чи дві складові загальної похибки.

3. В залежності від умов експлуатації, похибки поділяють на основні та додаткові.

Засоби вимірювальної техніки використовують в певних умовах. Серед них температура довкілля, його тиск, вологість, напруженість магнітного, електростатичного поля, інтенсивність електромагнітного поля, рівень завад спільного і нормального видів, рівень радіації, механічних вібрацій, струсів та ударів, напруга та частота живлення, певне просторове положення та інші. Хоча ці величини не вимірюються даним ЗВТ, однак вони впливають на його роботу, змінюючи покази чи інші характеристики. Їх називають впливними величинами. Для кожної з впливних величин встановлюють нормальні значення або область нормальних значень (нормальні умови), а також область робочих значень (робочі умови). Для кожного типу ЗВТ регламентують вид впливних величин і конкретні їх нормальні та робочі області значень. Наприклад, нормальною областю температури для деякого ЗВТ може бути температура  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  (від  $18^\circ\text{C}$  до  $22^\circ\text{C}$ ), а робоча область температур — від  $5^\circ\text{C}$  до  $35^\circ\text{C}$ . Або нормальна область напруги живлення деякого ЗВТ становить  $220\text{В} \pm 4\%$ , тобто від  $211,2\text{ В}$  до  $228,8\text{ В}$ , а робоча область, наприклад, від  $186\text{ В}$  до  $244\text{ В}$ .

Якщо всі регламентовані для даного ЗВТ впливні величини є в області нормальних значень (вимірювання в нормальних умовах), то для ЗВТ

оцінюють лише **основну** похибку. Отже, основна похибка ЗВТ — це його похибка в нормальних умовах. Якщо одна чи більше впливних величин виходять за границі нормальних значень але є в границях робочих значень, то, крім основної, необхідно оцінювати відповідні **додаткові** похибки.

Нарешті, якщо хоч одна з впливних величин виходить за границі робочої області, то інструментальна похибка не може бути оцінена і результати вимірювань не можна використовувати за призначенням. Основну та додаткові похибки ЗВТ оцінюють за їх класом точності, враховуючі фактичні умови вимірювань.

4. В залежності від **характеру зміни в часі**, похибки поділяються на:

- систематичні – похибки, які лишаються постійними або закономірно змінюються при повторних вимірюваннях однієї й тієї ж величини;
- випадкові – похибки, які змінюються випадковим чином;
- промахи – грубі похибки, які впливово перевищують похибку, що очікується при даних умовах, наприклад, при неправильному відлікові, при стрибку напруги та інше.

### **1.8 Систематичні та випадкові похибки**

Сталі та регулярні змінні належать до **систематичних** похибок. Регулярність полягає в тому, що дослідженнями можна вивчити закономірності часової зміни похибки, і ця закономірність протягом майбутнього часу загалом зберігається і може бути використана при зменшенні впливу похибок. Серед регулярних виділяють прогресуючі (рис. 1.7,б) — які практично лінійно змінюються в часі (зростають чи спадають), періодичні, наприклад, що змінюються за гармонічним законом (рис. 1.7,в). Очевидно, що регулярність похибки забезпечується лише протягом певного часу, в одних випадках довшого, а в інших — коротшого. Закономірність часової зміни систематичної похибки може бути описана у вигляді часової функції чи графіка.

Найбільш небезпечними є сталі систематичні похибки, оскільки при вимірюваннях вони безпосередньо не проявляються, зокрема при повторних вимірюваннях показ приладу залишається незмінним. Такі похибки часто дуже важко виявити, а їх неврахування може суттєво спотворити результат вимірювання. Змінні похибки проявляються у зміні показів, тому їх значно легше виявити і врахувати. Поняття систематичної похибки не означає, що вона є відомою (детермінованою). Систематичні похибки часто можуть бути не виявлені, зокрема при автоматичних вимірюваннях, і тому залишаються невраховані в результатах вимірювань, чим можуть спричинитися до суттєвої недостовірності останніх. Часто змінні випадкові похибки помилково можуть бути прийняті за випадкові, і для їх зменшення застосовані недостатньо ефективні алгоритми. Загалом виявлення і належне врахування систематичних похибок головним чином залежить від досвіду експериментатора.

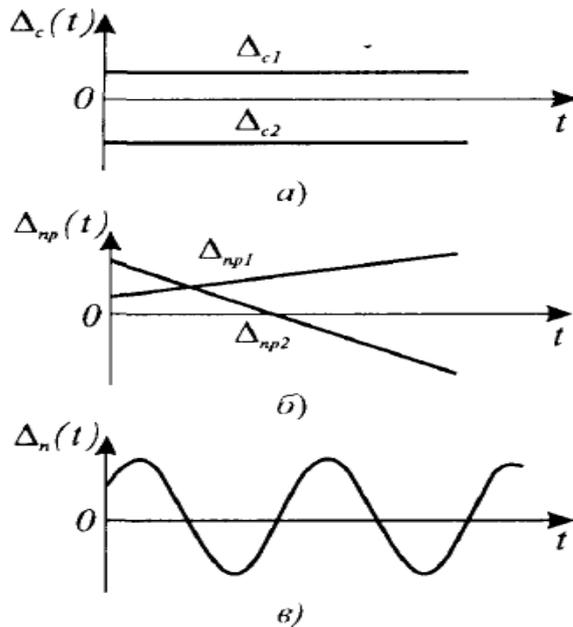


Рис. 1.7 Систематичні (а), прогресуючі (б) та періодичні (в) похибки

Для боротьби з найбільш розповсюдженими систематичними похибками існують наступні методи:

1) Постійні систематичні похибки

а) метод поправок – базується на результатах попереднього дослідження, у якому досліджується вплив зовнішніх факторів. По його результатах складаються таблиці поправок, графіки поправок або приводяться поправочні формули;

б) метод заміщення – коли вимірювана величина періодично заміщується зразковою мірою;

в) метод дворазового вимірювання полягає у такій постановці експерименту, при якому похибка, викликана будь-якою причиною, входить в результати експерименту то зі знаком "плюс", то зі знаком "мінус". Тоді результуюча похибка дорівнює нулю.

2) Змінні похибки

Використовують метод симетричних спостережень – він полягає у тому, що беруть напіврізницю першого  $A_1$  та останнього  $A_N$  спостереження, ділять на кількість вимірів  $n$  без одиниці, та додають цю величину  $\Delta S$  до результату другого вимірювання, подвоєну величину  $2 \cdot \Delta S$  – до результату третього і так далі. Для змінних похибок також будують поправочні графіки й таблиці

$$\Delta S = \frac{A_N - A_1}{2 \cdot (n - 1)}$$

**Випадкові похибки** змінюються в часі нерегулярно, непередбачувано, а їх майбутні значення можна прогнозувати лише з певною часткою ймовірності. Результати вимірювань, що спотворені випадковими

похибками, змінюються хаотично. На практиці буває важко відразу відрізнити випадкову похибку від змінної систематичної, наприклад, періодичної.

Незважаючи на хаотичність зміни чергових значень випадкових похибок, для них характерна стабільність певних (усереднених в часі) властивостей, наприклад, частота появи тих чи інших значень, середнього та середньоквадратичного відхилень від середнього значення, статистичного взаємозв'язку між значеннями через певний інтервал часу тощо. Такі властивості випадкових похибок використовують для зменшення їх впливу на результат вимірювання. Абсолютні значення і знак випадкових похибок підпорядковуються вірогідносним законам.

Однією з найважливіших характеристик випадкової похибки є її густина (щільність) розподілу значень. Це функція, яка характеризує частоту появи тих чи інших значень похибки.

З теорії ймовірності відомі наступні стандартні апроксимації законів розподілення густин вірогідностей:

1) **Рівномірне розподілення** - характеризується таким графіком розподілення густини вірогідностей:

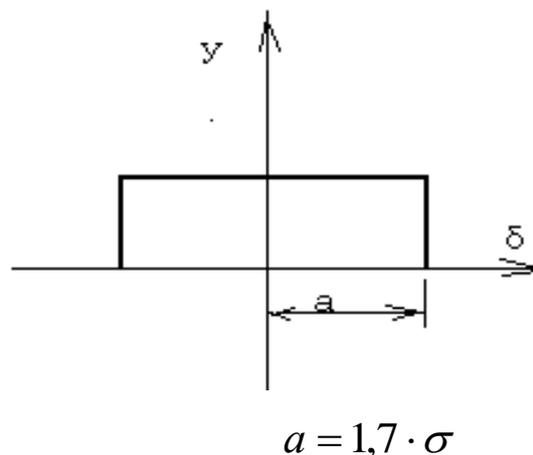


Рис. 1.8 Рівномірне розподілення

$\delta$  – величина випадкової похибки;  $\sigma$  — середньоквадратичне відхилення ряду спостережень;  $\gamma$  – густина вірогідності або частота, з якою зустрічається дана величина похибки

Для рівномірного розподілення (рис. 1.8) характерна однакова частість появи різних похибок в діапазоні від  $-a$  до  $+a$ . Ніякі значення похибки не мають переваги над іншими.

2) **Трикутне розподілення** (закон розподілення Сімпсона).

Крива його розподілу має вигляд рівнобічного трикутника (рис. 1.9). Розподілення Сімпсона зустрічається при додаванні двох випадкових величин, які підпорядковані закону рівної ймовірності з однаковими параметрами.

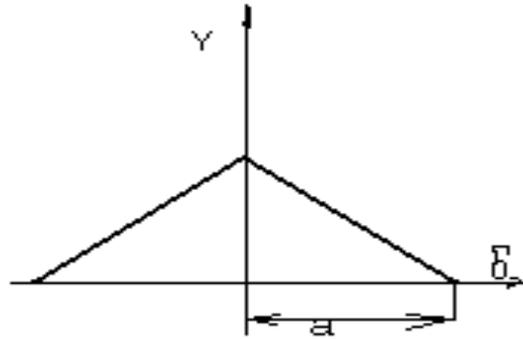


Рис. 1.9 Трикутне розподілення  
 $a = 2.4 \cdot \sigma$

Розподілення Сімпсона симетричне. Коефіцієнт відносної асиметрії при співпадінні осі симетрії розподілення Сімпсона із серединою поля допуска рівний нулю.

**3) Нормальне розподілення** (розподілення Гауса).

Розподілення базується на двох аксіомах Гауса:

– При дуже великій кількості вимірювань, випадкові похибки, рівні за величиною та протилежні за знаком, зустрічаються однаково часто.

– Частіше усього зустрічаються малі похибки, а великі зустрічаються тим рідше, чим вони більше.

Нормальний закон розподілення описується виразом:

$$Y = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{\delta^2}{2 \cdot \sigma^2}}$$

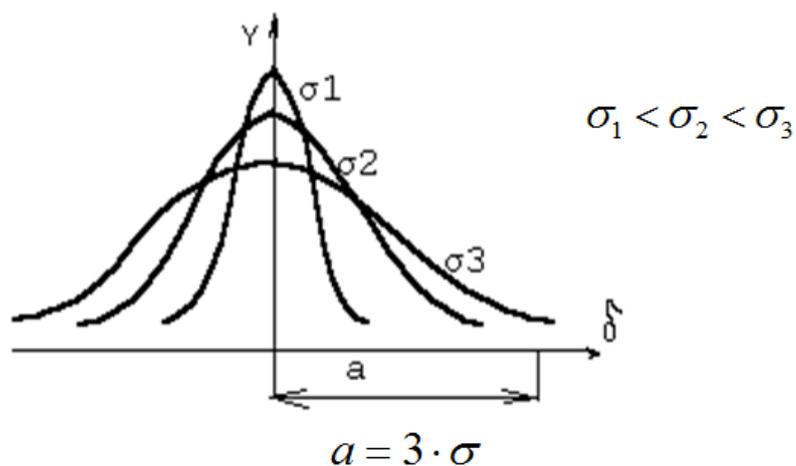


Рис.1.10 Нормальне розподілення

Випадкова похибка  $\delta$  завжди являє собою різницю між результатом одиночного вимірювання і математичним очікуванням результату:

$$\delta = x_i - M[x] .$$

Величина  $M[x]$  характеризує середнє значення, навколо якого групуються можливі значення похибки (в цьому випадку воно називається математичним очікуванням похибки, а практично, це середнє значення похибки).

Випадкова похибка також характеризується дисперсією або розсіюванням результатів навколо середнього значення:

$$D[x] = M[x_i - M[x]]^2 .$$

Іншою характеристикою є середньоквадратичне відхилення (СКВ):

$$\sigma = \sqrt{D[X]} .$$

СКВ характеризує ширину розсіювання значень похибки навколо середнього значення (у цьому випадку його називають стандартним відхиленням або середньоквадратичним відхиленням. При збільшенні  $\sigma$  густина розподілу стає розтягнутою відносно вертикальної осі (більше розсіювання похибок), а при зменшенні  $\sigma$  – вона стягується (менше розсіювання похибок). Густина так званого стандартного нормального розподілу протабульована і її значення можна знайти у довідковій літературі з теорії імовірності та математичної статистики.

Оцінку результату вимірювання виконують за **методом точкових та інтервальних оцінок**.

Нехай маємо ряд результатів вимірювань:  $X_1, X_2, \dots, X_i$ . Параметрами, що оцінюються, є математичне очікування результатів та дисперсія.

Оцінка результату (точкова  $a^*$ ) зветься **точковою**, якщо вона виявляється одним числом. Така оцінка сама є випадковою величиною зі своїм розподіленням і підпорядковується вірогідносним законам.

Точкові оцінки математичного очікування та дисперсії знаходять за формулами:

$$M^*[x] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n X_i ,$$

$$D^*[x] = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^n [X_i - M^*[x]]^2 .$$

тут  $N$  – кількість вимірів (знак \* позначає точкову оцінку).

Існує також **інтервальна** оцінка результатів вимірювання. Сутність методу інтервальної оцінки полягає в знаходженні інтервала ( який зветься

довірчим), у межах якого з визначеною вірогідністю (яка також зветься довірчою) знаходиться справжнє значення параметра, що оцінюється.

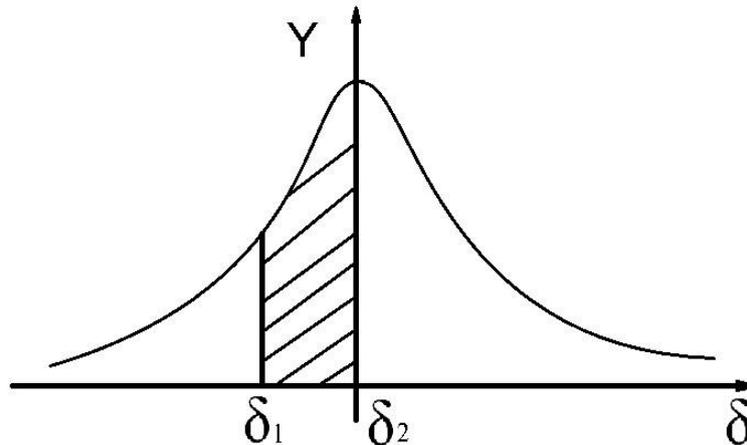


Рис.1.11 Інтервальна оцінка результатів вимірювання

Вірогідність (  $P$  ) появи похибки із значеннями від  $\delta_1$  до  $\delta_2$  визначається площею ділянки, яка залежить від висоти інтервалу, тобто кількості появи похибок  $Y$  та ширини від  $\delta_1$  до  $\delta_2$

Для нормального закону розподілення вірогідність появи похибки обчислюється як визначений інтеграл від функції  $Y$  :

$$P(\delta_1 < \delta < \delta_2) = \int_{\delta_1}^{\delta_2} Y(\delta) \cdot d\delta$$

Значення цього інтеграла для усіх величин  $\delta$  є стандартними і зведені в спеціальні таблиці.

На практиці ширину довірчого інтервалу  $\Delta A$  прийнято нормувати в значеннях  $\sigma$ :

$$\Delta A = \pm K \cdot \sigma,$$

де  $K = 1, 2, 3, \dots, n$ .

Так як на практиці похибки величиною  $> 3 \sigma$  малоімовірні, звичайно приймають ширину довірчого інтервалу  $\Delta A = \pm 3 \cdot \sigma$  (правило трьох сигм). При цьому  $P = 0,997$ , тобто тільки у трьох випадках із 1000 вимірювань значення похибки вийдуть за межі довірчого інтервалу.

Ця формула справедлива, якщо кількість вимірювань більше тридцяти. Якщо  $n < 30$ , то для оцінювання результатів вимірювання користуються розподіленням Стьюдента :

$$\Delta A = \pm t_{np} \cdot \sigma,$$

$n$  – кількість вимірювань;

$P$  – потрібна вірогідність.

Значення коефіцієнта Стьюдента  $t_{np}$  розраховані експериментально і також зведені в спеціальні таблиці.

## 1.9 Обробка результатів вимірювань

### 1.9.1 Порядок обробки результатів при прямих вимірюваннях

Нехай маємо ряд  $n$  результатів вимірювання  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . Існує стандартна методика обробки багатократних спостережень. Для отримання результату необхідно виконати ряд операцій:

1) Записати результати вимірювань з урахуванням поправок на систематичні похибки, визначеним по формулах або таблицях поправок.

2) Визначити середнє арифметичне результатів вимірів:

$$X_{cp} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i.$$

3) Визначити відхилення кожного вимірювання від середнього, тобто величину випадкової похибки:

$$\delta_i = X_i - X_{cp}.$$

4) Визначити квадрати похибок  $\delta_i^2$ .

5) Визначити суму квадратів похибок  $\sum_{i=1}^n \delta_i^2$ .

6) Визначити середньоквадратичне відхилення  $n$  результатів вимірювання

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n \delta_i^2}.$$

7) Здійснити по одному зі стандартних методів (наприклад, методу Пірсона) перевірку гіпотези про нормальність закону розподілення.

8) По заданій довірчій вірогідності та кількості вимірювань визначити коефіцієнт Стьюдента  $t_{np}$ , а також значення довірчого інтервалу :

$$\Delta A = t_{np} \cdot \sigma.$$

9) Записати кінцевий результат у вигляді :

$$X = X_{cp} \pm \Delta A.$$

Значення  $X_{cp}$  та  $\Delta A$  зазвичай округляють до двох знаків після коми. Результат записується у круглих дужках, після них проставляються

одиниці вимірювання. Потім вказується величина довірчої ймовірності. Наприклад:

$$U_0 = (15,37 \pm 0,05)V, \quad (P = 0,9).$$

### 1.9.2 Порядок обробки результатів при побічних вимірюваннях

При побічних вимірюваннях результат знаходять шляхом обчислення відомої аналітичної залежності між невідомою величиною та величинами, які одержані при прямих вимірюваннях.

Припустимо, що результат побічного вимірювання представлений формулою :

$$A = A_1^{K_1} \cdot A_2^{K_2} \cdot A_3^{K_3} \cdot \dots \cdot A_n^{K_n},$$

де  $A_1, \dots, A_n$  – результати прямих вимірювань;

$K_1, \dots, K_n$  – показники ступеня, в яких вони входять у формулу. Показники можуть бути додатніми, від'ємними, цілими та дробовими.

Прологарифмуємо рівняння:

$$\ln A = \ln(A_1^{K_1} \cdot A_2^{K_2} \cdot \dots \cdot A_n^{K_n}) = K_1 \cdot \ln A_1 + K_2 \cdot \ln A_2 + \dots + K_n \cdot \ln A_n$$

Продиференціюємо результат:

$$\frac{dA}{A} = K_1 \cdot \frac{dA_1}{A_1} + K_2 \cdot \frac{dA_2}{A_2} + \dots + K_n \cdot \frac{dA_n}{A_n}.$$

Заміняємо диференціал  $dA$  малим приростом  $\Delta A$ :

$$\frac{\Delta A}{A} = K_1 \cdot \frac{\Delta A_1}{A_1} + K_2 \cdot \frac{\Delta A_2}{A_2} + \dots + K_n \cdot \frac{\Delta A_n}{A_n}.$$

Величина  $\frac{\Delta A}{A} = \delta$ , тобто дорівнює величині відносної похибки:

$$\delta_A = K_1 \cdot \delta_{A_1} + K_2 \cdot \delta_{A_2} + \dots + K_n \cdot \delta_{A_n}$$

Відносні похибки можуть бути більшими та меншими від нуля, тому для знаходження відносної максимальної похибки  $\delta_A$  складові беремо по модулю:

$$\delta_A = |K_1 \cdot \delta_{A_1}| + |K_2 \cdot \delta_{A_2}| + \dots + |K_n \cdot \delta_{A_n}|.$$

Якщо ж результати побічних вимірювань знаходяться в залежності вигляду:

$$A = A_1^{K1} + A_2^{K2} + \dots + A_n^{Kn} ,$$

То можна за аналогічною методою дістати вираз вигляду для випадкових похибок вигляду:

$$\delta_A = \left| \frac{A_1^{K1}}{A} \cdot \delta_{A1} \right| + \left| \frac{A_2^{K2}}{A} \cdot \delta_{A2} \right| + \dots + \left| \frac{A_n^{Kn}}{A} \cdot \delta_{An} \right| .$$

### 1.9.3 Загальний порядок додавання похибок

У відповідності зі стандартом “Нормуємі метрологічні характеристики засобів вимірювань” усі похибки додаються наступним чином: окремо додаються систематичні та випадкові похибки і окремо мультиплікативні і адитивні похибки.

Таким чином, порядок додавання похибок наступний:

а) відбувається підготовка до додавання, при цьому похибки поділяються на систематичні та випадкові складові, адитивні та мультиплікативні; для випадкової складової похибки знаходять математичне очікування, СКВ та закон розподілення; визначають кореляційні зв'язки між складовими похибки;

б) відбувається додавання систематичних похибок усього приладу вцілому;

в) відбувається додавання випадкових складових похибки усього приладу вцілому, при цьому додають усі математичні очікування випадкових похибок і отриманий додаток математичного очікування додають до систематичної похибки (розглядаючи останню як випадкову похибку) і, таким чином, отримують систематичну складову сумарної похибки засобу вимірювання; знаходять значення СКВ випадкової складової похибки та закон розподілення сумарної випадкової похибки;

г) визначаються межі, в яких з довірчою вірогідністю

$$P(-\Delta X_{\Gamma} < X < \Delta X_{\Gamma} )$$

знаходяться значення помилки  $\Delta X$  даного конкретного засобу вимірювання на базі наступної нерівності:

$$M[\Delta X] - k \cdot \sigma(\Delta X) < \Delta X < M[\Delta X] + k \cdot \sigma(\Delta X)$$

при заданих  $M[\Delta X]$ ,  $\sigma(\Delta X)$ , де  $k$  – коефіцієнт, який визначається довірчою вірогідністю та виглядом додаткового закону розподілення;

д) записують результат вимірювання у відповідності зі стандартом.

## 1.10 Методи одержання графічних та аналітичних залежностей за результатами експериментів

### 1.10.1 Методи одержання графічних залежностей

Для побудови графічної залежності будемо розглядати результати однофакторних експериментів.

**Однофакторним** називається експеримент, коли величина  $Y$ , що досліджується, пов'язана із однією незалежною змінною  $X$  функціональною залежністю виду  $Y = f(X)$ .

Нехай маємо результати експерименту вигляду:

<b>X</b>	$X_1$	$X_2$	$X_3$	...	$X_n$
<b>Y</b>	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	...	$Y_n$

Недоліками даних результатів є те, що значення як  $X_i$ , так і  $Y_i$  підпадають під вплив випадкових похибок, до того ж і  $X$  і  $Y$  визначені через проміжки. Тому для забезпечення можливості визначення величин  $Y$  у всьому діапазоні вимірювань аргумента  $X$  будуються експериментальні графіки, які відображують неперервну функцію  $Y = f(X)$  із заданою точністю.

Розглянемо типові методи побудови графічних залежностей, які найбільш точно відповідають результатам проведеного експерименту.

#### 1) Метод рівних відрізків

За цим методом на координатну площину наносяться точки  $X_i, Y_i$  у відповідності із результатами експерименту. Потім одержані точки з'єднують прямими лініями; виходить ломана лінія. Крива (або пряма графіку) проводиться таким чином, щоб сума відрізків ломаної лінії, розташованої вище кривої, дорівнювала б сумі відрізків, які розташовані нижче кривої (рис.1.12).

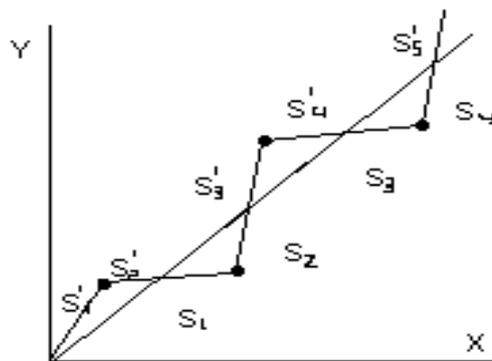


Рис.1.12 Метод рівних відрізків

$$\sum_{i=1}^n S_i = \sum_{i=1}^n S'_i$$

## 2) Метод прямокутників

Спочатку на координатну площину наносяться точки  $X_i, Y_i$  як і у першому випадку, але біля кожної точки будується прямокутник із сторонами  $2\sigma_x$  та  $2\sigma_y$ , де  $\sigma_x$  та  $\sigma_y$  – середньоквадратичні похибки результату вимірювань значень  $X_i$  та  $Y_i$ . Побудована крива (або пряма) повинна торкнутися, або пройти через усі прямокутники. Таким чином, відстань від кривої до точки не перевищить величини середньоквадратичного відхилення  $\sigma$  (рис. 1.13).

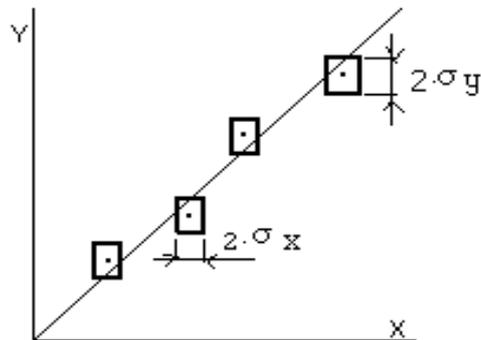


Рис.1.13 Метод прямокутників

## 3) Метод найменших квадратів

Цей метод найбільш точний, він легко програмується. За цим методом операції, які пов'язані із нанесенням експериментальних точок  $X_i, Y_i$  на поле графіка, залишаються тими ж самими, але результуюча крива проводиться на кресленні таким чином, щоб дотримуватися рівності:

$$\sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \min$$

де  $\delta_i$  – ординати відхилень від точки до кривої  $Y = f(x)$ . Таким чином, результуюча похибка  $\delta$  буде мінімальною.

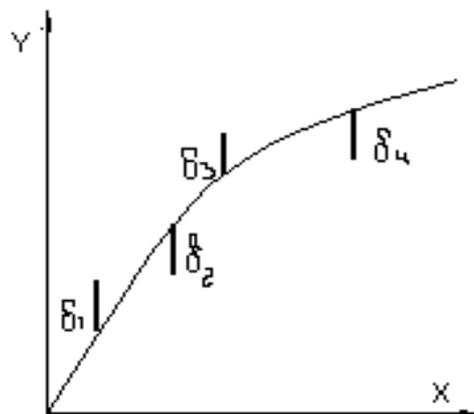


Рис.1.14 Метод найменших квадратів

### 1.10.2 Методи одержання аналітичних залежностей

Розглянемо техніку одержання аналітичних залежностей по експериментальним даним на базі побудованих графіків. Вважаємо, що керована величина  $Y$  пов'язана з однією незалежною змінною величиною  $X$  функціональною залежністю виду

$$Y = f(X).$$

По закінченні експеримента, що проводився, отримуємо таблицю, яка має для визначених значень величини  $X_i$ , що завдавалися експериментатором, визначені відповідні значення  $Y_i$ .

<b>X</b>	$X_1$	$X_2$	$X_3$	...	$X_n$
<b>Y</b>	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	...	$Y_n$

Одержані відліки відмічають на графіку відповідно до обраного масштабу по осях  $X$  та  $Y$ , в результаті чого отримують „поле” точок  $X_i, Y_i$ , як показано на рис. 1.15.

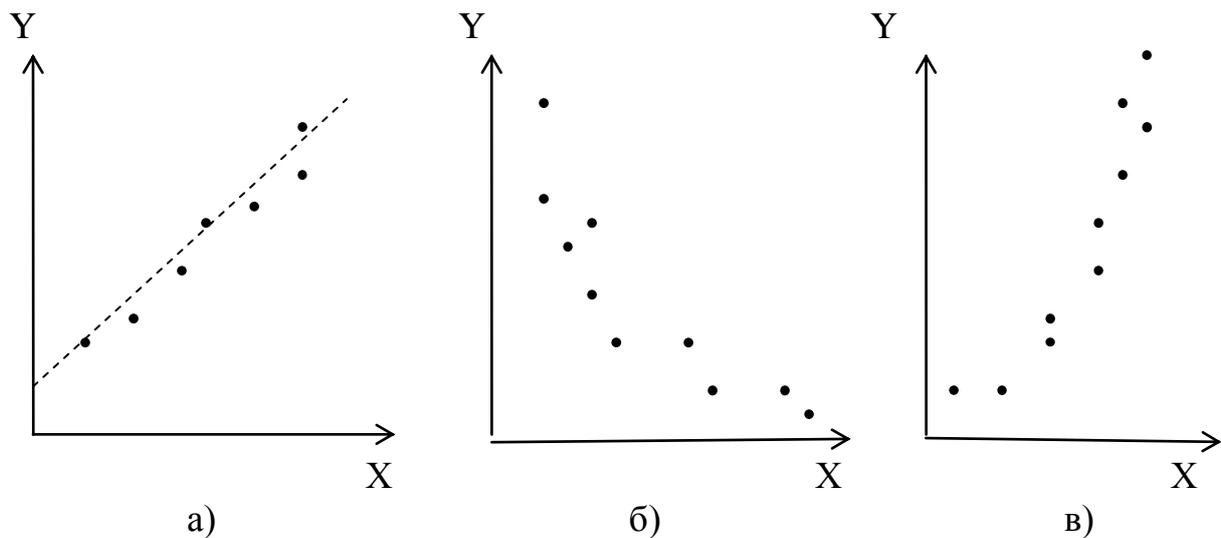


Рис. 1.15 Графіки залежностей

Попередньо аналізуючи вигляд отриманих „полів” точок, можна зробити припущення про можливий характер залежності  $Y = f(X)$ . Наприклад, за характером розташування точок на графіку рис.1.15,а можна припустити, що шукане рівняння повинне мати вигляд прямої

$$Y = A + BX,$$

де  $A$  і  $B$  – сталі невідомі коефіцієнти.

На рис. 1.15,б графік схожий на гіперболу, рівняння якої має вид

$$Y = \frac{A + BX}{C + DX},$$

де А, В, С, D – невідомі сталі коефіцієнти.

У випадку рис. 1.15,в крива схожа на параболу, її рівняння має вигляд

$$Y = A + BX^2.$$

Розглянемо техніку одержання аналітичних залежностей по експериментальних даних на основі графіка рис. 1.15,а, тобто в припущенні лінійної залежності виду  $Y = A + BX$ .

Якби експериментальні дані не були викривлені присутністю багатьох похибок, окремі точки точно би «вклалися» у рівняння, а відхилення  $\delta_i = Y_i - (A + BX_i)$  були б рівні нулю. Тоді для запису аналітичного виразу достатньо було б двох точок, наприклад  $X_1, Y_1$  та  $X_i, Y_i$ . Але ж  $\delta_i \neq 0$ , і для отримання кінцевого, найбільш точного, рівняння треба використовувати всі дані.

Застосовуючи принцип Лежандра, можна стверджувати, що найбільш достовірним й прийнятним буде рівняння  $Y = f(X)$  з тими значеннями А і В, при яких сума S квадратів різниць приймає найменше значення:

$$S = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [Y_i - (A + BX_i)]^2 = \min . \quad (*)$$

Найменшого значення сума S досягне при таких А і В, при яких вірні рівності

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial A} = 0 \\ \frac{\partial S}{\partial B} = 0 \end{cases} .$$

Розв'язуючи дану систему відносно А і В, можна знайти такі їх значення  $A_0$  та  $B_0$ , для яких величина S (сума квадратів різниць) буде мінімальною. Підставляючи ці значення в початкове рівняння (\*), маємо нову систему рівнянь, по якій можна визначити остаточні різниці

$$\begin{aligned} \delta_{01} &= Y_1 - (A_0 + B_0 \cdot X_1) \\ \delta_{02} &= Y_2 - (A_0 + B_0 \cdot X_2) \\ &\dots\dots\dots \\ \delta_{0i} &= Y_i - (A_0 + B_0 \cdot X_i) \end{aligned} .$$

По значеннях та знаках остаточних різниць  $\delta_{oi}$  судять про прийнятливості припущеного виду функції  $Y = f(X)$ , використовуючи наступні правила:

1. Якщо всі остаточні різниці  $|\delta_{oi}|$  не перебільшують величини прийнятного значення межі припустимої похибки  $\Delta_p$ , то отримана аналітична залежність з даними значеннями А і В вважається прийнятною.

2. Якщо деякі окремі значення  $|\delta_{oi}| > \Delta_p$ , але знаки чергуються, то таке рівняння може вважатися прийнятним.

3. Якщо окремі значення  $|\delta_{oi}| > \Delta_p$  і знаки чергуються групами, то таке рівняння непридатне і потрібно шукати новий вираз із членами більш високого порядку.

4. Якщо всі остаточні різниці  $|\delta_{oi}|$  більші за межу припустимої похибки, то отримана залежність вважається непридатною і вноситься пропозиція про новий вигляд початкового рівняння, тобто шукається рівняння нової конструкції (степеневе, показникове тощо).

### 1.11 Система експлуатації та ремонту вимірювальної техніки

Сучасні види вимірювальної техніки володіють великими спроможностями, мають високий рівень автоматизації та здатні вирішувати комплексні задачі в єдиній вимірювальній системі при керуванні від мікропроцесорних засобів. Висока ефективність використання засобів вимірювань й контролю, як і будь-якої сучасної техніки, забезпечується якісним плануванням і організацією робіт по їх застосуванню, технічному обслуговуванню та відновленню.

Заходи, які виконуються в процесі експлуатації вимірювальної техніки, поділяються на дві групи:

- основні заходи – використання за призначенням;
- допоміжні заходи – забезпечують підготовку до застосування та підтримку у справному та готовому до використання стані всіх вимірювальних засобів.

**Використання за призначенням** передбачає вибір засобів вимірювання (ЗВ), формування схеми вимірювання, проведення вимірювань, обробку та оцінку одержаних результатів. Як правило, вказані задачі знаходять відображення в експлуатаційно-технічній, методичній та іншій документації.

Робота починається після введення засобу вимірювання в експлуатацію і полягає в проведенні підготовчих робіт: контроль і приймання ЗВ, перевірка на відповідність встановленим вимогам, закріплення за відповідальними особами. Підготовчі роботи можуть включати обладнання робочих місць й приміщень, підготовку робітників

до експлуатації ЗВ, заказ та отримання метрологічного та діагностичного обладнання, запасного інструменту, тощо.

Показниками та якісними ознаками, які визначають **технічний стан ЗВ**, виявляються :

- комплектність;
- зовнішній вигляд;
- ресурс роботи;
- запас часу до періодичної повірки;
- правильність функціонування;
- наявність несправностей;
- цілість перевірювальних клейм ;
- стан експлуатаційної документації.

Використовувати можна лише ті прилади, які знаходяться в справньому стані, мають відбитки повірочних клейм та відмітку в документації про проходження чергової повірки.

Фізичні величини технічних пристроїв необхідно вимірювати лише тими засобами, котрі вказані в експлуатаційній документації на ці об'єкти або в стандартних методиках. Якщо в експлуатаційній документації або в методиках не визначені засоби вимірювань потрібних параметрів, то їх вибирають із врахуванням потрібної точності й умов проведення вимірювань.

Необхідно провести аналіз умов, в яких буде експлуатуватися даний засіб вимірювання, при цьому враховуються: рівні механічних навантажень ( вібрація, шум, лінійні прискорення і т.п. ); кліматичні умови (температура, вологість, тиск і т.п.); наявність або відсутність активно-руйнівного середовища (агресивні гази, рідини, грибки); наявність електричних й магнітних полів та інших завод. Рівні даних факторів не повинні перебільшувати величин, які вказані в технічній документації.

При підготовці ЗВ до роботи необхідно:

- провести зовнішній огляд;
- встановити захисне заземлення;
- встановити прилад в правильне робоче положення;
- встановити робочі органи в початкове положення;
- перевірити функціонування приладу у відповідності з інструкцією по експлуатації;
- експлуатувати прилад у відповідності з інструкцією.

**До допоміжних заходів** відносяться: технічне обслуговування, повірка, ремонт, транспортування й зберігання, категорювання і списування, ведення обліку та експлуатаційної документації.

### **1) Технічне обслуговування приладів (ТО)**

Періодичність, об'єм і порядок проведення технічного обслуговування для приладів, які використовуються автономно, визначаються експлуатаційною документацією на ці прилади, а для приладів, які

використовуються у складі установки – в експлуатаційній документації на цю установку. В основному, ТО – це комплекс найпростіших операцій, які необхідно регулярно проводити з приладом для його підтримання у робочому стані (чистка контактів, регулювання зажимів та ін.)

При ТО не припускається порушення пломб та відбитків клейм, якщо це не передбачено експлуатаційною документацією.

Розрізняють ТО по **встановленному регламенту та поточному стану**.

ТО по встановленному регламенту залежно від важливості приладу та частоти його використання, може бути щоденним, щомісячним, щоквартальним та щорічним. ТО по поточному стану проводиться у випадку необхідності. Результати проведення ТО обов'язково заносяться в експлуатаційну документацію.

## **2) Повірка**

Повірка приладів регламентується Технічним регламентом України й розповсюджується на засоби вимірювальної техніки, які увійшли в Перелік категорій законодавчо регулюємих засобів вимірювальної техніки, що підлягають періодичній повірці, затверджений постановою Кабінету Міністрів України № 374 від 04.06.2015 р.

Для приладів, які підлягають обов'язковій повірці, частота проведення перевірок встановлюється головними метрологами або директором підприємства.

Повірку засобів вимірювання здійснюють для визначення похибок цих засобів та встановлення їх придатності для застосування за призначенням.

Державна повірка здійснюється органами державної метрологічної служби, що мають відповідний на це дозвіл. Такий дозвіл видається їм, якщо вони мають умови, необхідні для забезпечення належної якості повірки – засоби, кадри, нормативні документи, приміщення. До виконання повірки засобів вимірювання допускаються особи, які пройшли спеціальне навчання і мають відповідний сертифікат.

Результати повірки оформляють стандартним протоколом, в який вносять формальні дані (назва, тип, завод-виробник, рік випуску, заводський номер), а також номінальні характеристики засобу вимірювання, результати вимірювань при повірці, висновки про придатність чи непридатність засобу вимірювань для застосування його за призначенням.

Повірка засобів, що не підлягають державній повірці, здійснюється акредитованими метрологічними службами підприємств.

Тривалість міжповірочних інтервалів визначається фактичною надійністю засоба вимірювання, умовами експлуатації, інтенсивністю його використання, а також важливістю результатів вимірювання в даному технологічному або науковому процесі.

Для засобів вимірювання, які знаходяться на збереганні, також обов'язково проведення ТО та перевірки. Тривалість міжповірного інтервала не повинна перевищувати гарантійного терміну служби.

### **3) Ремонт**

Під ремонтом розуміють комплекс операцій по відновленню справності засобів вимірювання, а також по відновленню ресурсу засобу вимірювання або його частин.

Залежно від характеру відмови, ступеня напрацювання приладу та трудомісткості відновлювальних операцій розрізняють **види ремонту**: поточний, середній та капітальний ремонт.

До **поточного ремонту** відносять роботи, що пов'язані з усуненням окремих несправностей, які не потребують складного діагностичного технічного обладнання та високої кваліфікації персоналу.

До **середнього ремонту** відносять роботи, коли oprіч вищеперерахованих операцій виконуються операції по заміні або відновленню елементів та їх складових частин, роботи по частковому відновленню ресурсу прилада, контроль технічного стану усіх складових частин приладу та комплексне регулювання і настроювання прилада після ремонту.

При **капітальному ремонті** ресурс повністю або майже повністю відновлюється, для цього здійснюється повне розбирання приладу, оцінка стану кожної деталі, усунення усіх несправностей, заміна або відновлення всіх зношених частин та деталей, відновлення гальванічних покриттів, комплексне настроювання та регулювання приладу.

Після капітального ремонту обов'язково проводять випробування прилада.

У багатьох випадках проведення капітального ремонту є економічно не вигідним, так як витрати на його проведення бувають більшими за вартість нового приладу, а якість відремонтованого ЗВ значно поступається новому. Капітальний ремонт проводять лише у випадках гострого дефіциту або індивідуального виготовлення засобів вимірювань.

На час та вартість ремонту впливають різні **методи ремонту**.

**Детальний метод** – заміна окремих деталей, які відмовили (метод потребує високої кваліфікації персоналу, значних працевитрат, складного діагностичного обладнання).

**Агрегатний метод** – проводиться заміна окремих вузлів, блоків або агрегатів новими або відремонтованими. Переваги цього методу: швидкість проведення ремонту, невисокі вимоги до кваліфікації ремонтного персоналу. Недоліки: дороговизна методу (вартість у 10 разів більше, ніж при детальному) і необхідність блочно-модульного побудування прилада. Звичайно агрегатний ремонт виконується у два етапи: спочатку на місцях проводиться заміна агрегата чи блока, а потім

здійснюється ремонт агрегатів у спецмайстернях, де є спеціалізоване обладнання.

#### **4) Транспортування**

Транспортування приладів спряжене з дією багатьох зовнішніх факторів, характеристики яких виходять за межі робочих умов експлуатації (удари, вібрація, підвищена вологість, пил та ін.).

Для запобігання наслідків транспортування потрібно дотримуватись деяких вимог:

- при транспортуванні робочі органи приладів устанавлюються в положенні, яке визначене інструкцією по експлуатації;
- ряд приладів перевозиться в заарретованому стані;
- у приладів магнітоелектричної системи замикають вихідні клеми; для багатограничних приладів вони замикаються на нижній межі;
- транспортування як електромеханічних, так й цифрових приладів повинно здійснюватися у штатній упаковці, зразкові прилади повинні транспортуватися у тарі із амортизаторами, особливу увагу приділяють укладанню та кріпленню нормальних елементів.

#### **5) Зберігання приладів**

Усі прилади повинні зберігатися у приміщеннях з температурою від +10 до +35°C і вологістю не більше 80%.

Загальні правила зберігання:

- прилади зберігають окремо від акумуляторів, кислот, луг;
- батареї та нормальні елементи загортають у пергаментний папір та зберігають разом з приладами;
- прилади з постійними магнітами та намагніченими елементами не можна зберігати на залізних і сталевих полицях та біля масивних залізних або сталевих предметів;
- прилади, які мають аррієтири, зберігаються у заарретованому стані;
- вихідні клеми магнітоелектричних приладів замикаються;
- акумулятори зберігаються в спеціальних окремих приміщеннях;
- прилади в упаковці зберігаються у два ряди по висоті, без упаковки тільки у один ряд.

Особливості зберігання окремих типів приладів вказуються в інструкції по експлуатації.

Під час зберігання прилади повинні підлягати оглядам, технічному обслуговуванню та повірці.

#### **6) Категорування та списування**

Категорія засобу вимірювання – це умовна характеристика, яка визначається залежно від технічного стану та витрати ресурсу.

Всі засоби вимірювання поділяються на чотири категорії:

*1 категорія* – нові прилади, які не були в експлуатації та гарантійні терміни яких не скінчилися;

2 *категорія* – справні прилади, які були у експлуатації, або прилади, які не були у експлуатації, але гарантійні терміни яких скінчилися;

3 *категорія* – несправні прилади, які підлягають ремонту;

4 *категорія* – несправні прилади, які не підлягають ремонту, або їх ремонт не буде доцільним ( з економічних міркувань), а також морально застарілі .

Кожна зміна категорії приладу оформлюється відповідними документами. **Списуванню** підлягають прилади лише 4 категорії.

#### 7) **Ведення обліку та експлуатаційної документації**

До експлуатаційних документів відносяться: інструкція по експлуатації, технічний опис, паспорт або формуляр та відомість ЗІН (запас інструментальних належностей) .

Основним документом, що відображає технічний стан засобів вимірювань в процесі експлуатації є формуляр. В ньому обов'язково повинні вестись такі графи:

- закріплення за відповідальними особами;
- роботи по технічному обслуговуванню та постановці на зберігання;
- проходження повірки;
- напрацьованість приладу в розділі “Облік годин роботи”;
- облік несправностей.

## 2. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ

### 2.1. Будова і основні системи електромеханічних вимірювальних приладів

#### 2.1.1 Загальні відомості

Аналоговим називають прилад, в якому візуальний сигнал вимірювальної інформації подається за допомогою вказівника та шкали. Покази аналогового приладу є функцією вимірюваної величини.

Серед аналогових приладів велику групу становлять електромеханічні вимірювальні прилади (ЕМВП), принцип дії яких полягає у перетворенні електромагнітної енергії вхідного сигналу в механічну енергію переміщення рухомої частини засобу вимірювань. Прилад складається з вимірювального кола (ВК), вимірювального механізму (ВМ) та показувального пристрою (шкали).

Вимірювальне коло служить для перетворення вимірюваної електричної величини  $X$  (напруги, струму, потужності тощо) в деяку проміжну електричну величину (струм чи напругу), функціонально зв'язану з вимірюваною величиною і безпосередньо діючу на ВМ.

Вимірювальний механізм, що складається з рухомої і нерухомої частин, призначений для перетворення електромагнітної енергії величини в механічну енергію, необхідну для переміщення рухомої частини. Під дією цієї величини у ВМ виникає обертальний момент, значення якого

$$M_{об} = \frac{dW_e}{d\alpha},$$

де  $M_{об}$  – обертальний момент;

$\alpha$  — кут обертання рухомої частини;

$W_e$  – повна енергія електромагнітного поля, зосереджена у вимірювальному механізмі.

Для того, щоб кут повороту  $\alpha$  рухомої частини був однозначно пов'язаним зі значенням вимірюваної величини, в приладі під час повороту рухомої частини створюється протидіючий момент, який спрямований назустріч обертальному і залежить від кута повороту.

Протидіючий момент може бути організований двома способами :

а) **механічний** протидіючий момент – коли протидія досягається за допомогою спеціальних елементів, які при обертанні рухомої частини закручуються. В механізмах з рухомою частиною на кернових опорах протидіючий момент створюється за допомогою спіральних пружин, а з рухомою частиною на розтяжках — за рахунок пружних властивостей розтяжок. Використання розтяжок зменшує варіацію показів, при цьому також полегшується рухома частина ВМ, що сприяє підвищенню

чутливості механізму, але при цьому зменшується його стійкість до механічних вібрацій.

Рівняння протидіючого моменту :

$$M_{пр} = W_n \cdot \alpha ,$$

де  $W_n$  – питомий протидіючий момент;  
 $\alpha$  — кут відхилення рухомої частини.

б) **електричний** протидіючий момент – коли в систему введена додаткова рамка (обмотка), і протидія досягається тим же методом, що й обертання. У так званих **логометричних ВМ** є дві закріплені під деяким кутом рамки, в яких, при протіканні через них електричного струму, виникають два обертальні моменти, що спрямовані назустріч один одному. Перший момент можна розглядати як обертальний, інший — як протидіючий. Відхилення рухомої частини логометра пропорційне відношенню електричних струмів в рамках. Струми до рухомих рамок логометричного ВМ підводяться за допомогою так званих безмоментних струмопідводів — тонких металевих стрічок з нехтовно малим протидіючим моментом. Тому його рухома частина за відсутності струмів у рамках може займати будь-яке положення.

При досягненні рівноваги обертального та протидіючого моментів стрілка встановлюється в нерухоме положення:

$$M_{об} = M_{пр} .$$

Для швидкого **заспокоювання** стрілки в ЕМВП застосовуються повітряні, рідинні та магнітоіндукційні заспокоювачі.

Розглянемо принцип дії *повітряного* заспокоювача крильчатого типу. Він представляє собою об'ємний сектор, всередині якого пересувається прапорець, що з'єднаний із стрілкою покажчика. Внаслідок виникнення перепаду тиску з одного чи іншого боку прапорця при коливанні стрілки, ці коливання швидко гасяться.

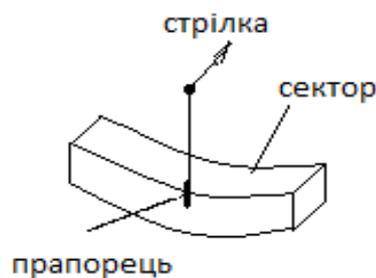


Рис. 2.1 Повітряний заспокоювач

*Рідинний* заспокоювач має подібну конструкцію, але сектор заповнюється в'язкою рідиною. При коливанні рухомої частини механізму

у рідині, разом із нею коливається шар рідини, який безпосередньо стикається з нею, а більш віддалені шари лишаються у спокої. Між різними шарами виникає тертя, на яке втрачається небажана кінетична енергія коливання рухомої частини, тобто створюється заспокоювання.

*Магнітоіндукційне* заспокоювання утворюється при русі металевих деталей рухомої частини в полі постійного магніту, який додатково вноситься в конструкцію. При цьому, в результаті взаємодії вихрових струмів, які виникають у металевих частинах, та магнітного поля магніту, створюється гальмівний момент. Магнітоелектричні заспокоювачі використовуються в тих приладах, в яких поле постійного магніта не впливає на покази прилада.

Залежно від способу подання візуального сигналу вимірювальної інформації вимірювальні прилади поділяють на показувальні та реєструвальні. В перших сигнал вимірювальної інформації подається у вигляді відхилення стрілки (вказівника) на шкалі, градуйованій в одиницях вимірюваної величини, у других — сигнал реєструється.

З погляду принципу дії вимірювального механізму показувальні прилади електромеханічної групи поділяють на прилади магнітоелектричної, електромагнітної, електродинамічної, індукційної та електростатичної систем. Якщо до складу вимірювального кола засобу вимірювань входить попередній перетворювач масштабу чи роду вимірюваної величини, наприклад, електронний підсилювач чи електронний перетворювач роду вимірюваної величини, або ж термоелектричний чи випрямний перетворювач, то прилади називаються, відповідно, електронними, термоелектричними чи випрямними.

### 2.1.2 Магнітоелектричні прилади

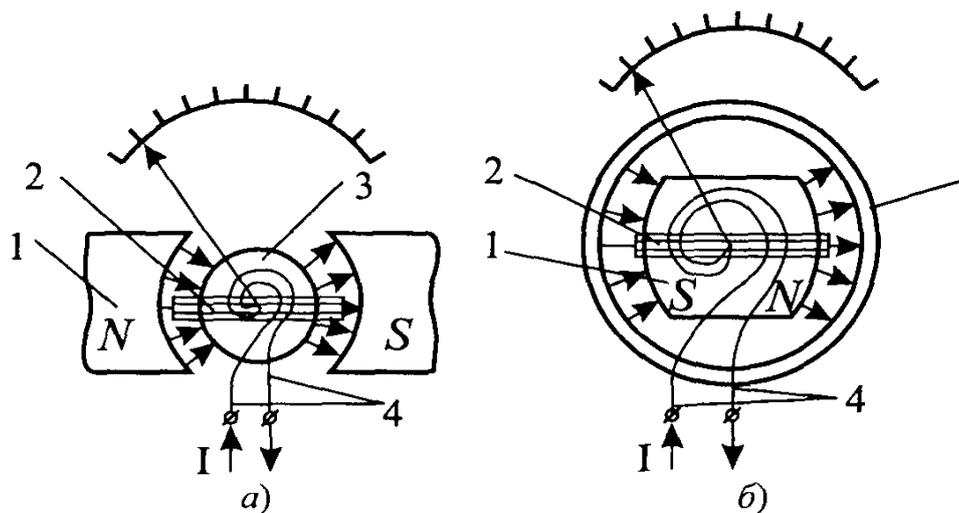


Рис. 2.2 Магнітоелектричні вимірювальні механізми

Активними елементами магнітоелектричних ВМ (рис.2.2), тобто елементами, які беруть участь у створенні обертального моменту, є рухома рамка 2, що обертається в однорідному магнітному полі між полюсами постійного магніта 1 та осердям 3. Існують магнітоелектричні прилади із зовнішнім магнітом та з внутрішньорамковим магнітом. В останніх ефективніше використовується енергія постійного магніта і вони можуть бути порівняно малих розмірів. Для підведення струму до рамки служать дві спіральні пружини 4, які також призначені для створення протидіючого моменту. Якщо через обмотку рамки протікає струм  $i$ , то він створює обертальний момент, пропорційний цьому струмові, і викликає обертання рамки. При цьому спіральні пружини створюють протидіючий момент, пропорційний до кута обертання  $\alpha$ .

Якщо через рамку проходить постійний струм  $I$ , то усталене відхилення вказівника (усталений кут обертання  $\alpha$ ) буде пропорційним цьому струмові.

Вираз для обертального моменту магнітоелектричного прилада має вигляд:

$$M_{об} = \frac{dW_e}{d\alpha} = \frac{d(\Phi \cdot I)}{d\alpha},$$

де  $\Phi$  – магнітний потік, який можна визначити таким чином

$$\Phi = B \cdot S \cdot \omega \cdot \alpha,$$

тут  $I$  – струм в обмотці рамки;

$B$  – магнітна індукція;

$S$  – площа рамки;

$\omega$  — кількість витків рамки;

$\alpha$  — кут повороту рамки.

Після диференціювання отримаємо:

$$M_{об} = B \cdot S \cdot \omega \cdot I.$$

Прирівнюємо обертальний та протидіючий моменти:

$$M_{об} = M_{пр},$$

$$B \cdot S \cdot \omega \cdot I = W_n \cdot \alpha.$$

Звідси отримуємо:

$$\alpha = \frac{B \cdot S \cdot \omega}{W_n} \cdot I.$$

Іноді це рівняння записують, вводячи поняття чутливості приладу

$$\alpha = S_i \cdot I,$$

де  $S_i$  — чутливість магнітоелектричного приладу, яка рівна

$$S_i = \frac{B \cdot S \cdot \omega}{W_n} .$$

З рівняння видно, що залежність між кутом відхилення стрілки та струмом – лінійна, тобто магнітоелектричні прилади мають лінійну (рівномірну) шкалу.

При проходженні через рамку змінного струму характер руху рухомої частини визначається її амплітудо-частотною характеристикою. Якщо частота струму значно менша від частоти власних коливань рухомої частини, то остання буде здійснювати коливний рух з частотою струму через рамку. Такі ВМ призначені для засобів вимірювань (реєстрації) миттєвих значень вимірюваних величин. Якщо ж частота струму значно більша за частоту власних коливань рухомої частини, то її відхилення буде пропорційним лінійному середньому значенню  $I_{л.сер.}$  струму (середньому за період), тобто

$$\alpha = k \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = k I_{л.сер.} ,$$

де  $k$  - коефіцієнт пропорційності, який визначається конструктивними параметрами ВМ.

Найчастіше магнітоелектричні прилади призначаються для вимірювань постійних струмів або лінійних середніх значень змінного струму. Струм повного відхилення таких приладів знаходиться в межах від 1 мкА до 20...50 мА при падінні напруги 30...200 мВ. Споживана потужність у кращому випадку може бути зведена до декількох десятків мікват. Зведена похибка лабораторних магнітоелектричних приладів – 0,1.. .0,5 %, щитових - до 2,5 %.

В амперметрах на струм понад 50 мА з метою уникнення перегрівання обмотки рухомої рамки останню шунтують низькоомним резистором (шунтом), що дає змогу розширити границю вимірювань струму практично до будь-якого значення. Щоб уникнути похибки від невідомого падіння напруги на струмопідводах, шунти виконуються чотиризатискачевими: два затискачі для підведення до шунта вимірюваного струму, два інші - для під'єднання магнітоелектричного ВМ (рис. 2.3,а). Для забезпечення взаємозамінності падіння напруги на опорі шунта при номінальному струмі нормуються на рівні 15...100 мВ. Опір шунта залежить від опору вимірювального механізму:

$$R_{ш} = \frac{R_{ВМ}}{K - 1} ,$$

де  $K$  – коефіцієнт шунтування, він рівний  $K = I/I_{BM}$ .

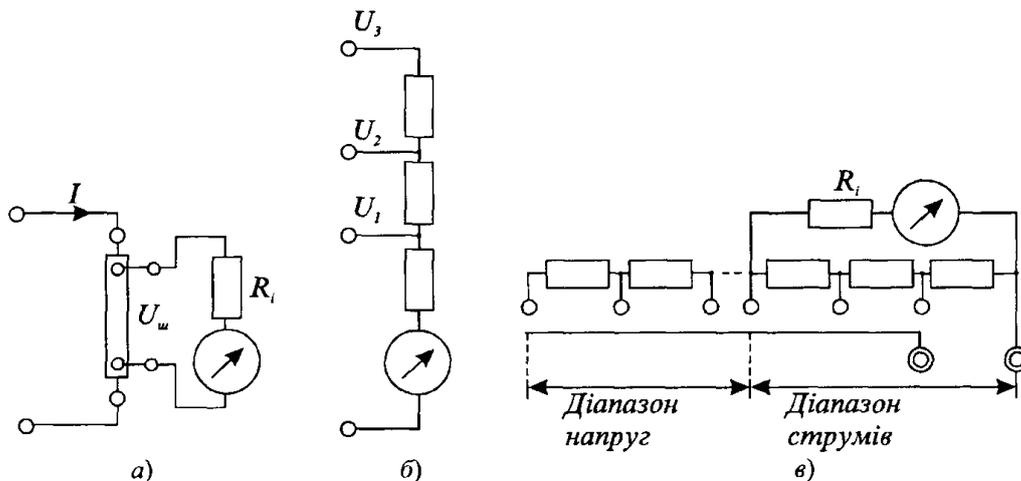


Рис. 2.3 Схеми багатограничних магнітоелектричних вимірювальних приладів

Увімкненням послідовно з ВМ, який має внутрішній опір  $R_i$ , деякого додаткового опору  $R_d$  можна розширити верхню границю вимірювань напруги, створивши, зокрема, багатограничний вольтметр (рис. 2.3,б). Опір  $R_d$  також залежить від опору вимірювального механізму

$$R_d = R_{BM} (K - 1),$$

де  $K$  – коефіцієнт розширення межі вимірювання по напрузі, він рівний  $K = U/U_{BM}$ .

Номінальні значення напруг магнітоелектричних вольтметрів знаходяться в межах від  $10^{-3} V$  до  $1000 V$ . Струм повного відхилення (номінальний струм вольтметра) здебільшого становить 1, 3 або 5 мА.

На рис. 2.3,в наведена схема багатограничного магнітоелектричного вимірювача напруги та струму.

Магнітоелектричні прилади мають той недолік, що вони придатні для роботи лише на постійному струмі. Для розширення їх функціональних можливостей використовують функціональні перетворювачі змінного струму (напруги) у постійні. Таке перетворення може здійснюватись за допомогою термоелектричного перетворювача, або шляхом одно- чи двопівперіодного випрямлення без використання електронного підсилювача чи з його використанням.

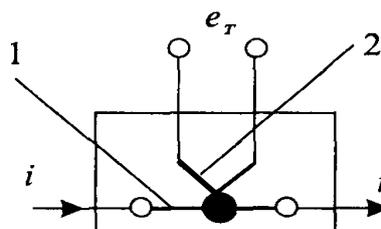


Рис. 2.4 Термоелектричний перетворювач струму

Термоперетворювач є перетворювачем діючого значення струму в ЕРС. Він складається з нагрівного елемента 1 (рис. 2.4) та термопари 2. Є два різновиди термоперетворювачів - контактні та безконтактні. У контактних перетворювачах гарячий спай термопари приварений до нагрівного елемента і має з ним електричний контакт, у безконтактних - термопара та нагрівний елемент з'єднані між собою за допомогою скляної чи керамічної краплі, а електричний контакт між ними відсутній. Термоперетворювачі на малі струми (одиниці міліампер) виконуються вакуумними.

При протіканні через нагрівний елемент змінного синусоїдного струму в термопарі виникає термо-ЕРС

$$e_T = k \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt = kI^2,$$

де  $I = I_m/\sqrt{2}$  –діюче значення струму.

Термоелектричні прилади є одними з основних для вимірювань діючих значень та напруги в широкому частотному діапазоні (від одиниць герц до сотень мегагерц). Їх суттєвою перевагою є незалежність показів від частоти та форми кривої вимірюваної величини. Клас точності термоелектричних приладів звичайно не перевищує 0,5.

На рис. 2.5 наведені схеми діодного та трансформаторнодіодного мостів для двонапівперіодного випрямлення змінного струму. Незалежно від полярності вхідного струму  $i_-$  струм через магнітоелектричний вимірювальний механізм (амперметр) буде проходити завжди в одному і тому ж напрямі (рис. 2.5,в).

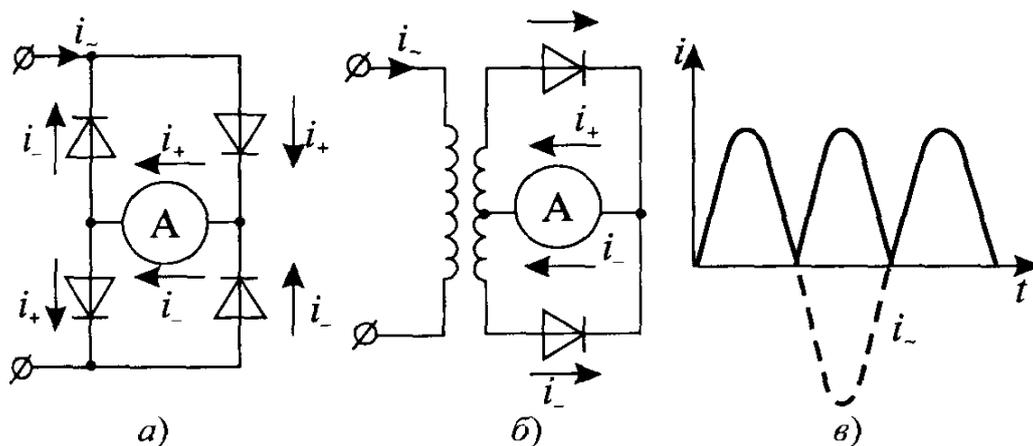


Рис. 2.5 Схеми двонапівперіодного випрямлення

Відхилення рухомої частини магнітоелектричного ВМ пропорційне середньому значенню випрямленого струму, а шкалу такого приладу (має назву випрямного) для змінного струму градууюють в діючих значеннях. Але співвідношення між випрямленим середнім значенням і діючим значенням

справедливе лише для певної форми кривої. Здебільшого випрямні прилади градууються в діючих значеннях для синусоїдної форми кривої  $k_{\phi}=1,11$ . Межі вимірювань випрямних приладів становлять від одиниць міліампер до одиниць ампер та від часток вольт до 1000 В в частотному діапазоні від 50 Гц до десятків кілогерц. Клас точності таких приладів не вищий від 0,5.

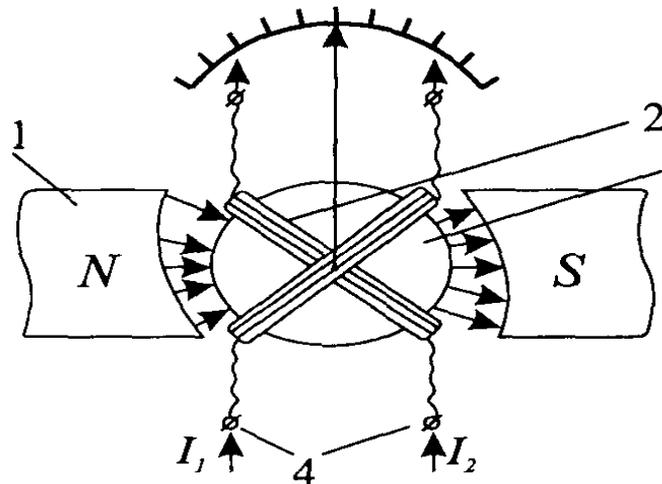


Рис. 2.6 До принципу дії магнітоелектричного логометра

Рис. 2.6 пояснює принцип дії магнітоелектричного логометра. В неоднорідному магнітному полі (нерівномірний магнітний проміжок між постійним магнітом 1 та овальним осердям 3) знаходяться дві закріплені під деяким кутом на спільній осі рамки 2, до яких через так звані безмоментні струмопідводи (струмопідводи з нехтовно малим протидіючим моментом) підводяться струми  $I_1$  та  $I_2$ .

У результаті їх взаємодії з полем постійного магніта виникають обертальні моменти, а рухома частина займе усталене положення  $\alpha$ , пропорційне відношенню цих струмів:

$$\alpha = k \frac{I_1}{I_2} .$$

Номінальні струми в рамках логометрів здебільшого знаходяться в межах 1 мкА...50 мА, опір рамок  $R = 10 \dots 10^8 \text{ Ом}$ , клас точності логометричних приладів 1,5...2,5.

Магнітоелектричні логометри застосовують, в першу чергу, для прямого вимірювання електричних опорів (омметрах). Омметри за логометричною схемою мають певні переваги перед омметрами з послідовним або паралельним під'єднанням вимірюваного опору і вимірювального механізму (рис. 2.7, а та б) . Дійсно, оскільки живлення обох кіл здійснюється від одного і того ж джерела, то при зміні напруги

живлення міняються тільки значення струмів, а їх відношення залишається незмінним. Отже, покази логометричних омметрів практично не залежать від напруги джерела живлення.

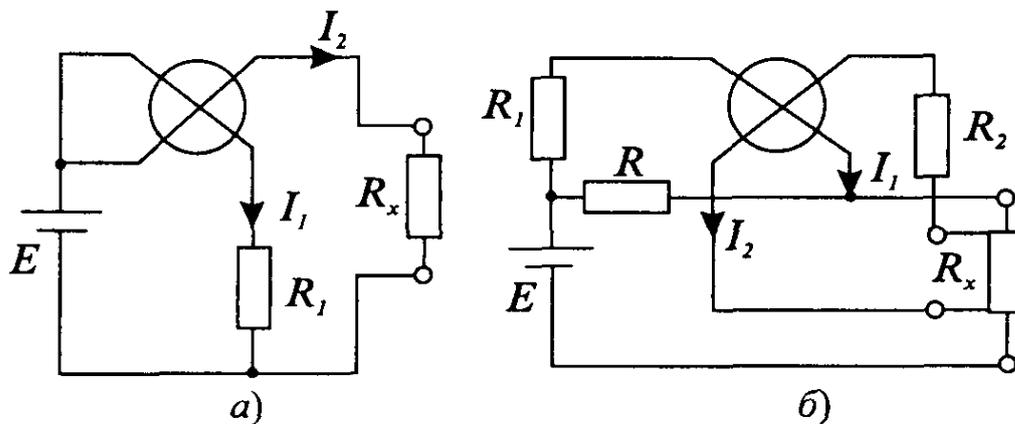


Рис. 2.7. Принципові схеми магнітоелектричних омметрів

Різновидом магнітоелектричних ВМ є механізми з рухомих постійним магнітом та нерухомою котушкою. Виконані на їх базі вібраційні гальванометри (ВГ) мають малоінерційну рухому частину (рухомий магніт), значний протидіючий момент і призначені для індикації дуже малих змін струмів та напруг при низьких частотах. Висока чутливість забезпечується роботою ВМ в режимі резонансу переважно при частоті  $\omega = 50 \text{ Гц}$ . Під впливом змінного магнітного поля, створюваного при протіканні через котушку вимірюваного змінного струму, рухома частина буде коливатись з частотою вимірюваного струму

$$\alpha_{\text{ВГ}} = kI_m \sin(\omega t + \varphi).$$

Сьогодні вібраційні гальванометри практично повністю витіснені значно чутливішими і зручнішими в користуванні електронними індикаторами.

Перевагами магнітоелектричних приладів є висока точність та чутливість, мале споживання потужності, лінійність шкали; наявність постійного магніту дає високу степінь захищеності від зовнішніх полів. Виготовляються прилади аж до класів точності 0.1 та 0.2.

Недоліки: вимірювання тільки постійного струму, невисока переважувальна здатність, відносно висока вартість, складність конструкції.

### 2.1.3 Електромагнітні прилади

В основу принципу дії *електромагнітних вимірювальних механізмів* закладено правило, за яким на феромагнітне тіло в магнітному полі діє сила, пропорційна квадрату магнітної індукції. Магнітна індукція, в свою чергу, створюється струмом  $I$ , що протікає через котушку

вимірювального механізму, а обертальний момент, що виникає, пропорційний  $I^2$ .

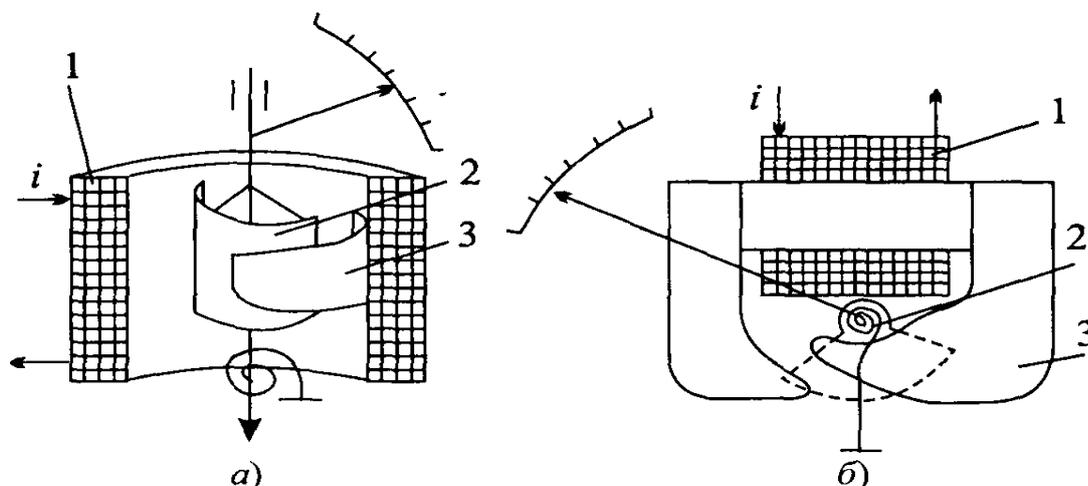


Рис. 2.8 Електромагнітні вимірювальні механізми

У вимірювальних механізмах сучасних електромагнітних приладів обертальний момент створюється силою відштовхування між однаково намагніченими рухомим та нерухомим осердями в результаті проходження через котушку 1 (рис. 2.8) струму  $I$ , що вимірюється. При цьому осердя 2, що закріплене на осі, буде повертатись на деякий кут  $\alpha$ . Протидіючий момент створюється спіральними пружинами з лінійною характеристикою. Форма котушки, а отже, і осердь може бути круглою (рис. 2.8,а) або плоскою (рис. 2.8,б). В останньому випадку може бути значно зменшене споживання приладу з одночасним збільшенням обертального моменту за рахунок розміщення нерухомої котушки на феромагнітному осерді.

Вираз для електромагнітної енергії котушки можна представити:

$$W_e = \frac{L \cdot I^2}{2},$$

де  $L$  – індуктивність котушки.

Рівняння обертального та протидіючого моментів

$$M_{об} = \frac{I^2}{2} \cdot \frac{dL}{d\alpha}; \quad M_{np} = W_n \cdot \alpha,$$

звідси рівняння шкали приладу

$$\alpha = \frac{I^2}{2 \cdot W_n} \cdot \frac{dL}{d\alpha}.$$

Величина  $dL/d\alpha$  являє собою закон зміни індуктивності при зміні кута і залежить від конструкції приладу.

Таким чином, усталене відхилення рухомої частини за умови, що частота струму значно перевищує частоту власних коливань рухомої частини, буде пропорційним ефективному (середньоквадратичному) значенню струму.

Найменший струм електромагнітних приладів, що відповідає повному відхиленню вказівника, дорівнює близько  $10 \text{ мА}$ , споживання потужності -  $0,05... 1 \text{ ВА}$ . Номінальні значення вимірюваних величин електромагнітних приладів становлять відповідно: амперметрів - від  $10 \text{ мА}$  до  $100 \text{ А}$ , вольтметрів - від  $10 \text{ В}$  до  $1000 \text{ В}$ . Частотний діапазон електромагнітних приладів звичайно не перевищує  $1000... 1500 \text{ Гц}$ .

Перевагами електромагнітних приладів є можливість вимірювати постійний та змінний струм, стійкість до перевантажень, простота конструкції, невелика вартість приладу.

Недоліки: квадратичність шкали, тобто шкала має на початку зону нечутливості; крім того, котушка утворює дуже слабе магнітне поле, тому мала степінь захищеності від зовнішніх магнітних полів. Класи точності цих приладів невисокі – від 1,0 і більше.

#### 2.1.4 Електродинамічні прилади

Різновидами вимірювальних приладів, покази яких пропорційні добутку двох величин, є прилади на базі вимірювальних механізмів *електродинамічної системи*.

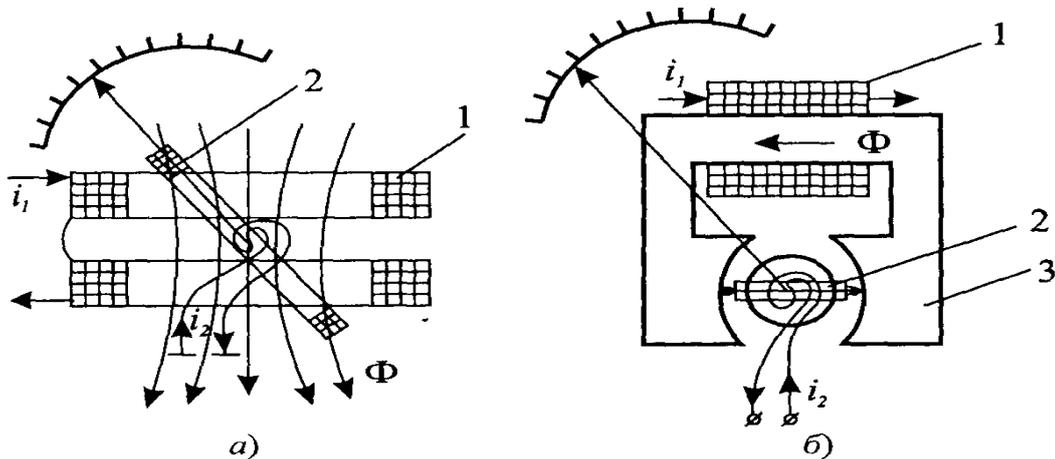


Рис. 2.9 Електро- та феродинамічні вимірювальні механізми

Принцип дії приладів базується на взаємодії магнітних потоків, що створюються в результаті проходження через дві послідовно з'єднані нерухомі котушки 1 та рухому рамку 2 відповідно струмів  $I_A$  та  $I_B$ . В результаті цієї взаємодії утворюється обертальний момент, і стрілка, що

з'єднана з рамкою, повертається на деякий кут.

Вираз для обертального моменту можна отримати диференціюванням повної електрокінетичної енергії двох контурів із струмами, яка дорівнює:

$$W_e = \frac{L_A \cdot I_A^2}{2} + \frac{L_B \cdot I_B^2}{2} + I_A \cdot I_B \cdot M_{AB},$$

де  $L_A, L_B$  – індуктивності нерухомої та рухомої котушок;

$I_A, I_B$  – струми, які течуть у котушках;

$M_{AB}$  – взаємоіндуктивність котушок  $A$  і  $B$ .

Відомо, що обертальний момент рівний

$$M_{об} = \frac{dW_e}{d\alpha}.$$

Так як при повороті котушок їх власні індуктивності не змінюються, то:

$$\left. \begin{aligned} L_A &= const \\ L_B &= const \end{aligned} \right\},$$

звідси

$$M_{об} = I_A \cdot I_B \cdot \frac{dM_{AB}}{d\alpha}, \quad M_{np} = W_n \cdot \alpha \dots$$

Прирівняємо обертальний та протидіючий моменти, отримуємо

$$M_{об} = M_{np},$$

звідси

$$\alpha = \frac{I_A \cdot I_B}{W_n} \cdot \frac{dM_{AB}}{d\alpha}.$$

Величина  $dM_{AB}/d\alpha$  являє собою закон зміни взаємоіндуктивності при зміні кута і залежить від конструкції приладу.

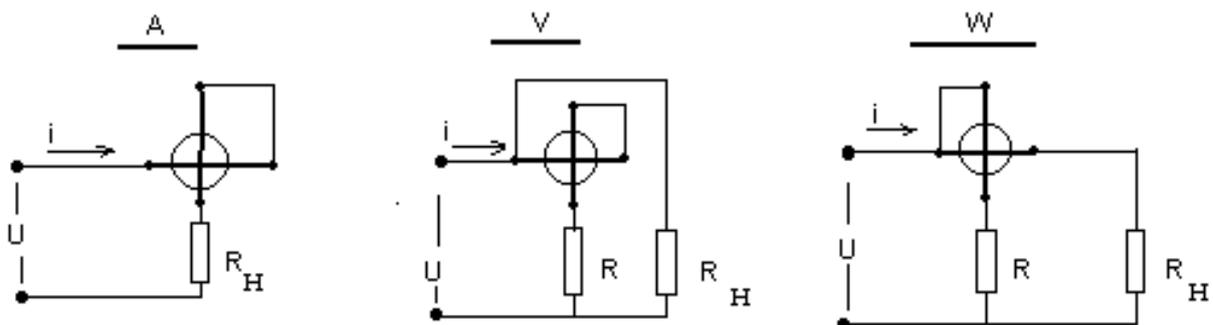


Рис. 2.10 Схеми підключення котушок електродинамічних приладів

Електродинамічні прилади можуть використовуватись як амперметри (А), вольтметри (V) та ватметри (W), змінюється тільки схема підключення котушок (рис.2.10).

Вимірювальні механізми електродинамічної системи при послідовному з'єднанні нерухомих котушок та рухомої рамки можуть бути використані для піднесення до квадрату струму, що через них протікає, а отже, для створення амперметрів чи вольтметрів середньоквадратичних значень відповідно струму чи напруги.

Для амперметра та вольтметра, які працюють на постійному струмі

$$\alpha = \frac{I^2}{W} \cdot \frac{dM_{AB}}{d\alpha} .$$

Для приладів змінного струму необхідно прийняти до уваги зсув фаз між струмами  $I_A$  та  $I_B$ , тоді

$$\alpha = \frac{I_A \cdot I_B \cdot \cos \varphi}{W} \cdot \frac{dM_{AB}}{d\alpha} .$$

За конструкцією є два різновиди приладів електродинамічної системи: з вимірювальним механізмом без феромагнітного осердя і з вимірювальним механізмом, в якому магнітний потік, що створюється струмом  $I$ , проходить через шихтований (виконаний з набору листів) магнітопровід (осердя).

Прилади з вимірювальним механізмом без феромагнітного осердя (їх називають електродинамічними) можуть працювати у порівняно широкому частотному діапазоні (до декількох кілогерц). Однак такі прилади значною мірою піддаються впливу зовнішнього магнітного поля, якщо в ньому не передбачене екранування або астатичне виконання вимірювального механізму (два ідентичні вимірювальні механізми на спільній осі, в яких обертальні моменти від зовнішнього поля направлені в протилежних напрямках і взаємно компенсуються).

Амперметри електродинамічної системи випускаються на струми від 20 мА до 10 А, вольтметри - на напруги 30 В до 600 В. Номінальні напруги ватметрів також є від 30 В до 600 В при номінальних струмах від 0,2 до 0,5 А та номінальному  $\cos \varphi = 1$ . Прилади, вимірювальний механізм яких має феромагнітний магнітопровід (феродинамічні прилади), при меншому споживанні розвивають значно більші обертальні моменти, дуже надійні, однак поступаються за точністю та частотним діапазоном електродинамічним приладам. Найвищий клас точності електродинамічних приладів - 0,1, а феродинамічних - 0,5.

В електродинамічних логометрах (рис. 2.11), які використовують в якості фазометрів, обертальні моменти є наслідком взаємодії струмів у рухомих рамках з магнітним полем, що створюється струмом в нерухомих котушках, а кут відхилення рухомої частини визначатиметься значенням

кута зсуву фаз  $\varphi$  чи  $\cos \varphi$  між струмом та напругою:

$$\alpha = F(\cos \varphi) .$$

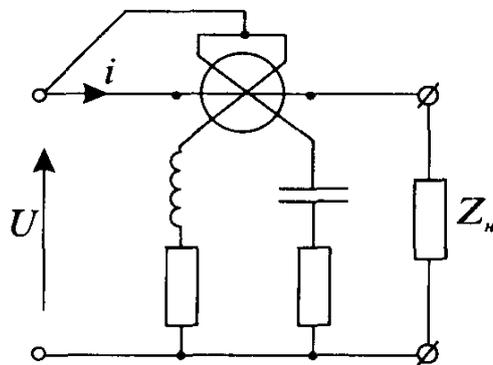


Рис. 2.11 Схема електродинамічного фазометра

Характер цієї залежності, а отже, і ступінь нерівномірностей шкали визначаються конструктивними параметрами вимірювального механізму.

### 2.1.5 Електростатичні прилади

В електростатичному вимірювальному механізмі обертальний момент утворюється у результаті взаємодії двох систем заряджених провідників, одна з яких рухома.

Прилад складається з нерухомих металевих пластин 2, та легкої рухомої алюмінієвої пластини 1, яка закріплюється на одній вісі із дзеркалом, що відбиває промінь на шкалу показчика. При підключенні до зажимів напруги, що вимірюється  $U$ , нерухомі пластини отримують заряд одного знаку, а рухома – іншого. Під дією електростатичного поля вона буде втягуватися у простір між нерухомими пластинами, повертаючи вісь та дзеркало (або стрілку).

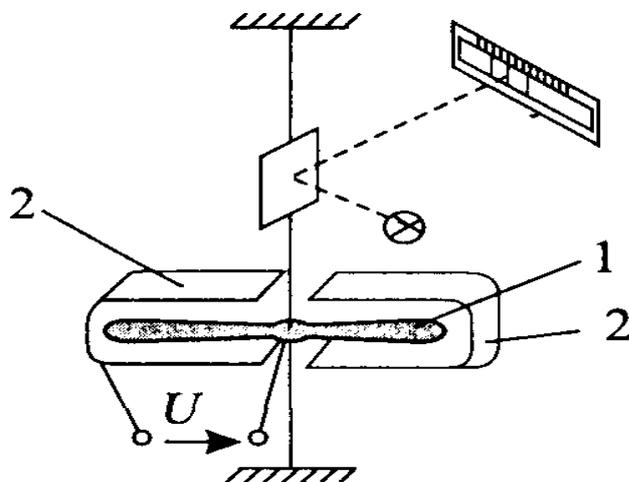


Рис. 2.12 Електростатичний вимірювальний механізм

При цьому енергія, що запасена полем, пропорційна квадрату напруги

$$W_e = \frac{C \cdot U^2}{2}.$$

Тоді рівняння обертального моменту

$$M_{об} = \frac{dW_e}{d\alpha} = \frac{U^2}{2} \cdot \frac{dC}{d\alpha},$$

де  $C$  – ємність конденсатора, утвореного пластинами. Прирівнюючи обертальний та протидіючий моменти, отримаємо

$$\alpha = \frac{U^2}{2 \cdot W_n} \cdot \frac{dC}{d\alpha},$$

тобто при втягуванні пластини виникає зміна площі конденсатора на кут, пропорційний квадрату прикладеної напруги.

Безпосередньо дані прилади вимірюють тільки напругу та застосовуються у вольтметрах. Для створення необхідного для нормальної роботи обертального моменту в електростатичних вимірювальних механізмах потрібна порівняно висока напруга. Тому електростатичні прилади випускають як вольтметри з номінальною напругою не нижче ніж 10 В і як кіловольтметри переважно до 30 кВ. У вольтметрах на низькі напруги (до сотен вольт) вимірювання ємності пов'язане із зміною активної площини пластин. У вольтметрах на великі напруги – із зміною відстані між пластинами.

Позитивними особливостями електростатичних вольтметрів є: дуже мале споживання енергії, яке відчутно проявляється хіба що на високих частотах, незалежність показів у широкому частотному діапазоні аж до десятків мегагерц, порівняно високий клас точності, залежно від межі вимірювання та частотного діапазону основна похибка може бути зведена до 0,5... 0,1 %.

Враховуючи вказані вище позитивні особливості електростатичних вимірювальних механізмів, останні використовують також для побудови ватметрів для вимірювань потужності малопотужних об'єктів та в колах високої напруги, а в поєднанні з електронними підсилювачами - високочутливих електронних ватметрів.

До недоліків можна віднести залежність показань приладу від електростатичних полів, від температури, частоти та вологості.

### 2.1.6 Індукційні прилади

Індукційний вимірювальний механізм (рис. 2.13) використовується, в основному, в лічильниках електричної енергії в колах змінного струму. Також існують ватметри індукційної системи, які мають схожу будову.

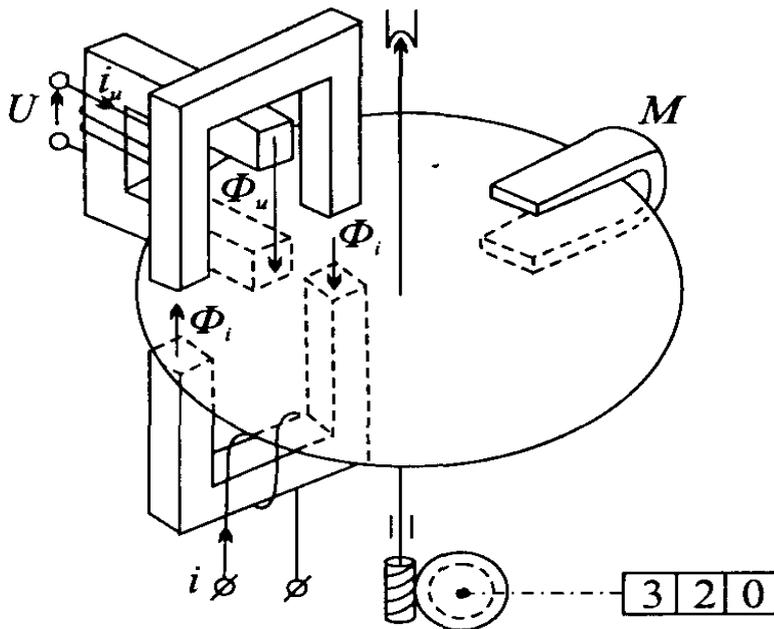


Рис. 2.13 Вимірювальний механізм індукційного лічильника

Вимірювальний механізм має два незалежні магнітопроводи, які рознесені в просторі. Обмотка одного з магнітопроводів є обмоткою кола напруги (підключається до навантаження паралельно), обмотка другого магнітопроводу є струмовою (підключається послідовно). По обмотках електромагнітів течуть змінні струми  $i_u$  та  $i$ , зсунуті по фазі на кут  $\varphi$ . Ці струми утворюють магнітні потоки  $\Phi_u$  та  $\Phi_i$ , які також зсунуті по фазі на кут  $\varphi$ . Магнітні потоки, у свою чергу, наводять у диску вихрові струми, утворюючи обертальний момент  $M_{об}$ . Вісь легкого алюмінієвого диска, що знаходиться між осердями, з'єднана черв'ячною передачею з лічильником.

Кількість обертів диска за визначений проміжок часу пропорційна швидкості обертання, яка, у свою чергу, залежить від струму та напруги. Таким чином, результуючий сигнал пропорційний спожитій енергії. У приладі немає протидіючого моменту, гальмівний момент утворюється постійним магнітом  $M$ .

Рівняння обертального моменту :

$$M_{об} = k \cdot f \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \sin \varphi,$$

де  $k$  – коефіцієнт, який залежить від матеріалу, конструктивних особливостей прилада;  $I_1, I_2$  – струми в обмотках,  $f$  – частота змінного струму.

Переваги: великий обертальний момент, малий вплив зовнішніх полів, висока надійність та невисока вартість, стійкість до перевантажень.

Недоліки: залежність від частоти струму, величини напруги, зовнішньої температури. Прилади застосовуються тільки у мережах змінного струму.

## 2.1.7 Реєструвальні прилади

У практиці електричних вимірювань часто необхідно знати не тільки значення вимірюваної величини в певний момент часу чи її інтегральну характеристику, але й характер зміни її миттєвого значення або залежність від іншої величини. Для цього використовують реєструвальні прилади, в тому числі реєструвальні (самописні) прилади прямого перетворення, а також автоматичні реєструвальні прилади зрівноважувального перетворення.

Реєструвальні прилади прямого перетворення будуються на базі показувальних приладів, додатково оснащених реєструвальним пристроєм, який складається із реєструвального органа та носія зображення.

Реєструвальний орган (здебільшого перо спеціальної конструкції з чорнилом) механічно з'єднаний з вказівником приладу і переміщається по колу, а кут його повороту відповідає повороту рухомої частини ВМ. Досконалішим і поширенішим є реєструвальний орган зі спеціальним механізмом, який кутове переміщення рухомої частини ВМ перетворює у поступальний рух пера реєструвального органу.

Переміщення носія зображення здійснюється здебільшого від електродвигуна. Якщо швидкість переміщення носія зображення стала, то записується зміна вимірюваної величини в часі, а якщо переміщення пропорційне значенню деякої іншої величини, то записується функціональна залежність однієї величини від іншої (двокоординатний самописець).

Процеси, що змінюються в часі повільно, записують на діаграмі у вигляді диска або циліндра звичайно з частотою обертання в один оберт за добу або за тиждень.

В деяких різновидах двокоординатних приладів передбачений запис на нерухомій діаграмі. У цьому випадку реєструвальний орган має два ступені свободи і може переміщуватись в двох взаємоперпендикулярних напрямках як в один, так і в інший бік.

Конструктивно реєструвальні пристрої різні, але всім їм властивий спільний недолік - переміщення реєструвального органа по носію викликає додатковий момент тертя. Для його зменшення використовують точковий запис. У таких приладах стрілка вільно переміщується над носієм зображення. Спеціальна дужка, яка піднімається за допомогою кулачкового механізму, періодично падає на стрілку і притискає її разом з фарбувальною стрічкою до паперу.

Приведення в дію падаючої дужки можна також зв'язати з перемикачем вимірюваних величин та перемикачем фарбувальної стрічки різного кольору, що дає змогу здійснювати багатоканальну реєстрацію одним і тим же вимірювальним механізмом, але різним кольором.

Запис вимірювальної інформації може здійснюватись чорнилом на звичайному папері. Цей спосіб хоч і дешевий, але не досконалий. Широке застосування знаходить електротермічний запис на металізованому папері. У цьому випадку через записувальний пристрій (штифт) пропускають електричний струм, внаслідок чого з діаграмного паперу випаровує тонкий металевий шар, утворюючи чітке та надійне зображення.

Самописці на базі показувальних приладів служать для реєстрації вимірюваних величин, що змінюються в часі повільно, звичайно в діапазоні частот до  $50 \text{ Гц}$ . Швидкодіючі реєструвальні прилади можуть реєструвати миттєві значення в діапазоні частот від  $100 \text{ Гц}$  до декількох кілогерц.

Точність реєструвальних приладів прямого перетворення часто буває недостатньою. В таких випадках використовують автоматичні реєстратори компенсаційного типу. Останні, крім цього, практично не споживають енергії від досліджуваного об'єкта. Принцип дії таких реєстраторів пояснює схема рис. 2.14.

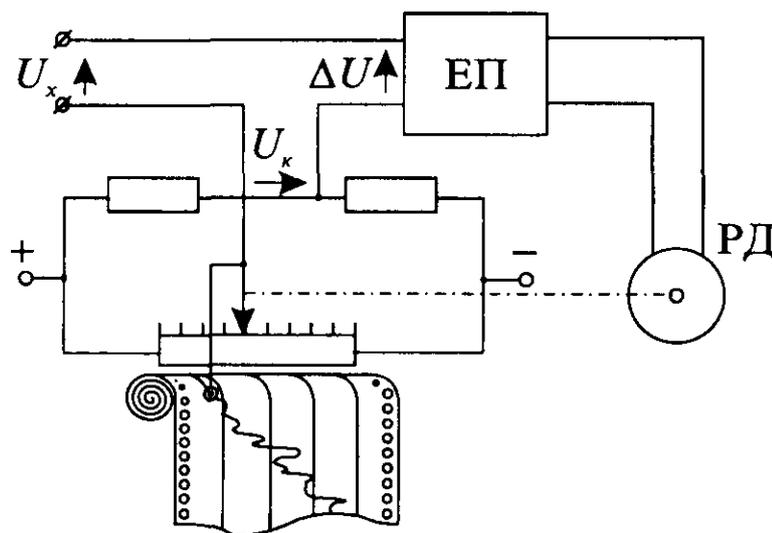


Рис. 2.14 Принципова схема компенсаційного самописця

Вхідна напруга  $U_x$  порівнюється з вихідною (компенсувальною) напругою  $U_K$  мостової схеми. При нерівності цих напруг їх різниця  $\Delta U$  після підсилення подається на вхід реверсивного двигуна РД та приводить в обертання його ротор, в результаті чого переміщується повзунок реохорда, змінюючи напруги  $U_K$  до моменту, поки  $\Delta U = U_x - U_K = 0$ . Діапазони вимірювань компенсаційних реєстраторів здебільшого становлять від часток до десятків мілівольт, зведена похибка  $\pm 0,25 \%$ .

### 2.1.8 Основні позначення шкал електромеханічних приладів

На кожен прилад наносяться такі позначення:

- 1) Позначення одиниці вимірюваної величини в приладах, які мають іменовану шкалу (наприклад, А, V). На шкалах багатограничних приладів може бути нанесено повне найменування приладу (наприклад, "Амперметр").
- 2) Позначення класу точності приладу ( наприклад, 2,5).
- 3) Умовне позначення принципу дії приладу (позначення наведені в таблиці 2.1).
- 4) Умовне позначення робочого положення приладу, якщо положення має значення. Знаки мають вигляд:  – для горизонтального положення шкали;  – для вертикального положення шкали;  $\angle \alpha$  – для установки шкали під кутом.
- 5) Умовне позначення ступеня захищеності від магнітних чи електричних впливів; для I групи знак системи береться в прямокутник з безперервних чи штрихових ліній відповідно при захисті від магнітних або від електричних полів; для II групи прямокутник не зображується.



– захист від магнітних полів,



– захист від електричних полів.

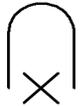
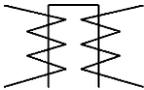
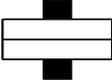
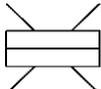
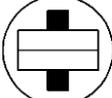
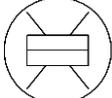
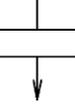
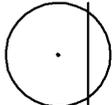
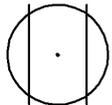
- 6) Умовне позначення роду струму і кількості фаз ( – постійний струм,  $\sim$  змінний струм)
- 7) Умовне позначення досліджуваної напруги ізоляції вимірювального кола по відношенню до корпусу у вигляді п'ятикутної зірки, всередині якої вказана досліджувана напруга в кіловольтах. Якщо напруга не вказана, то вважається, що вона рівна 0,5 кВ ( наприклад,  – досліджувана напруга ізоляції 5 кВ).
- 8) Робоча частота ( наприклад, 50 Гц). Деякі прилади можуть працювати на двох або трьох робочих частотах, тоді прилад, як правило, має і декілька класів точності.
- 9) Рік випуску і заводський номер.
- 10) Номер стандарту, встановленого на дану групу приладів.
- 11) Товарний знак заводу-виробника.

Крім розглянутих основних, прилади можуть мати інші умовні позначення. Наприклад, на прилади, призначені для роботи в

умовах тропічного клімату, наноситься знак "Т", морського клімату – знак "М", знак АСТ позначає астатичний вимірювальний механізм. Позначення по пунктах від 1 до 11 повинні наноситися на лицьовій шкалі приладу, інші позначення можуть бути вказані на корпусі та біля зажимів.

Таблиця 2.1

Умовні позначення основних систем електромеханічних приладів

Тип приладу	Умовне позначення принципу дії	
	з механічним протидіючим моментом	з електричним протидіючим моментом (логометри)
Магнітоелектричний із рухомою рамкою		
Магнітоелектричний із рухомих магнітних		
Електромагнітний		
Електродинамічний		
Феродинамічний		
Електростатичний		
Індукційний		

Як вивчалось раніше, електростатичні прилади не мають електричного протидіючого моменту, тобто логометрів електростатичної системи не існує.

## 2.2 Вимірювання струму та напруги. Розширення границь вимірювань. Вимірювання електричного опору

### 2.2.1 Загальні відомості

Діапазон значень струмів та напруг, які необхідно вимірювати в сучасній практичній діяльності, дуже широкий: від часток пікоампер до сотень кілоампер і від часток нановольт до одиниць мегавольт. Вимірювання малих струмів, напруг та зарядів є типовою задачею, що виникає під час роботи з різними первинними перетворювачами фізичних величин - тензорезистивними, терморезистивними, п'єзоелектричними, іонізаційними, при дослідженні біопотенціалів, при випробуваннях ізоляційних матеріалів тощо. Нижні границі вказаних діапазонів відповідають реально досяжним порогам чутливості сучасних вимірювальних приладів.

Сучасна практика та наукові дослідження також вимагають вимірювань високих та надвисоких напруг - до 10 МВ, та великих струмів - до 0,5...2 МА. Напруги та струми при цьому можуть бути постійними або змінними (звичайно промислової частоти 50 Гц).

Вибір вимірювальних приладів повинен здійснюватись, враховуючи відповідність їх властивостей до конкретних умов вимірювань, а також особливості методик вимірювань.

### 2.2.2 Вимірювання постійних струму та напруги

Для вимірювань постійних струмів та напруг найчастіше використовують магнітоелектричні прилади, яким властиві висока чутливість, точність, широкий діапазон вимірювань. Магнітоелектричні прилади з вмонтованими шунтами та додатковими резисторами дають змогу вимірювати струм від  $10^{-8}$  до 50 А, а напругу – від  $10^{-5}$  до 1000 В.

Основні схеми вимірювань постійних напруги та струму наведені на рис.2.15. При вимірюванні напруги вольтметром з додатковим резистором (рис.2.15,б) матимемо:

$$U_x = U_V + I_V R_o = U_V \left( 1 + \frac{R_o}{R_V} \right)$$

де  $U_V$  - покази вольтметра,  $I_V$ ,  $R_V$  - струм та опір вольтметра;  $R_o$  - опір додаткового резистора.

Номинальний струм додаткового резистора повинен збігатися за значенням зі струмом повного відхилення вольтметра, а його опір вибирається таким, щоб множник  $1 + \frac{R_o}{R_V}$  був цілим числом, кратним 2;5 або 10. Клас точності додаткового резистора повинний бути вищим від класу точності вольтметра.

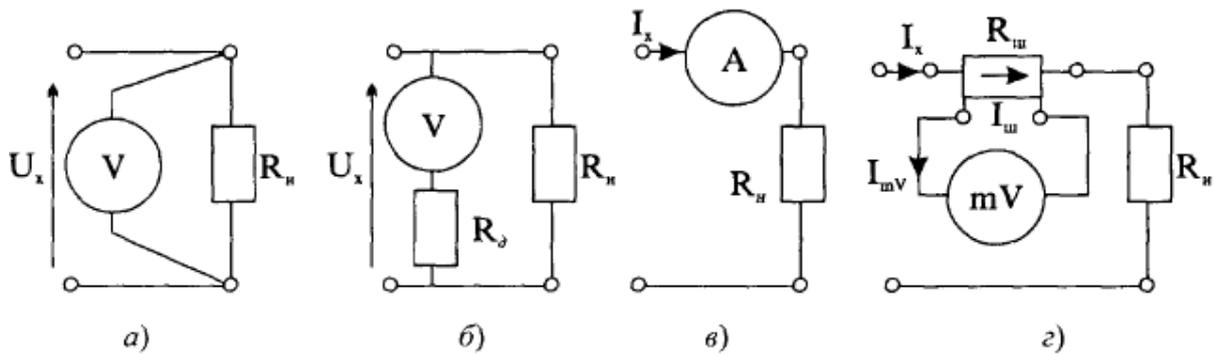


Рис. 2.15 Основні схеми вимірювань струму та напруги

Вимірюючи струм за допомогою мілівольтметра з шунтом (рис.2.15,г), матимемо

$$I_x = I_{ш} + I_{mV} = \frac{U_{ш}}{R_{ш}} + \frac{U_{ш}}{R_{mV}} = \frac{U_{ш}}{R_{ш}} \left( 1 + \frac{R_{ш}}{R_{mV}} \right),$$

де  $U_{ш}$ ,  $I_{ш}$ ,  $R_{ш}$  – падіння напруги на шунті, його струм і опір, відповідно;  $R_{mV}$ ,  $I_{mV}$  – опір і струм мілівольтметра, відповідно.

Мілівольтметр під'єднується до потенціальних затискачів шунта каліброваними дротами з нормованим опором, що дорівнює  $0,035 \text{ Ом}$  для пари дротів. Падіння напруги на дротах враховується при градуюванні мілівольтметра, тому його покази визначаються падінням напруги на шунті, тобто  $U_{mV} = U_{ш}$ .

При  $\frac{I_{mV}}{I_{ш}} \leq 0,003K$ , де  $K$  - клас точності шунта, значенням струму  $I_{mV}$  нехтують (похибка від цього не перевищує  $0,3K$ ) і значення  $I_x$  визначають за формулою

$$I_x = \frac{U_{mV}}{R_{ш}} = \frac{U_{mV}}{U_{ш.ном}} \cdot I_{ш.ном},$$

де  $U_{ш.ном}$ ,  $I_{ш.ном}$  – номінальні значення напруги і струму шунта.

Номінальна напруга шунта і межа вимірювання мілівольтметра повинні збігатися, а клас точності шунта повинен бути вищим від класу точності мілівольтметра.

Для вимірювання струмів, які перевищують  $10 \text{ кА}$  (що відповідає максимальному значенню номінального струму серійних шунтів), можна скористатися паралельним з'єднанням декількох шунтів, при якому потенціальні затискачі усіх ввімкнених паралельно в коло вимірюваного струму шунтів з'єднуються каліброваними дротами із затискачами мілівольтметра.

Для вимірювань дуже великих струмів, а також при вимірюванні струму в колах високої напруги, коли для захисту обслуговуючого персоналу необхідно ізолювати коло вимірювального приладу від високої напруги, застосовують вимірювальні трансформатори постійного струму разом з магнітоелектричними амперметрами.

Електродинамічні прилади за точністю не поступаються магнітоелектричним, однак їх діапазони вимірювань дещо менші (від 1 мА до 10 А по струму і від 1 до 600 В по напрузі) і вони споживають значно більшу потужність, тому їх застосування на постійному струмі обмежене. Через порівняно вузькі діапазони вимірювань, порівняно велике споживання і невисоку точність також не знаходять широкого застосування на постійному струмі феродинамічні і електромагнітні прилади.

Суттєву перевагу порівняно з перерахованими вище приладами мають електростатичні вольтметри: на постійному струмі вони практично не споживають потужності від досліджуваного об'єкта – їх вхідний опір може досягати  $10^{14}$  Ом, що визначає особливу доцільність їх застосування для вимірювання напруги в малопотужних колах. Не менш важливе практичне значення має також можливість застосування електростатичних вольтметрів для прямих вимірювань високих напруг до 300 кВ.

Найширші можливості для вимірювань постійних напруг і струму мають аналогові і цифрові електронні прилади. Важливими позитивними властивостями електронних приладів є їх широкодіапазонність (від пікоампер до десятків ампер і від нановольт до кіловольт), мале споживання енергії від досліджуваного об'єкта і висока точність: найточніші аналогові електронні прилади постійного струму мають клас точності 0,2, а цифрові - навіть 0,002. До переваг цифрових приладів слід віднести також їх високу швидкодію, автоматичний вибір діапазону вимірювань, визначення полярності вимірюваної величини, а також можливість передачі і реєстрації результатів вимірювань.

Найточніші вимірювання напруги здійснюються за допомогою компенсаторів напруги постійного струму.

Якщо вимірювана напруга  $U_x$  не перевищує верхньої границі вимірювань компенсатора, то вона подається безпосередньо на затискачі компенсатора. Похибка вимірювання залежить від класу точності компенсатора і може бути зведена до 0,001... 0,002%.

Слід мати на увазі, що точність вимірювань, яка відповідає класу точності компенсатора, може бути забезпечена тільки при достатній плавності регулювання компенсаційної напруги, яка, в свою чергу, залежить від чутливості нуль-індикатора. Чутливість повинна бути такою, щоб зміні компенсаційної напруги на значення, що відповідає ціні ступеня наймолодшої декади чи ціні поділки вимірювального реохорда, відповідало відхилення вказівника нуль-індикатора не менш ніж на дві

поділці у випадку світлового вказівника і на одну поділку - для стрілкового нуль-індикатора.

Недостатня чутливість змушує експериментатора при зрівноваженні компенсатора обмежитися більш грубими ступенями регулювання компенсаційної напруги, що призводить до збільшення похибки квантування, границя якої  $|\delta_{KB}|_{\max} = \frac{0,5 \cdot \Delta U_K}{U_K} \cdot 100\%$ , де  $\Delta U_K$  - ціна ступеня наймолодшої із декад компенсатора, зміна якої призводить до помітної зміни показів нуль-індикатора.

Якщо вимірювана величина перевищує верхню границю вимірювання компенсатора, що у більшості випадків становить від 1,2 до 2,4 В, використовують подільники напруги (рис. 2.16,а). Серійні подільники напруги дають змогу розширити границю вимірювань компенсатора до 1000 В. Здебільшого вони мають коефіцієнти ділення 10, 100 та 1000, і клас точності від 0,0005 до 0,005.

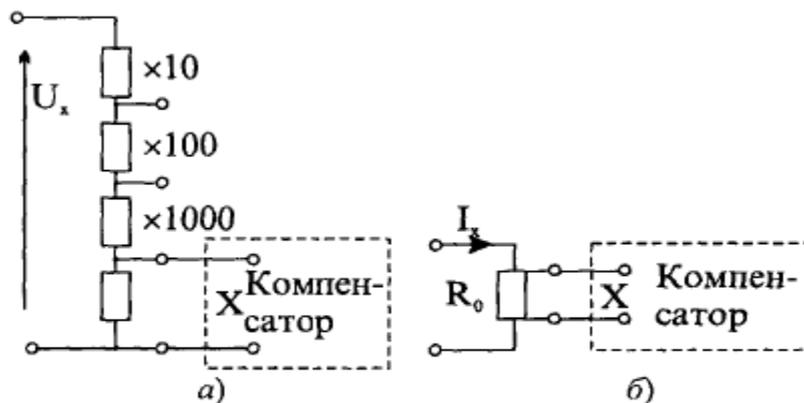


Рис. 2.16 Схеми вимірювання напруги та струму компенсатором напруги постійного струму

Вимірювання струму за допомогою компенсатора полягає у вимірюванні падіння напруги на відомому опорі  $R_0$  (рис. 2.16,б).

Значення опору  $R_0$  вибирають таким, щоб падіння напруги на ньому не перевищувало верхньої границі вимірювань компенсатора з врахуванням того, що потужність, яка виділяється в опорі  $R_0$  при протіканні струму  $I_x$ , не повинна перевищувати номінального значення потужності для даної вимірювальної котушки.

Для точних вимірювань великих постійних струмів використовують метод компарування - безпосереднього порівняння двох однорідних величин, одна з яких пропорційна вимірюваній величині, інша може бути виміряна з високою точністю. Вимірювання великих постійних струмів зводиться до вимірювання порівняно невеликого струму, величина якого може бути визначена з високою точністю.

На рис. 2.17 наведена схема резистивного компаратора струму, заснованого на порівнянні падінь напруг, що створюються вимірюваним великим струмом  $I_x$  та компенсуючим струмом  $I_2$  на двох точних резисторах  $R_1$  та  $R_2$ . Оскільки струм  $I_2 = I_x \frac{R_1}{R_2}$  при  $R_1 \ll R_2$  значно менший від струму  $I_x$ , він може бути точно вимірний, наприклад, за величиною падіння напруги на зразковому опорі  $R_0$  за допомогою цифрового вольтметра.

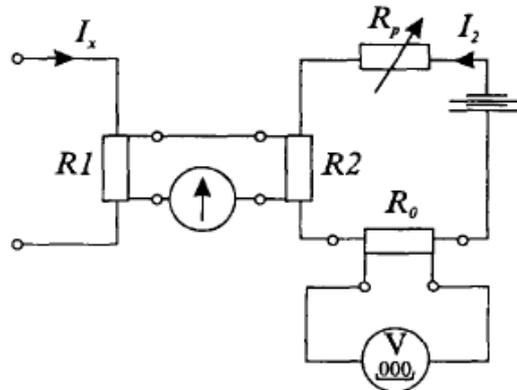


Рис. 2.17 Принципова схема резистивного компаратора струму

Точність компарування струмів наведеним способом обмежена складністю виготовлення високоточних та високостабільних резисторів (мір опору) для великих постійних струмів.

Для точних вимірювань дуже великих постійних струмів (десятки кілоампер) використовують магнітні компаратори. При компаруванні урівноважуванням магніторушійних сил, як компарувальні перетворювачі використовуються обмотки, коефіцієнти перетворення яких дорівнюють, відповідно,  $k_1 = \frac{F_1}{I_1} = \omega_1$  та  $k_2 = \frac{F_2}{I_2} = \omega_2$ . Оскільки відношення кількості витків  $\omega_1 / \omega_2$  є величиною сталою, що не залежить від впливних факторів, то похибка вимірювання відношення струмів за умови використання високочутливих перетворювачів недокомпенсації може бути зведена до  $10^{-4} \dots 10^{-5}\%$ .

### 2.2.3 Вимірювання змінних струму та напруги

Для вимірювання діючого значення змінних струму і напруги промислової частоти найчастіше користуються електромагнітними, електродинамічними і феродинамічними приладами, а на підвищених частотах - термоелектричними, електростатичними, випрямними і електронними (аналоговими та цифровими). Середньовипрямлене і амплітудне значення вимірюють випрямними і електронними приладами. Середня область значень змінних струмів і напруг (приблизно від 10 мА до

10 A і від 1 до 600 В) охоплюється діапазонами вимірювань приладів усіх перелічених вище систем, однак при виборі конкретних типів приладів слід враховувати і їх характерні особливості.

Для вимірювань струму менше за 1 мА і напруги нижче ніж 0,1 В застосовують електронні прилади, нижні границі вимірювань яких досягають  $10^{-9}$  А і  $10^{-6}$  В. Вимірювання дуже малих струмів (до  $10^{-12}$  А) можна також здійснювати вимірюванням падіння напруги на резисторі за допомогою електронного вольтметра. Найвищу границю вимірювання по струму мають електромагнітні амперметри (300 А), а по напрузі - електростатичні вольтметри (300кВ).

Сучасні цифрові вимірювальні прилади можуть вимірювати діюче значення змінної напруги частотою від 1,5 Гц до 1 МГц в діапазоні 1мкВ...150 В з похибкою 0,05%, іноді навіть 0,02%, а діюче значення змінного струму від 10 мкА до 2 А з точністю до 0,05 %.

Для розширення границь вимірювань амперметрів змінного струму застосовують вимірювальні трансформатори струму ВТС (рис. 2.18). Значення вимірюваного струму визначають як

$$I_x = k_I I_A,$$

де  $k_I$  - номінальний коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму.

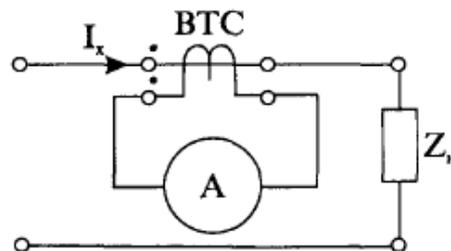


Рис. 2.18 Схеми вимірювань змінного струму з ВТС

Похибка вимірювання містить похибки амперметра і коефіцієнта трансформації трансформатора струму. Щоб зменшити вплив останньої, клас точності вимірювального трансформатора струму беруть завжди вищим за клас точності амперметра.

У тих випадках, коли необхідно проводити вимірювання струму без розриву кола, по якому він протікає, можна скористатися трансформатором струму з роз'ємним магнітопроводом у вигляді кліщів.

Напругу, яка перевищує 600В, вимірюють, використовуючи вимірювальні трансформатори напруги (ВТН). Для схеми рис. 2.19

$$U_x = k_U U_v,$$

де  $k_U$  - номінальний коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора напруги.

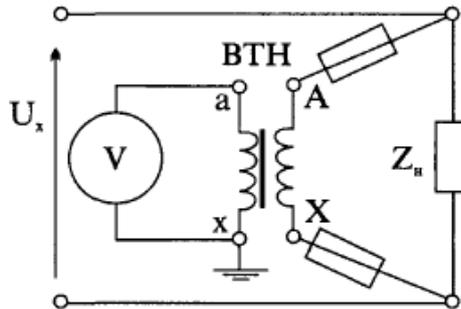


Рис. 2.19 Схеми вимірювання змінної напруги з ВТН

Якщо напруга кола перевищує 600 В, вторинну обмотку і корпус трансформатора заземлюють.

На похибку вимірювання напруги впливає похибка коефіцієнта трансформації трансформатора напруги, тому необхідно, щоб його клас точності був вище від класу точності вольтметра.

Прилади прямого перетворення забезпечують вимірювання струму і напруги з похибкою не менше 0,1 %. Точніші вимірювання здійснюються компараторами. Спрощені схеми вимірювань струму і напруги за допомогою термоелектричних компараторів подані на рис. 2.20. Порівняння діючих значень постійного і змінного струмів здійснюються за допомогою термоелектричного перетворювача ТП (рис. 2.20,а), який складається з нагрівача та термопари. Спочатку перемикач SA ставлять в положення 1. Значення термо-ЕРС, що виникає, дорівнюватиме

$$E_x = k_n I_x^2,$$

де  $k_n$  - коефіцієнт перетворення ТП;  $I_x$ —діюче значення струму.

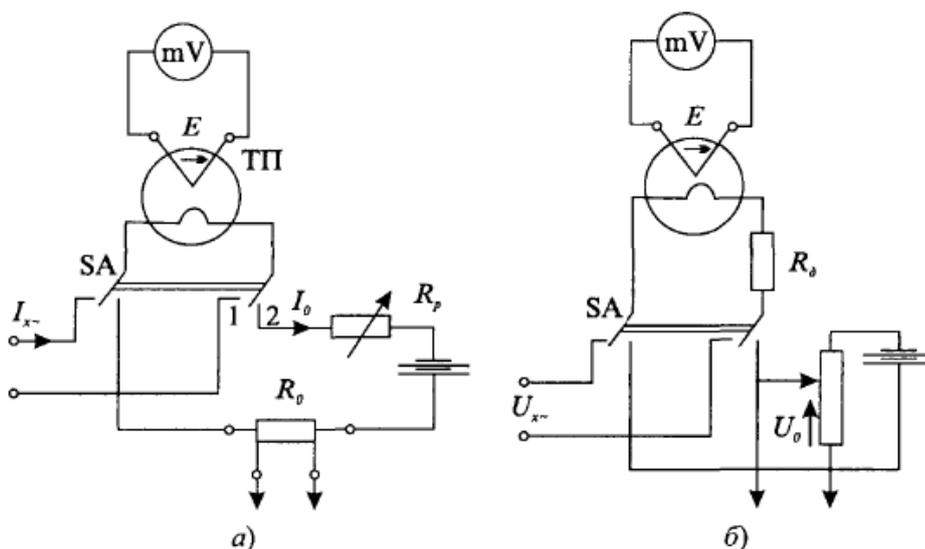


Рис. 2.20 Спрощені схеми вимірювань змінних струмів та напруг з використанням компаратора

Вимірявши за допомогою мілівольтметра значення  $E_x$ , перемикають SA в положення 2 і регулюють значення постійного струму до отримання термо-ЕРС  $E_0$ , яка за значенням дорівнювала б  $E_x$ , тобто добиваються попереднього показу мілівольтметра.

Враховуючи, що  $E_x = k_n I_x^2 = E_0 = k_n I_0^2$  (значення  $k_n$  для постійного змінного струму залишається однаковим), маємо  $I_x^2 = I_0^2$ , тобто  $I_x = I_0$  (для діючих значень), і, вимірявши значення  $I_0$  за допомогою компенсатора постійного струму, визначаємо  $I_x$ . Схема вимірювання напруги (рис. 2.20,б) відрізняється наявністю додаткового резистора  $R_D$  в колі нагрівача. Для розширення діапазону вимірювань компаратора по струму використовують шунти, по напрузі – додаткові резистори.

Похибка вимірювань змінного струму (напруги) за допомогою компаратора складається із похибки вимірювання постійного струму (напруги) і похибки порівняння значень  $I_x$  і  $I_0$  ( $U_x$  і  $U_0$ ). Остання залежить, в основному, від рівності значень  $k_n$  на змінному і постійному струмі. Вона зростає зі збільшенням частоти вимірюваного струму через вплив поверхневого ефекту на опір нагрівача і збільшення паразитних ємностей. Для точних вимірювань замість мілівольтметра використовують компенсатор постійного струму.

Промислові зразки термоелектричних компараторів забезпечують вимірювання змінних струму та напруги в діапазоні частот 20 Гц...200 кГц з похибкою 0,02...0,05 %, а в діапазоні частот від 200 Гц до 20 кГц зі збільшенням цієї похибки для крайніх значень частотного діапазону до 0,2...0,5 %.

Для вимірювань несинусоїдних струмів та напруг слід користуватися приладами, робочий частотний діапазон яких охоплює усі ті гармонічні складові досліджуваного сигналу, нехтування якими недоступно за умов потрібної точності вимірювань. Зокрема, для вимірювань діючих значень несинусоїдних струмів і напруг найкраще користуватися термоелектричними, електродинамічними, електростатичними і електронними приладами, для вимірювання середньовипрямлених значень - електронними, градуйованими в середньовипрямлених значеннях, а для вимірювання амплітудних значень напруг - електронними піковими вольтметрами.

Більшість випрямних і багато електронних приладів мають шкали, градуйовані в діючих значеннях вимірюваного струму і напруги, а відхилення їх вказівника пропорційні середнім чи амплітудним значенням. Незважаючи на широкий робочий діапазон частот, такі прилади не слід використовувати для вимірювань діючих значень несинусоїдних струмів і напруг, оскільки в таких умовах їм властиві значні похибки від впливу форми кривої вимірюваної величини.

## 2.2.4 Вимірювання електричних зарядів

Особливість вимірювань зарядів полягає в тому, що об'єкти досліджень, заряди яких вимірюють, є дуже малопотужними і з високим внутрішнім опором. Тому вимірювальні кола засобів вимірювань зарядів можуть будуватись з використанням вимірювальних підсилювачів із дуже високим входним опором. Приклад такого вимірювального кола наведений на рис. 2.21. В цьому колі використовується неінвертуючий підсилювач на основі операційного підсилювача з входним каскадом на польовому транзисторі. Напруга, що надходить на вхід підсилювача

$$U_{вх} = \frac{q}{C} \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC},$$

де  $C$  – еквівалентна ємність паралельно з'єднаних ємності досліджуваного об'єкта, кабелю та входної ємності вимірювального кола;  $R$  – еквівалентний опір паралельно з'єднаних опорів досліджуваного об'єкта, опору ізоляції кабелю та входного опору вимірювального кола.

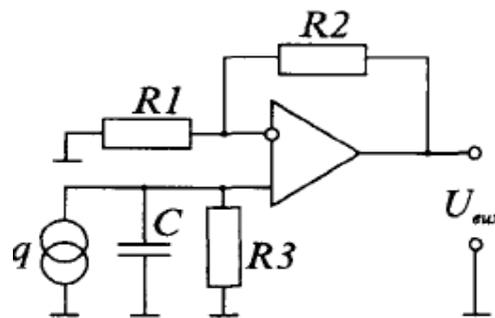


Рис 2.21 Вимірювальне коло перетворювача заряду

Вихідна напруга підсилювача

$$U_{вих} = \frac{q}{C} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}.$$

Основним недоліком такої схеми є залежність вихідної напруги від ємності, основною складовою якої являється ємність кабелю, яка суттєво змінюється залежно від положення кабелю, температури та вологості.

Сьогодні поряд з підсилювачами напруги у вимірювальних колах засобів вимірювань зарядів використовуються перетворювачі заряду в напругу (рис. 2.22). Їх, зазвичай, називають підсилювачами заряду (інтегрувальними підсилювачами струму). Якщо конденсатор попередньо був розряджений, то при надходженні на вхід підсилювача за схемою (рис. 2.22,а) електричного заряду  $q_{вх}$ , на його виході за умови, що  $k \gg 1$ ,

одержимо вихідну напругу  $U_{вих} = -\frac{q_{вх}}{C}$ .

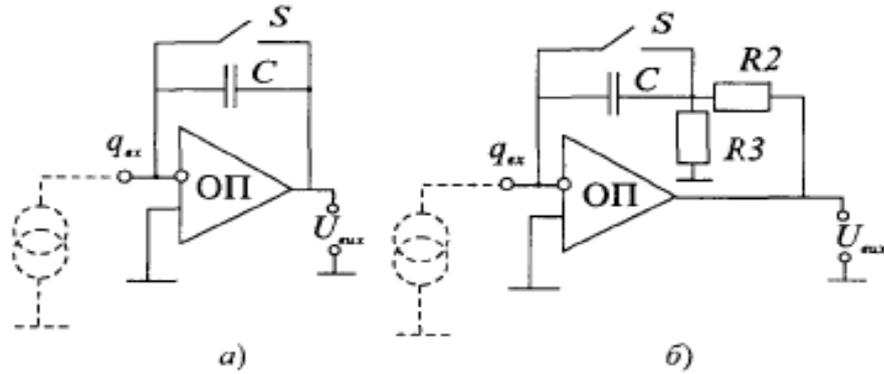


Рис. 2.22 Схеми підсилювачів заряду (інтегрувальних підсилювачів струму)

Для періодичного розряду конденсатора перед кожним наступним вимірюванням передбачений ключ  $S$ .

Підсилювач заряду за схемою на рис.2.22,б дозволяє отримати високий коефіцієнт підсилення без особливого зменшення ємності  $C$ . Оскільки для такого підсилювача

$$U_{вих} = -\frac{q_{вх}}{C} \left( 1 + \frac{R_2}{R_3} \right),$$

то підвищення коефіцієнта підсилення може бути здійснено за рахунок відношення  $R_2 / R_3$ .

## 2.3 Вимірювання електричного опору

### 2.3.1 Прямі та опосередковані вимірювання електричних опорів

Для прямих вимірювань опорів в діапазоні від  $10^{-5}$  до  $10^9$  Ом можна використати магнітоелектричні омметри та мегомметри, а для більших опорів (до  $10^{14} \dots 10^{15}$  Ом) - електронні мегомметри та тераомметри. Ці прилади мають здебільшого дуже нерівномірну шкалу з кінцевою відміткою  $\infty$  (безмежність). Граничне значення похибки в цьому випадку визначиться, зважаючи на клас точності (при нормуванні зведеної похибки і нормувальним значенням, що дорівнює довжині шкали), за формулою

$$\left| \delta_{R_x} \right|_{ГР} = K \frac{l_{шк}}{R_x} \cdot \frac{dR}{dl},$$

де  $K$  - числове значення класу точності омметра;  $l_{шк}$  - довжина шкали (мм);  $dR/dl$  - чутливість омметра в даній точці шкали (мм/Ом).

Детальніший аналіз показує, що значення  $\left| \delta_{R_x} \right|_{ГР}$  для таких омметрів найменше в середній частині шкали омметра і в кращому випадку наближається до  $4K$ , а з наближенням вказівника до початку чи до

кінця шкали різко зростає. Тому такі прилади використовуються лише для грубої оцінки значення досліджуваного опору з похибкою 5...10%.

Точнішими є опосередковані вимірювання опору за допомогою амперметра та вольтметра.

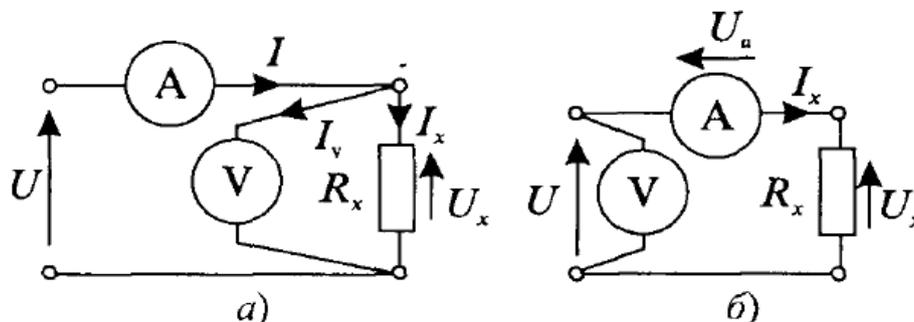


Рис. 2.23 Вимірювання опору за допомогою амперметра та вольтметра

Вимірявши струм і напругу за однією із схем, зображених на рис. 2.23, а і б, значення вимірюваного опору можна знайти із виразу

$$R_x = \frac{U}{I},$$

де  $U, I$  - напруга і струм за показами амперметра й вольтметра.

Похибка вимірювання складається з похибок амперметра і вольтметра та похибки методу, яка зумовлена споживанням потужності вимірювальними приладами і залежить від схеми їх вмикання. Зокрема, для схеми, зображеної на рис. 2.23, а

$$R_{x1} = \frac{U}{I} = \frac{U}{I_x + I_v} = \frac{R_x}{1 + R_x/R_v},$$

а відносна похибка методу при  $R_v \gg R_x$

$$\delta_{\mu1} = \frac{R_{x1} - R_x}{R_x} = -\frac{R_x}{R_v + R_x} \approx -\frac{R_x}{R_v}.$$

Для схеми на рис. 2.23, б

$$R_{x2} = \frac{U_x + U_A}{I} = R_A + R_x,$$

а відносна похибка методу складає

$$\delta_{\mu2} = \frac{R_{x2} - R_x}{R_x} = \frac{R_A}{R_x}.$$

Щоб забезпечити меншу похибку методу при вимірюванні порівняно низькоомних опорів, користуються схемою, зображеною на рис. 2.23,а, а при вимірюванні великих опорів – рис. 2.23.б. Похибку методу можна усунути, якщо визначити  $R_x$  з урахуванням струму вольтметра для схеми рис. 2.23,а

$$R_x = \frac{U}{I - I_v},$$

чи враховуючи падіння напруги на амперметрі (рис. 2.23,б)

$$R_x = \frac{U - U_A}{I}.$$

Незважаючи на певні незручності, зв'язані з необхідністю відліку двох приладів і виконання обчислень, вимірювання опору за допомогою амперметра та вольтметра широко використовується, особливо для вимірювань опорів обмоток потужних електричних машин та апаратів. Перевага цього методу полягає у можливості виконання вимірювань практично при будь-якому значенні струму та напруги, охоплених діапазонами вимірювань амперметрів та вольтметрів та в широкому діапазоні значень вимірюваних опорів (від  $10^{-6}$  до  $10^{13}$  Ом).

При дослідженнях електричних машин та трансформаторів, а також дослідженні індуктивних та взаємодуктивних перетворювачів виникає потреба вимірювати еквівалентні активні опори. Еквівалентний активний опір таких об'єктів є мірою споживаної об'єктом активної потужності при його роботі на змінному струмі і визначається як

$$R_{екв} = \frac{P}{I^2},$$

де  $P$  - активна потужність;  $I$  - струм досліджуваного об'єкта.

Вимірювання еквівалентного опору здійснюється за схемами вимірювання активної потужності. Похибка вимірювання  $R_{екв}$  (без врахування методичної похибки)

$$\delta R_{екв} = \pm(\delta_p + 2\delta_I),$$

де  $\delta_p$  – похибка вимірювання потужності;  $\delta_I$  - похибка вимірювання струму.

### 2.3.2 Особливості вимірювань опору ізоляції

Для вимірювань опору ізоляції пристроїв, що не знаходяться під напругою, здебільшого використовують електромеханічні або електронні

мегомметри. Вибір типу мегомметра, його межі вимірювань визначається параметрами досліджуваного об'єкта.

На рис. 2.24 показана схема вимірювань опору ізоляції екранованого кабеля. Схема живиться від генератора постійної напруги  $G$ , в якості вимірювального приладу використовується логометр.

Особливість вимірювань опору ізоляції екранованого кабеля за допомогою логометричного мегомметра полягає, зокрема, у необхідності усунення впливу на результат вимірювань струмів витoku через зовнішню поверхню ізоляції. З цією метою на ізоляцію кінців кабеля накладають металеві захисні кільця  $K$  (декілька витків голого мідного дроту), які під'єднують до затискача  $E$  мегомметра.

В такому випадку струм  $I_s$ , що протікає по поверхні ізоляції кабеля між захисними кільцями та екраном кабеля  $e$ , не попадає в рамку логометра. Різниця потенціалів між захисними кільцями та жилою кабеля нехтує мала порівняно з робочою напругою мегомметра і на цій ділянці струм практично відсутній. Таким чином, покази мегомметра залежать лише від струму  $I_i$  в об'ємі ізоляції між жилою та екраном кабеля, тобто пропорційні об'ємному опору ізоляції кабеля.

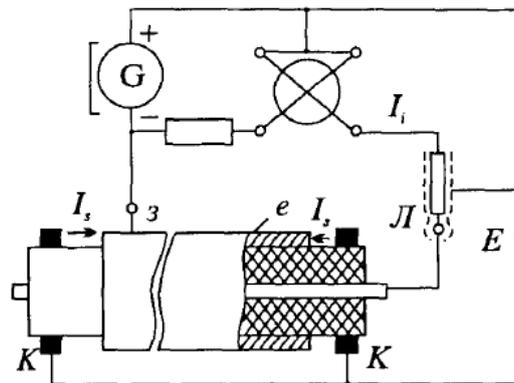


Рис. 2.24 Вимірювання опору ізоляції екранованого кабеля

Розглянемо вимірювання опору ізоляції відносно землі та між проводами електричних мереж. У випадку, коли як джерело енергії, так і споживачі під'єднані (рис. 2.24',а), за допомогою мегомметра вимірюють еквівалентний опір ізоляції  $R_1$  між проводом 1 та заземленням,  $R_2$  - між проводом 2 та заземленням, а також  $R_{12}$  - між проводами 1 та 2. Значення опорів  $R_{i31}$ ,  $R_{i32}$  та  $R_{i3}$  визначають, розв'язуючи систему рівнянь:

$$R_1 = \frac{R_{i31}(R_{i32} + R_{i3})}{R_{i31} + R_{i32} + R_{i3}}; \quad R_2 = \frac{R_{i32}(R_{i31} + R_{i3})}{R_{i31} + R_{i32} + R_{i3}}; \quad R_{12} = \frac{R_{i3}(R_{i31} + R_{i32})}{R_{i31} + R_{i32} + R_{i3}},$$

в результаті чого отримаємо:

$$R_{i31} = \frac{A}{2(R_2 + R_{i2} - R_1)}; \quad R_{i32} = \frac{A}{2(R_{i2} + R_1 - R_2)}; \quad R_{i3} = \frac{A}{2(R_1 + R_2 - R_{i2})},$$

де  $A = 2R_2R_{i2} - (R_2 + R_{i2} - R_1)^2$ .

Аналогічно можна визначити опір ізоляції в трифазній мережі.

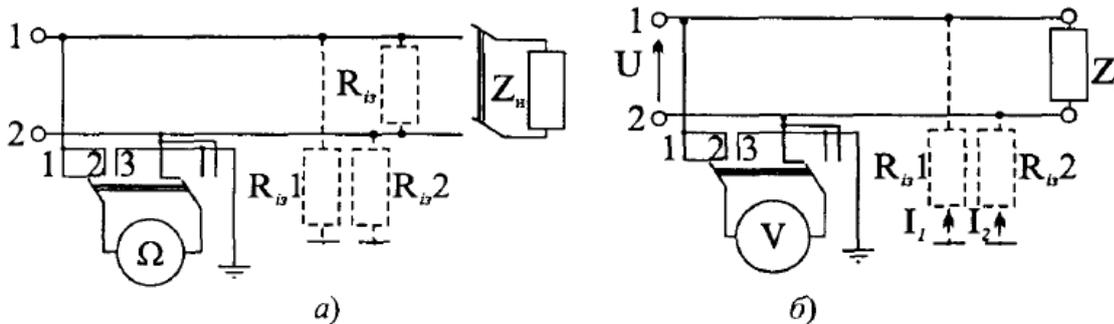


Рис. 2.24' Вимірювання опору ізоляції в двопровідній мережі

Якщо при від'єднаному джерелі енергії споживачі не від'єднані від мережі, то опір ізоляції  $R_{i3}$  між проводами 1 та 2 шунтується порівняно малим опором споживачів і можна вважати, що опори ізоляції проводів відносно землі з'єднані паралельно. У цьому випадку необхідно виміряти опір ізоляції між одним із проводів і землею. Це буде еквівалентний опір ізоляції відносно землі

$$R_{i3.екв} = \frac{R_{i31} \cdot R_{i32}}{R_{i31} + R_{i32}}.$$

Якщо  $R_{i3.екв}$  відповідає вимогам до опору ізоляції даної мережі, то тим більше цим вимогам буде відповідати ізоляція окремих проводів.

Для вимірювань опорів ізоляції пристроїв та мереж, що знаходяться під напругою, можна використати схему рис. 2.24',б. Почергово вимірявши напругу  $U$  в мережі, а також напруги  $U_1$  та  $U_2$  відповідно між лінією 1 та землею і лінією 2 та землею, можна записати:

$$I_1 = \frac{U - U_1}{R_{i31}} \approx \frac{U}{R_{i31} + \frac{R_{i32} \cdot R_V}{R_{i32} + R_V}};$$

$$I_2 = \frac{U - U_2}{R_{i32}} \approx \frac{U}{R_{i32} + \frac{R_{i31} \cdot R_V}{R_{i31} + R_V}}.$$

Якщо  $R_{i3} \gg R_V$ , то наведені вирази спрощуються:

$$I_1 = \frac{U - U_1}{R_{i31}} \approx \frac{U}{R_{i31} + R_V};$$

$$I_2 = \frac{U - U_1}{R_{i2}} \approx \frac{U}{R_{i2} + R_V}$$

Розв'язуючи ці рівняння, одержимо:

$$R_{i1} = R_V \frac{U - U_2}{U_2}; R_{i2} = R_V \frac{U - U_1}{U_1}$$

### 2.3.3 Вимірювання опору заземлення

Вимірювання опору заземлення завжди здійснюється на змінному струмі, щоб уникнути впливу на результати вимірювань напруги поляризації в місцях контакту заземлення з вологою землею.

Вимірювання можуть бути здійснені за допомогою амперметра та вольтметра, логометричного омметра, спеціальним вимірювачем заземлень компенсаційного типу. Опір заземлення визначається як опір між заземлювальним електродом та допоміжним електродом, віддаленим від електрода заземлення на теоретично безмежно велику відстань. Практично відстань між електродами повинна вибиратись не меншою, ніж 20 м.

На рис. 2.25 подана схема вимірювань опору заземлення за допомогою вольтметра та амперметра. У схемі використовуються два додаткові заземлювальні електроди. Електрод  $Z_1$ , що знаходиться на відстані 40...60 м від досліджуваного заземлення, служить для створення струмового контура, а електрод  $Z_V$  (приблизно 20 м від досліджуваного заземлення) - для створення контура напруги. При такій структурі вимірювального кола закон зміни потенціалу відносно заземлення буде виглядати як на кривій, що в нижній частині рисунка, а вимірювальне коло відповідає вищезгаданім вимогам до вимірювань опорів заземлення.

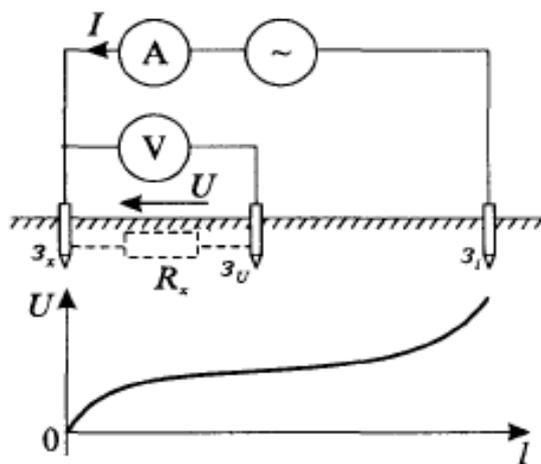


Рис. 2.25 Вимірювання опору заземлення

Значення опору заземлення визначається як:

$$R_x = \frac{U}{I},$$

де  $U$  та  $I$  – відповідно, показ вольтметра та показ амперметра.

Для уникнення методичної похибки необхідно, щоб опір вольтметра був значно більшим від опору  $R_0$  заземлення  $Z_U$  (опір  $R_0$  додається послідовно до опору вольтметра). Тому в якості вимірювального приладу використовують електронний або електростатичний вольтметр.

Широке застосування для вимірювань опору заземлення знаходять вимірювачі заземлення, засновані на компенсаційному принципі (рис. 2.26). Падіння напруги на вимірюваному опорі заземлення компенсується падінням напруги на частині  $\Delta R_p$  реохорда  $R_p$ , що знаходиться у вторинному колі вимірювального трансформатора.

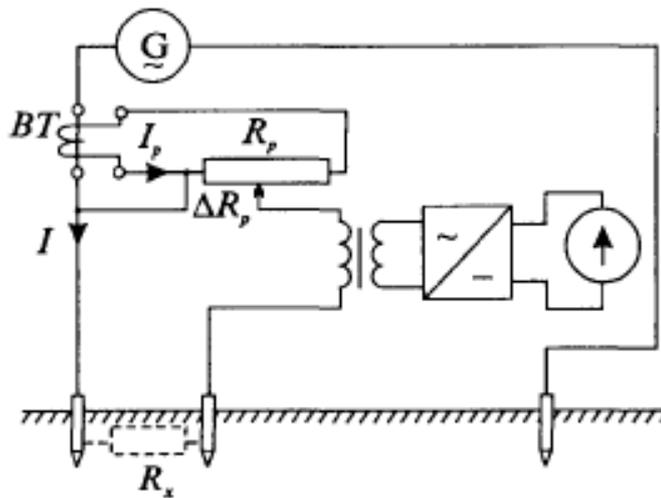


Рис. 2.26 Схема вимірювання опору заземлення компенсаційним способом

В момент компенсації

$$IR_x = I_p \Delta R_p$$

звідки

$$R_x = \frac{I_p}{I} \cdot \Delta R_p = \frac{\Delta R_p}{k_I},$$

де  $k_I$  - коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму.

Значення вимірюваного опору заземлення може бути відраховане безпосередньо за шкалою реохорда.

Серійні прилади, що побудовані на компенсаційному принципі, є багатограничними і дозволяють вимірювати опори заземлення від 0 до 1000 Ом з похибкою 1,5...5%.

## 2.4 Вимірювання потужності та енергії

Потужність та енергія є основними характеристиками більшості фізичних об'єктів, процесів та явищ, тому вимірювання цих величин займає значне місце серед методів вимірювань фізичних величин. У зв'язку зі значним зростанням споживання й повсюдним впровадженням заходів з економії енергетичних ресурсів все більшого значення набуває підвищення точності вимірювань потужності та енергії.

### 2.4.1 Вимірювання активної потужності однофазних мереж

Потужність вимірюють електродинамічними, феродинамічними, іноді й індукційними ватметрами. Найчастіше застосовують перші. Використання цих систем приладів обумовлене наявністю в їх конструкціях двох котушок, одну з яких можна увімкнути послідовно, а другу – паралельно, що дає можливість одночасно отримати сигнали, які пропорційні струму та напрузі. При вимірюванні на постійному струмі, а також на змінному струмі частотою до 200...400 Гц похибки електродинамічних ватметрів становлять близько 0,1 %, а феродинамічних – не менше 0,2 %. Промисловістю випускаються ватметри для вимірювань потужності в колах постійного струму, в однофазних та трифазних колах змінного струму класів точності 0,1...2,5.

Потужність, що споживає навантаження на постійному струмі

$$P = UI = I^2 R = U^2 / R .$$

На змінному струмі для миттєвих значень струму та напруги

$$P(t) = ui = i^2 R = u^2 / R .$$

Практично беруть до уваги середнє значення активної потужності, яке залежить також і від кута зсуву фаз між струмом та напругою,

$$P = I U \cos \varphi, \quad [Bm],$$

де  $I$  і  $U$  – діючі значення відповідно струму та напруги.

Аналогові ватметри мають чотири затискачі: два – струмові, та два – потенціальні. Один струмовий та потенціальний позначені <\*> і називаються генераторними. Вони приєднані до одного полюса джерела живлення.

Застосовуючи електродинамічні ватметри навіть із порівняно малою похибкою, все ж таки не можна усунути методичну похибку, яка виникає внаслідок того, що кола струму й напруги вимірювального механізму треба вмикати так само, як і відповідні прилади для вимірювання струму та напруги – амперметри та вольтметри. Вмикання цих приладів обумовлює методичну похибку внаслідок власного споживання енергії котушками

даних приладів.

Можливе увімкнення ватметра по двох схемах – довгій та короткій:

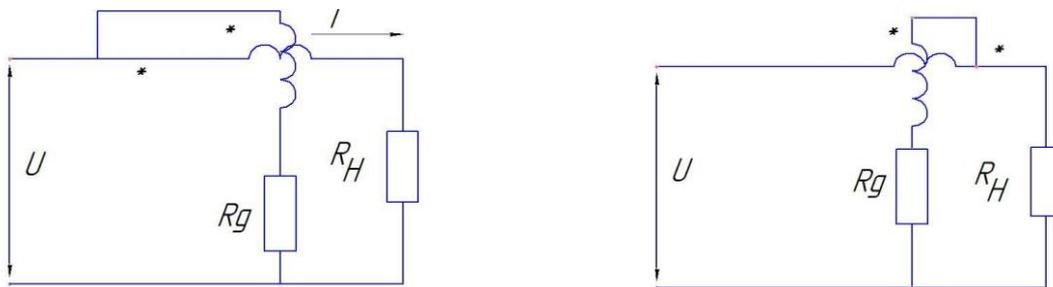


Рис. 2.27 Схеми увімкнення ватметрів

а) довга

б) коротка

Тут  $R_H$  – опір навантаження,  $R_D$  – опір додаткового резистора

Розглянемо роботу довгої схеми. Нехай вона працює на постійному струмі. Доведемо, що електричні ватметри можуть застосовуватись для вимірювання потужності.

Нерухома котушка А включена послідовно і вимірює струм у навантаженні. Рухома котушка В включена паралельно і вимірює напругу у навантаженні, а струм у навантаженні  $I_H$  буде рівний струму послідовної (струмової) котушки  $I_A$  ватметру:

$$I_1 = I_A = I_H ,$$

$$I_2 = I_B = \frac{U}{R_B + R_D} ,$$

де  $R_B$  – опір рухомої котушки;

$R_D$  – опір додаткового резистора.

Рівняння шкали електродинамічних приладів спрощено можна записати:

$$\alpha = K \cdot I_1 \cdot I_2 ,$$

де  $K$  – коефіцієнт, який визначається конструкційними параметрами приладу.

$$\alpha = K \cdot I_A \cdot \frac{U}{R_B + R_D} ;$$

отже

$$\alpha = K_1 \cdot I \cdot U = K_1 \cdot P ,$$

де  $K_1$  – постійний коефіцієнт, який рівний

$$K_1 = \frac{K}{R_B + R_D} .$$

Таким чином, кут повороту рухомої частини пропорційний потужності, яка вимірюється, тобто шкала приладу – лінійна.

Аналогічний висновок можна зробити і для ватметрів, які працюють на змінному струмі. При цьому вводиться припущення, що індуктивний опір рухомої обмотки на промислових частотах дуже малий у порівнянні із додатковим опором  $R_d$ , тому струм у паралельній гілці ватметра співпадає по фазі із напругою. Тоді кут зсуву фаз між струмами у паралельній та послідовній котушках буде дорівнювати куту зсуву фаз між струмом  $I$  та напругою  $U$ . Тоді рівняння шкали електродинамічного приладу, який працює на змінному струмі, можна записати:

$$\alpha = \frac{K}{R_B + R_d} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = K_1 \cdot P.$$

Отже електродинамічний ватметр при такому включенні вимірює активну потужність і також має рівномірну шкалу.

Порівняємо роботу довгої та короткої схем на постійному струмі.

Як вже визначалося, для схеми рис.2.27,а струм у навантаженні  $I_H$  буде рівний струму послідовної (струмової) котушки  $I_A$  ватметра, тоді показання приладу для довгої схеми

$$P = U_B \cdot I_A = (U_H + U_A) \cdot I_H = U_H \cdot I_H + U_A \cdot I_H = P_H + I_H^2 \cdot R_A = P_H + P_A.$$

Для схеми рис.2.27,б напруга у навантаженні  $U_H$  буде рівною падінню напруги у паралельній котушці ватметра  $U_B$ , тоді покази приладу для короткої схеми

$$P = U_B \cdot I_A = U_H \cdot (I_H + I_B) = U_H \cdot I_H + U_H \cdot I_B = P_H + P_B,$$

де  $U_B$  – напруга, прикладена до ланцюга напруги ватметра;  
 $U_A$  – напруга у струмовому ланцюзі ватметра;  
 $I_H, U_H, P_H$  – струм, напруга та потужність у навантаженні;  
 $P_A, P_B$  – потужності, що споживаються ланцюгами струму та напруги.

Потужності  $P_A$  і  $P_B$  являють собою абсолютні значення методичної похибки ватметра для довгої та короткої схем.

Відносна методична похибка

Для схеми рис.2.27, а:

$$\delta_\mu = \frac{P_A}{P_H} \cdot 100\%.$$

Для схеми рис.2.27, б:

$$\delta_\mu = \frac{P_B}{P_H} \cdot 100\%.$$

Оскільки втрати у послідовній обмотці менші, то й похибка довгої схеми буде меншою.

## 2.4.2 Вимірювання активної потужності трифазних мереж

Активну потужність трифазних систем змінного струму вимірюють одним із таких методів:

- 1) у трипроводових колах із рівномірним (симетричним) навантаженням ватметр вмикають лише в одну з фаз (метод одного ватметра).

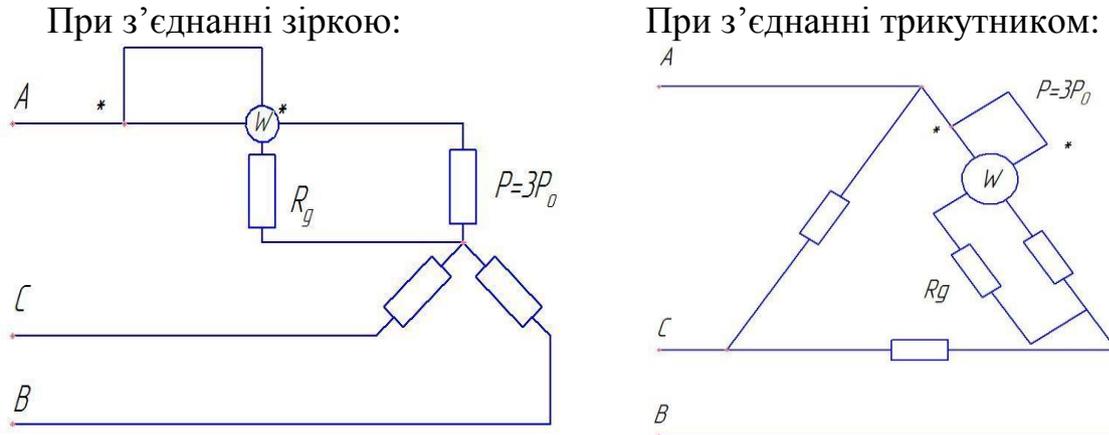


Рис. 2.28 Підключення ватметрів при симетричному навантаженні  
Тут  $R_d$  – додатковий опір,  $P_0$  – покази ватметра в одній із фаз.

Тоді потужність  $P$  усього кола

$$P = 3P_0.$$

Якщо нульова точка недосяжна, або немає можливості підключити ватметр в одну з фаз, то для вимірювання потужності застосовують схему зі штучною нульовою точкою.

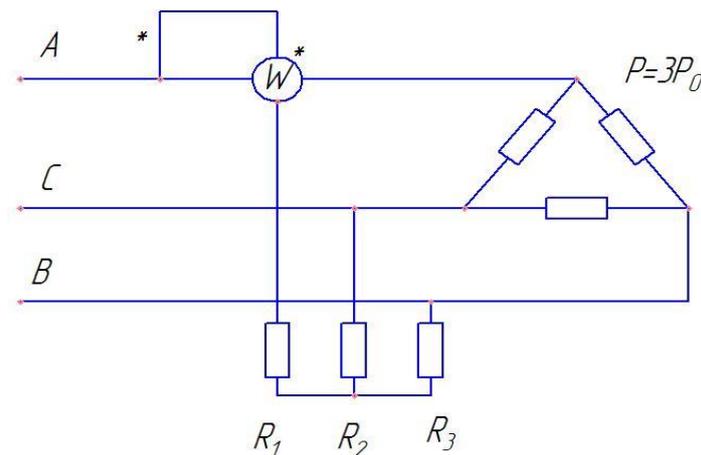


Рис. 2.29 Схема зі штучною нульовою точкою

При цьому для збереження симетрії повинна виконуватися вимога:

$$R_1 = R_2 = R_3,$$

де  $R_I = R_D + R_B$  – представляє собою суму опорів додаткового резистора та потенціальної котушки В.

Аналогічна схема і при з'єднанні "зіркою" (для симетричної системи).

2) У трипровідних колах з нерівномірним навантаженням використовують метод двох ватметрів, при цьому затискачі приладів підключають таким чином (рис 2.30)

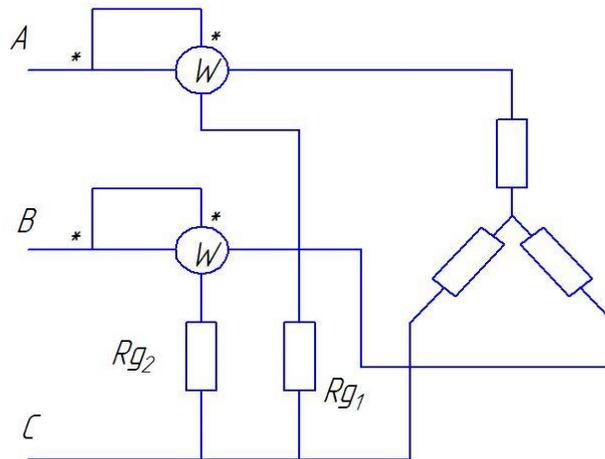


Рис. 2.30 Схема підключення ватметрів для несиметричного трипровідного кола

Значення активної потужності трифазного споживача у цьому випадку визначиться за алгебраїчною сумою показів двох ватметрів

$$P = P_1 + P_2,$$

де  $P_1, P_2$  – показання ватметрів, увімкнених у дві фази, причому за струмом прилади можна увімкнути у фази А та В, тоді за напругою їх необхідно підключити у фазу С, тобто за напругою котушки вмикаються у вільну фазу.

Підкреслимо, що для визначення потужності трифазного споживача необхідно брати алгебраїчну суму показів ватметрів, бо існують фазові зсуви між відповідними напругами та струмами, тому покази ватметрів навіть при повній симетрії будуть відрізнятися на певний кут. Таким чином, необхідно чітко дотримуватися правильного під'єднання генераторних затискачів ватметрів.

Аналогічно ватметри вмикаються і при з'єднанні "Δ".

3) У чотирипровідних колах трифазного струму з нерівномірним навантаженням потужність вимірюють трьома ватметрами.

Тоді повна потужність системи буде рівна:

$$P = P_1 + P_2 + P_3,$$

де  $P_1, P_2, P_3$  – покази ватметрів, увімкнених у відповідні фази.

Схема підключення приладів має вигляд (рис. 2.31)

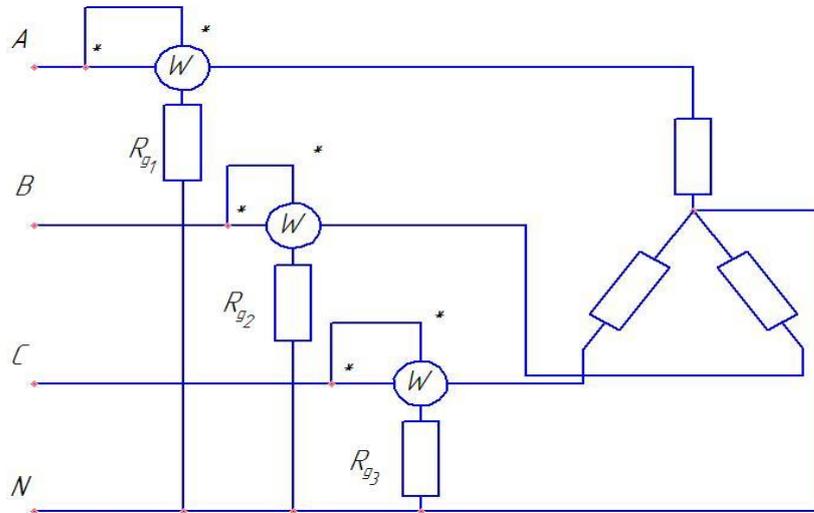


Рис. 2.31 Схема підключення ватметрів для несиметричного чотирипровідного кола

Існують спеціальні трифазні двоелементні (для трипровідної мережі) та триелементні (для чотирипровідної мережі) ватметри, окремі вимірювальні механізми яких встановлені на спільній вісі, що дає можливість прямого вимірювання трифазної потужності одним приладом.

У деяких випадках при вимірюванні великих потужностей застосовують вимірювальні трансформатори струму і напруги (ВТС та ВТН), через які підключаються струмова та потенціальна обмотки:

$$P_1 = k_{IH} k_{UH} \cdot P,$$

де  $P_1$  – шукана потужність первинного кола;  $k_{IH}$ ,  $k_{UH}$  – номінальні коефіцієнти трансформації відповідно за струмом та за напругою;  $P$  – покази ватметра.

## 2.4.2 Вимірювання реактивної потужності

Реактивну потужність на змінному струмі

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi \text{ [Var]}$$

вимірюють тими самими методами, що й активну потужність, але застосовують спеціальні схеми ввімкнення ватметрів.

Реактивний ватметр (варметр) відрізняється від звичайного тим, що він має ускладнену схему паралельного ланцюга, у який включають реактивний опір (наприклад, додаткова індуктивність  $L_d$ ) із наміром отримати зсув по фазі  $\varphi = 90^\circ$  між векторами струму та напруги цього ланцюга (рис. 2.32). Опір  $R_{ш}$  тут використовують для шунтування

(зменшення) активної складової опору паралельної котушки приладу. Однофазні варметри, як і однофазні реактивні лічильники, зважаючи на їх обмежене застосування, промислово не виготовляються.

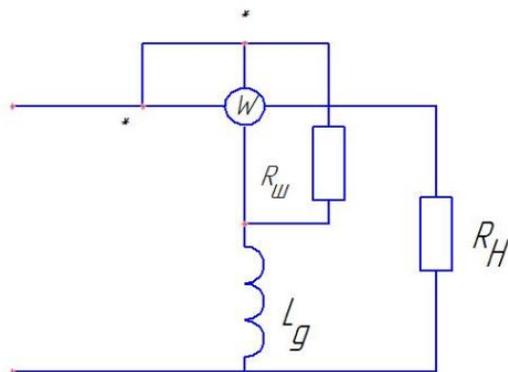


Рис. 2.32 Схема однофазного варметра

Виміряти реактивну потужність трифазного ланцюга можна різними способами: за допомогою звичайних ватметрів, які вмикають за спеціальними схемами, та за допомогою реактивних варметрів.

Наприклад, у випадку повної симетрії у трифазному ланцюзі реактивну потужність можна виміряти одним ватметром, який увімкнений за схемою:

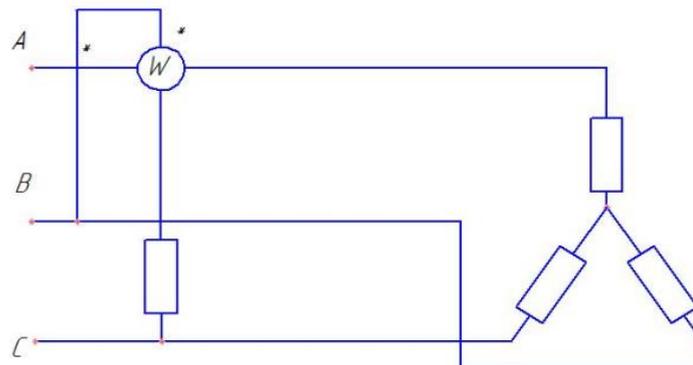


Рис. 2.33 Схема підключення приладу при симетричному навантаженні

Тут реактивна потужність  $Q = U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \cos(90^\circ - \varphi) = U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \sin \varphi$ .

Необхідний зсув фаз у  $90^\circ$  у трифазних мережах забезпечується увімкненням потенціальної котушки в інші фази, ніж струмова.

Для несиметричного навантаження використовують метод двох ватметрів, які вмикають аналогічно, тобто генераторний затискач котушки напруги необхідно під'єднувати до лінії, що йде наступною в порядку чергування фаз відносно лінії, в яку ввімкнена струмова обмотка (рис. 2.34).

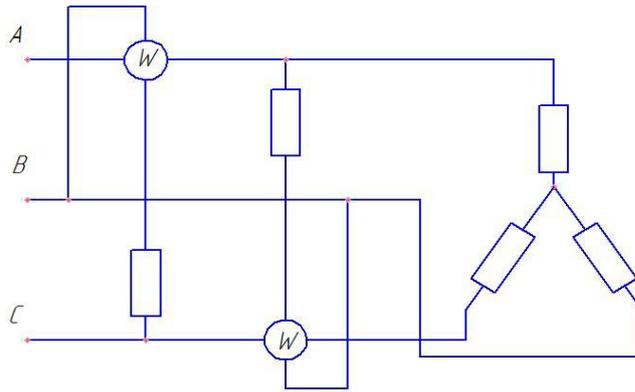


Рис. 2.34 Підключення приладів при несиметричному навантаженні  
За таким же принципом підключаються й триелементні прилади.

#### 2.4.4 Вимірювання енергії електромеханічними приладами

Енергію вимірюють аналогічними методами, що й потужність, тільки у схеми замість ватметрів вмикають лічильники.

Відомо, що енергія – це потужність, споживана за час  $t$ ,

$$W = \int_0^t P dt .$$

На змінному струмі для активної енергії

$$W_a = \int_0^t UI \cos \varphi dt ;$$

для реактивної енергії

$$W_p = \int_0^t UI \sin \varphi dt .$$

Для вимірювання та обліку енергії постійного струму застосовують електродинамічні та феродинамічні лічильники електричної енергії. В колах змінного струму промислової частоти вимірювання енергії здійснюється головним чином за допомогою індукційних лічильників енергії, котрі, як і ватметри, можна вмикати в схеми з ВТС та ВТН.

**Основні характеристики електромеханічних лічильників:**

1) номінальна (фабрична) стала  $C_o$ , яка залежить від конструкції лічильника,

$$C_o = \frac{W}{n} , \left[ \frac{Bm \cdot c}{об} \right],$$

де  $W$  – енергія, що має реєструвати лічильник за певну кількість обертів диска  $n$ . Ці дані беруть із передаточного числа, яке записане на лицьовій панелі лічильника, наприклад  $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 5000 \text{ об}$ ;

2) дійсна стала  $C$  – кількість енергії, дійсно витраченої у навантаженні

за певну кількість обертів диска

$$C = \frac{Pt}{n}, \left[ \frac{Вт \cdot с}{об} \right],$$

де  $P$  – потужність у навантаженні;  $n$  - кількість обертів, що зробить диск лічильника за час  $t$ ;

3) відносна похибка лічильника

$$\delta = \frac{C_o - C}{C_o} 100 \% .$$

Для обліку енергії, спожитої трифазними ланцюгами застосовують одно-, дво- та трьохдисківі індукційні лічильники. Для трифазного симетричного ланцюга застосовують однодисківі одноелементні лічильники, тут під елементом розуміють пару котушок – струмову та потенціальну.

Для трипровідного несиметричного кола застосовують однодисківі двоелементні лічильники, у яких дві пари елементів впливають на один і той же диск. Недолік таких лічильників – взаємний вплив елементів один на одного. Помилку виключають застосуванням дводисківих двоелементних лічильників.

Для чотирипровідних кіл застосовують триелементні дводисківі або триелементні трьохдисківі лічильники.

На електричних схемах лічильники зображуються аналогічно відповідним ватметрам, але на відміну від них, позначаються іншими буквами: РІ – лічильник активної енергії; РК – лічильник реактивної енергії.

Основним недоліком індукційних лічильників є їх порівняно невисокий клас точності (не краще за 1,0) та вузький частотний діапазон, тому в наш час для вимірювання енергії масово переходять на цифрові лічильники.

### 3. МОСТОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА ОСЦИЛОГРАФИ

#### 3.1 Вимірювальні мости постійного струму

Мостові схеми є однією з найпоширеніших реалізацій диференційного (різницевого) методу вимірювань.

Мости підрозділяються на зрівноважені та незрівноважені, постійного та змінного струму, чотирьохплечі та багатоплечі. Зрівноважені мости застосовуються тільки у лабораторній практиці або для перевірки зразкових та робочих засобів. Незрівноважені мости знайшли застосування у промисловості для контролю та керування технологічними процесами.

Найпростішою схемою моста є схема так званого одинарного моста (рис. 3.1,а). Резистори  $R1$ ,  $R2$ ,  $R3$  і  $R4$  (їх називають плечами моста) з'єднують у коло. Точки з'єднання опорів називають вершинами моста. До двох протилежних вершин під'єднують джерело живлення  $GB$ , а до двох інших - нуль-індикатор (НІ), які утворюють, відповідно, діагональ живлення та індикаторну діагональ ( $AB$ ). В якості НІ у мостах постійного струму використовуються мікроамперметри магнітоелектричної системи або магнітоелектричні гальванометри. У мостах змінного струму застосовуються вібраційні або осцилографічні гальванометри.

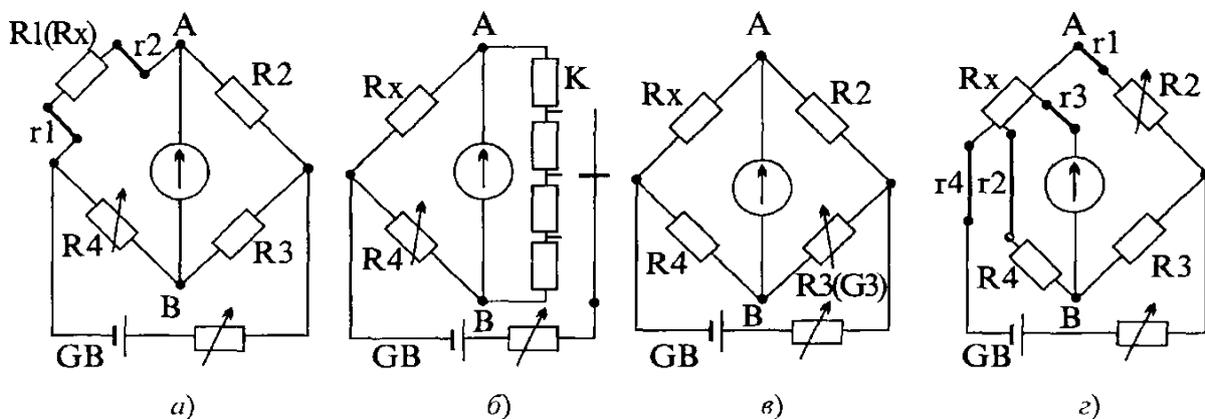


Рис. 3.1 Принципові схеми одинарних мостів постійного струму

Залежно від наявності чи відсутності напруги в індикаторній діагоналі у момент відліку вимірюваної величини мости поділяють на зрівноважені і незрівноважені. Незрівноважені мости знайшли переважне застосування при вимірюваннях неелектричних величин, попередньо перетворених на електричний опір, а також в процентних мостах, що вимірюють відхилення опору від номінального значення.

Зрівноважені мости є засобами точних вимірювань електричних опорів.

**Умовою рівноваги моста** є рівність нулю різниці напруг між точками  $A$  і  $B$ , що спостерігається при виконанні рівності

$$R_1 R_3 = R_2 R_4,$$

тобто добутки опорів протилежних плечей повинні бути рівні між собою.

Оскільки умова рівноваги моста визначається лише співвідношенням опорів плеч моста і не залежить від напруги джерела живлення, то до джерел живлення не висувається жодних спеціальних вимог. Завдяки цій особливості мостові вимірювальні кола знайшли широке практичне застосування.

Якщо один із опорів плеч моста є невідомим, то його значення можна визначити через опори інших трьох плеч, наприклад,

$$R_x = R_1 = R_4 \frac{R_2}{R_3} .$$

Як видно з цього рівняння, значення опору  $R_x$  прирівнюється до значення опору у масштабі відношення  $R_2 / R_3$ . Плечі  $R_x$  і  $R_4$  суміжні в мостовій схемі, називають плечами порівняння (найчастіше цю назву застосовують тільки до плеча  $R_4$ ). Два інші суміжні між собою плечі моста, опори яких входять до рівняння у вигляді відношення  $R_2 / R_3$ , називають плечами відношення.

У широкодіапазонних одинарних мостах постійного струму плече порівняння виготовляють у вигляді важільного магазину опорів, який використовують для плавного ручного зрівноважування моста (рис. 3.1,б). Сумарний опір плеча порівняння становить здебільшого 10 000 Ом, а дискретність 0,1; 0,01 або 0,001 Ом. Необхідне відношення  $R_2 / R_3$  встановлюється незалежною зміною кожного з них, якщо вони виконані, наприклад, у вигляді штепсельних магазинів опорів (тоді  $R_2$  і  $R_3$  можуть мати 10, 100, 1000 і 10000 Ом), або зміною відношення опорів цих плеч при незмінній сумі  $R_A + R_B$  (тоді відношення  $R_2 / R_3$  подається у вигляді коефіцієнта  $K$ , значення якого здебільшого дорівнює 0,01; 0,1; 1; 10 або 100).

На рис. 3.1,в подано схему одинарного моста, в якому регульовальним є плече, протилежне до  $R_x$ . Такі мости часто називають мостами добутку чи мостами провідності, оскільки вимірюваний опір визначається за формулою:

$$R_x = R_1 = R_4 R_2 G_3 .$$

Такі мости знайшли переважне застосування в автоматичних цифрових мостах постійного струму.

Нижня границя вимірювання одинарних мостів за найпростішою двозатискачевою схемою ввімкнення вимірювального опору обмежується похибками, які вносять опори  $r_1$  і  $r_2$  з'єднувальних дротів і перехідних контактів і переважно буває не нижче ніж 50 Ом. Використання

чотиризатискачевої схеми увімкнення (рис. 3.1,г) дає можливість розширити нижню границю вимірювань одинарних мостів до  $0,5 \dots 0,001 \text{ Ом}$ . Дійсно, в момент рівноваги опори з'єднувальних дротів  $r_3$  і  $r_4$  не впливають у цій схемі на результат вимірювань, оскільки вони увімкнені в діагоналях моста відповідно послідовно з джерелом живлення і нуль-індикатором, а вплив опорів  $r_1$  і  $r_2$  значно зменшується внаслідок того, що вони додаються до плечей моста, які вибирають значно більшими від  $R_x$ . Щоб звести цей вплив до мінімального, у деяких мостах опори плечей  $R_2$  і  $R_4$  зменшують заздалегідь на значення опору  $R_k$  каліброваних з'єднувальних дротів, за допомогою яких вимірювані опори під'єднуються до моста.

### 3.2. Мости змінного струму

Мости змінного струму призначені, в основному, для вимірювань комплексних опорів. Найпростішими і найпоширенішими є чотириплечі мости змінного струму (рис. 3.2). Умова рівноваги такого моста має вигляд:

$$\dot{Z}_1 \dot{Z}_3 = \dot{Z}_2 \dot{Z}_4,$$

де  $\dot{Z}_1, \dot{Z}_2, \dot{Z}_3, \dot{Z}_4$  – комплексні значення опорів плеч моста.

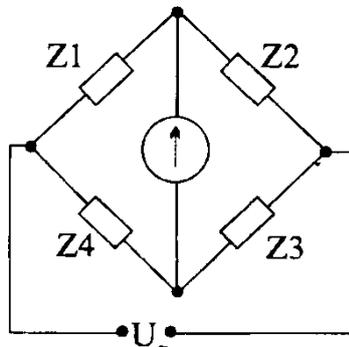


Рис. 3.2 Типова схема моста змінного струму

Виразивши комплексний опір через модуль і фазу  $\dot{Z} = Z e^{j\varphi}$ , отримаємо умову рівноваги мосту

$$Z_1 Z_3 e^{j(\varphi_1 + \varphi_3)} = Z_2 Z_4 e^{j(\varphi_2 + \varphi_4)}.$$

Остання рівність виконується при виконанні двох рівностей

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4 \quad \text{і} \quad \varphi_1 + \varphi_3 = \varphi_2 + \varphi_4.$$

Якщо перша рівність визначає необхідне співвідношення модулів плечей моста, то друга - співвідношення фазових зсувів і показує також,

якого характеру повинні бути елементи окремих плечей (ємнісного, індуктивного або чисто активного), щоб забезпечувалась можливість рівноваги моста.

Реальний комплексний електричний опір є досить складним об'єктом як і з зосередженими, так і з розподіленими параметрами, однак у більшості випадків досліджуваній комплексний опір (опір конденсаторів, котушок індуктивності) можна подати у вигляді еквівалентної схеми заміщення, що містить ємність  $C$  чи індуктивність  $L$ , які послідовно або паралельно з'єднані з електричним опором  $R$  (послідовна або паралельна схеми заміщення).

Отже, у випадку зображення комплексного електричного опору у вигляді двох складових для зрівноваження моста змінного струму необхідно мати в складі його плечей два регулювальні елементи: регулювальний зразковий опір та регульовану зразкову ємність (або індуктивність).

Враховуючи вищесказане та позначивши  $\dot{Z}=R+jX$ , отримаємо інше рівняння для умови рівноваги моста змінного струму:

$$(R_1 + jX_1)(R_3 + jX_3) = (R_2 + jX_2)(R_4 + jX_4).$$

А після розділення дійсних та уявних складових отримаємо умову рівноваги у вигляді двох рівнянь:

$$R_1R_3 - X_1X_3 = R_2R_4 - X_2X_4$$

$$R_1R_3 + R_3X_1 = R_2X_4 + R_4X_2.$$

У загальному випадку для зрівноваження моста змінного струму необхідно змінювати по черзі значення двох регулювальних елементів плечей моста (активного та реактивного опорів). Мірою досконалості моста відносно швидкості досягнення рівноваги є так звана **збіжність**, яка характеризується кількістю почергових регулювань, необхідних для досягнення умови рівноваги.

У реальних конструкціях важливо мати такі співвідношення параметрів плечей моста, щоб складові вимірюваного опору могли бути визначені незалежно одна від іншої через відомі значення регулювальних елементів плечей моста, які в цьому випадку можна проградувати в значеннях відповідних складових вимірюваної величини. Такі мости називають мостами з незалежним відліком.

Умови рівноваги мостів змінного струму можуть бути залежними або незалежними від частоти напруги живлення. Мости, в яких умова рівноваги не залежить від частоти, називають частотно-незалежними, а ті, в яких присутня така залежність, - частотно-залежними. Останні використовуються також і для вимірювання частоти.



сталого значення, широкий частотний діапазон. Схеми таких мостів дозволяють проводити вимірювання в окремих випадках з точністю до 0,01...0,002%.

Цифрові мости змінного струму мають вимірювальне коло також у вигляді чотириплечого моста з двома плавно-регульованими елементами плеч моста відповідно до принципу дії моста змінного струму, а процес зрівноваження безумовно складніший, ніж в цифрових мостах постійного струму. Цифрові мости змінного струму призначені для вимірювань ємності, тангенса кута діелектричних втрат, індуктивності, опору, сталої часу, а також для допускового контролю ємності, індуктивності та кута втрат при відбракуванні цих елементів під час їх виробництва.

### 3.3 Мостові методи вимірювань параметрів R,L,C

Мостовий метод вимірювань параметрів комплексного опору є найдосконалішим та найбільш вивченим, таким, що забезпечує найвищу точність та широкі функціональні можливості, попри складність будови мостів, необхідність великої кількості зразкових засобів та пристроїв керування.

На рис. 3.4 наведені деякі схеми мостів змінного струму для вимірювань ємності та індуктивності.

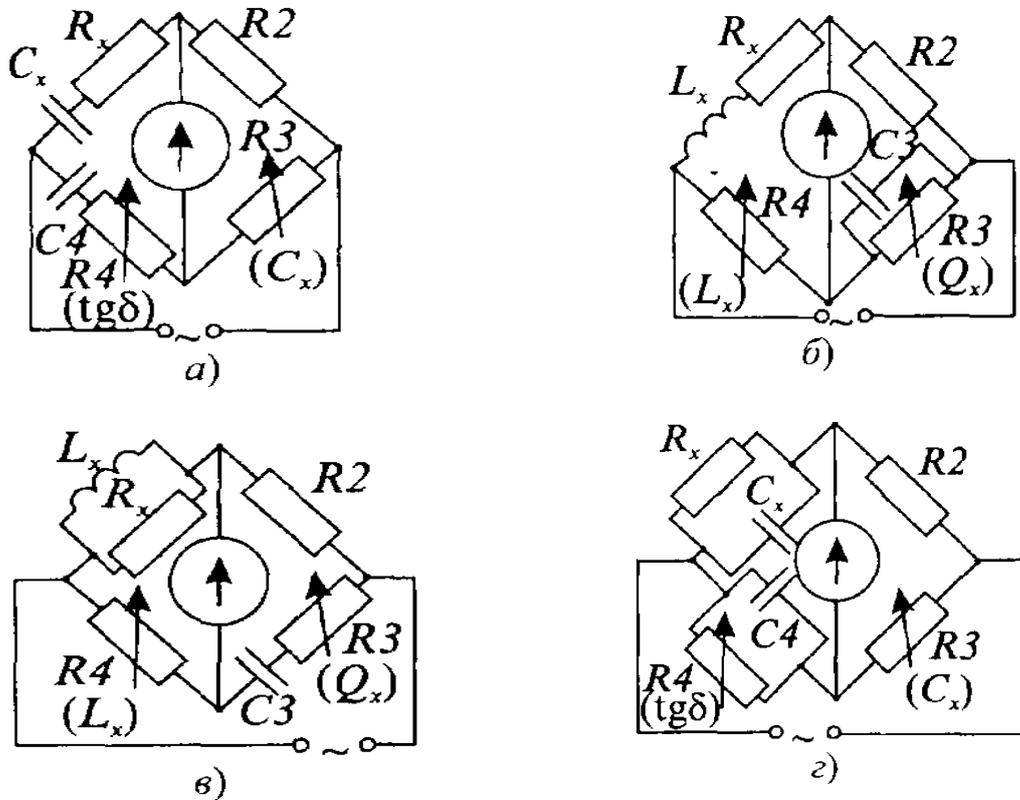


Рис. 3.4 Схеми мостів змінного струму для вимірювання ємності та індуктивності

Схему, яку показано на рис.3.4,а, використовують для вимірювання ємності конденсаторів з малими втратами, умова рівноваги такого моста має вигляд:

$$(R_X + \frac{1}{j\omega C_X}) \cdot R_3 = (R_4 + \frac{1}{j\omega C_4}) \cdot R_2 ,$$

звідки

$$R_X = \frac{R_2}{R_3} \cdot R_4; \quad C_X = \frac{R_3}{R_2} \cdot C_4; \quad tg\delta_X = \omega R_X C_X = \omega R_4 C_4 .$$

Тут  $tg\delta$  – тангенс кута діелектричних втрат конденсатора.

З наведених формул видно, що регулювальними елементами плеч моста доцільно вибрати резистори  $R_3$  і  $R_4$ , кожен з яких входить тільки в одне з рівнянь для  $C_X$  та  $tg\delta$ , причому резистор  $R_3$  можна градуювати в значеннях  $C_X$ , а  $R_4$  – в значеннях  $tg\delta$ .

Частотно-незалежний міст (рис. 3.4,б) використовують для вимірювань індуктивності з низькою добротністю  $Q_X$ . Значення вимірюваних параметрів визначають, відповідно, як:

$$L_X = C_3 R_2 R_4 ,$$

$$R_X = R_2 \frac{R_4}{R_3} ,$$

$$Q_X = \omega C_3 R_3 .$$

Тут регулювальними є плечі  $R_3$  (для ‘ $Q_X$ ’) та  $R_4$  (для ‘ $L_X$ ’)

Аналогічно для рис. 3.4,в (вимірювання ємності конденсаторів з великими втратами) маємо:

$$C_X = C_2 \frac{R_3}{R_2} ,$$

$$R_X = R_4 \frac{R_2}{R_3} ,$$

$$tg\delta_X = \frac{1}{\omega R_X C_X} = \frac{1}{\omega R_4 C_4} ,$$

де регулювальними є  $R_3$ (для ‘ $C_X$ ’) та  $R_4$  (для ‘ $tg\delta_X$ ’), а також для рис. 3.4,г (вимірювання індуктивності з малою добротністю):

$$L_X = C_3 R_2 R_4 ,$$

$$R_x = R_2 \frac{R_4}{R_3},$$

де регулювальними є  $R_4$  (' $L_x$ ') та  $R_3$  (' $Q_x$ ').

Конструктивно мости змінного струму виготовляються з вмонтованими нуль-індикаторами, джерелами живлення, найчастіше на фіксовані частоти 50, 1000, 5000, 10000 Гц.

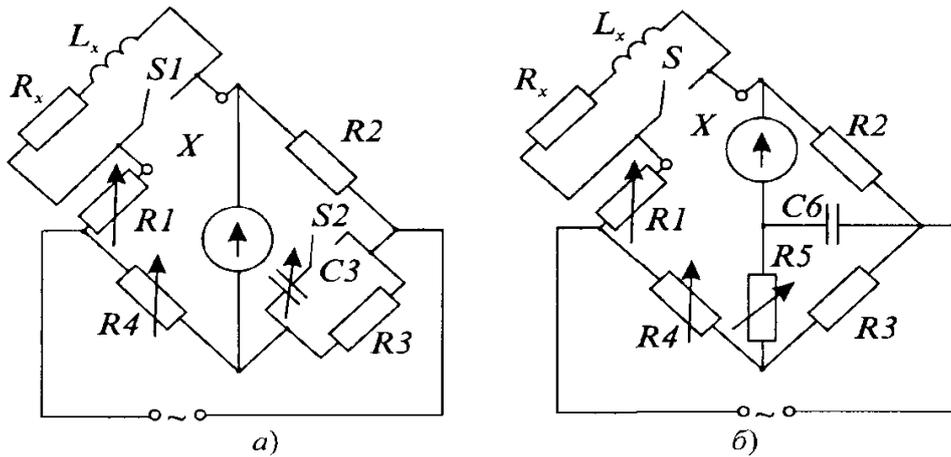


Рис. 3.5 Схеми мостів змінного струму з двома зрівноваженнями

Для підвищення точності вимірювань активної складової та, відповідно, добротності, а в окремих промислових мостах змінного струму для вимірювань параметрів котушок індуктивності передбачена можливість двох зрівноважень. При першому зрівноваженні, коли до затискачів 'X' (рис. 3.6,а) увімкнена досліджувана котушка індуктивності, визначають

$$L_x = C_3 R_2 R_4,$$

а при другому зрівноваженні, коли затискачі 'X' закорочені, а ємність  $C_3$  від'єднана від плеча моста, визначають

$$R_x = R_2 \frac{R_4}{R_3} - R_1.$$

### 3.4 Осцилографи

Електричні коливання (сигнали) можна визначати як у часовій області, так і в частотній. У часовій області електричне коливання насамперед характеризується його формою — залежністю миттєвого значення від часу.

Наочне, або візуальне відтворення форми коливань є важливим завданням радіотехнічних вимірів, оскільки форма дозволяє одразу оцінити багато параметрів коливань. Одним з основних приладів, що служать для візуального спостереження й дослідження форми електричних

сигналів, є осцилограф ( від латинської «осциллум» — коливання й грецької «графо» — пишу).

Значна частина сучасних осцилографів, що перебувають в експлуатації, оснащена електронно-променевою трубкою (ЕПТ) і їх називають електронно-променевими осцилографами. Разом з тим, в останніх розробках осцилографів в якості пристроїв відображення застосовують матричні індикаторні панелі (газорозрядні, плазмові, рідкокристалічні та ін.).

**Осцилограф** — вимірювальний прилад для візуального спостереження в прямокутній системі координат електричних сигналів і виміру їх параметрів.

За допомогою осцилографа можна спостерігати періодичні безперервні й імпульсні сигнали, неперіодичні й випадкові сигнали, одиночні імпульси й оцінювати їхні параметри.

Найчастіше за допомогою осцилографа спостерігають залежність напруги від часу, причому, як правило, віссю часу є вісь абсцис, а по осі ординат відкладається рівень сигналу. По зображеннях, одержуваних на екрані осцилографа, можуть бути виміряні амплітуда, частота й фазові зсуви, параметри модульованих сигналів, часові інтервали й ряд інших параметрів. На базі осцилографа створені прилади для дослідження перехідних, частотних й амплітудних характеристик різних радіотехнічних пристроїв.

Для багатьох цілей розроблені і використовуються різні типи осцилографів: універсальні, стробоскопічні, запам'ятовуючі та спеціальні, що призначені для виконання вузького кола задач. Також осцилографи поділяються на аналогові та цифрові. Аналогові осцилографи мають знайомий інтерфейс, миттєве оновлення екрана при відображенні сигналу, прості й зрозумілі органи управління. До недоліків таких осцилографів можна віднести невисоку точність й обмеження засобів для виміру деяких параметрів сигналів.

Відрізняючись технічними характеристиками, схемними й конструктивними розв'язками, всі ці осцилографи використовують спільний принцип отримання осцилограм. Можливість спостереження форми досліджуваного сигналу й одночасний вимір його параметрів висувають осцилограф в розряд універсальних приладів.

Спрощена структурна схема електронно-променевого осцилографа наведена на рис. 3.6.

Основний елемент осцилографа – **електронно-променева трубка** (ЕПТ). Вона призначена для відображення на екрані інформації, поданої напругами на її електроди. У загальному випадку ЕПТ має катод ("гарячий" або "холодний"), керуючий електрод (сітку) і систему анодів. Сукупність цих електродів часто називають "електронною пушкою". Її

основне призначення – вироблення сфокусованого пучка електронів із потрібною густиною.

**Густина електронів** у пучку, тобто яскравість променя на екрані, визначається різницею потенціалів між сіткою та катодом, вона регулюється потенціометром R1 .

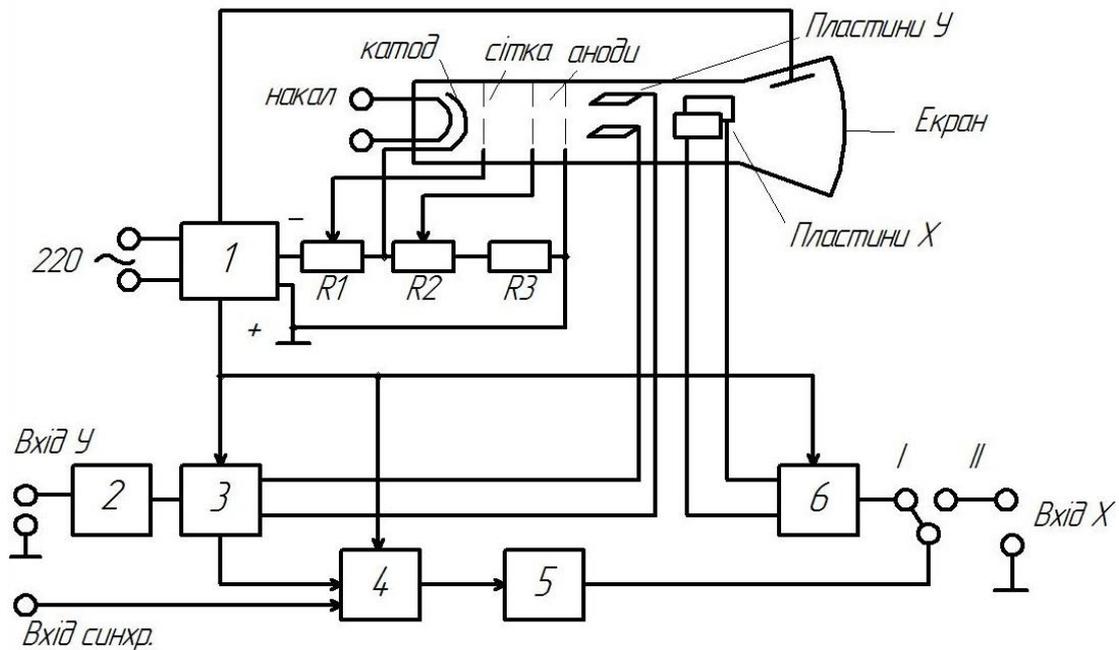


Рис. 3.6 Структурна схема електронно-променевого осцилографа

**Фокусування променя** здійснюється в полі між першим і другим анодом та регулюється потенціометром R2, що змінює напругу на першому аноді. Щоб надати електронам швидкість, необхідну для світіння люмінофора, на другий анод подається досить велика (до 2000 В) позитивна напруга. Для додаткового **прискорення електронів** використовують ще один анод, до якого прикладена висока позитивна напруга ( до 10...15 кВ).

Електронний пучок потрапляє на внутрішню торцеву поверхню колби і викликає світіння люмінофора, яким вкрита поверхня. Для переміщення світлової плями по екрану використовується відхильна система, що складається з двох пар пластин, розміщених во взаємно перпендикулярних площинах. Різниця потенціалів вертикально розміщених пластин X визначає положення променя по горизонталі. Ці пластини називаються горизонтально відхильними. Різниця потенціалів горизонтально розміщених пластин Y визначає положення променя по вертикалі. Їх називають вертикально відхильними.

Крім ЕПТ, осцилограф має такі електронні вузли.

**Випрямляч 1**, призначений для перетворення змінної напруги у постійну, яка необхідна для живлення електродів ЕПТ і всіх інших вузлів. Живлення електродів здійснюється за допомогою дільника напруги R1, R2,

R3. Цей дільник забезпечує негативну напругу на сітці (відносно катода) та позитивну напругу на анодах (відносно катода).

**Вхідний дільник (атенюатор) 2** призначений для послаблення досліджуваного сигналу, який подається на вхід Y. Завдяки цьому дільнику можна вибирати зручний розмір зображення по вертикалі досліджуваної напруги при вимірюванні її амплітуди в широких межах. Він являє собою резистивно-ємнісний дільник, який на малих частотах працює як омичний, а на високих частотах – як ємнісний дільник.

**Підсилювач вертикального відхилення 3**, призначений для підсилювання досліджуваних сигналів, має регульований коефіцієнт підсилення і разом з дільником 2 дозволяє спостерігати на екрані ЕПТ напруги, амплітуда яких змінюється в дуже широких межах.

**Генератор 5 напруги розгорнення**, призначений для створення напруги, що повільно лінійно зростає (прямий хід), із крутим зрізом (зворотний хід). Через форму таку напругу розгорнення часто називають пилкоподібною. У генераторах розгорнення коливання створюються за допомогою ланцюгів, які мають активний опір та який-небудь реактивний елемент – частіше усього ємність. У більшості сучасних осцилографів при використанні лінійної розгортки застосовують спеціальні схеми гасіння зворотного ходу променя, які забезпечують ввімкнення променя тільки під час робочої частини періоду напруги, яка лінійно змінюється. Це робиться для того, щоб зворотній хід променя по екрану не накладався на картинку. Принцип дії таких схем полягає в тому, що на початку зворотного ходу до сітки підводиться велика від'ємна напруга, яка запирає трубку. На початку робочого ходу ця напруга знімається і трубка може знову пропускати струм.

Напруга розгорнення забезпечує переміщення променя по горизонталі ЕПТ, тобто розгорнення досліджуваної напруги в часі. Частота генератора розгортки 5 регулюється в широких межах, тому можна спостерігати напругу широкого діапазона частот, а також досліджувати окремі ділянки напруги (наприклад, фронти і зрізи імпульсів). Основною для осцилографа є лінійна розгортка, яка розділяється на декілька видів: **неперервна** (автоколивальна), при якій генератор розгортки автоматично періодично запускається і при відсутності сигналу запуску на його вході; **чекаюча**, при якій генератор запускається тільки за наявності сигналу запуску та **однократна** розгортка, коли генератор запускається один раз з наступним блокуванням. Однократна розгортка використовується для спостереження одиночних та неперіодичних процесів.

**Блок синхронізації 4**, призначений для керування генератором 5 з метою одержання стійкого зображення на екрані ЕПТ, тобто кратності частот досліджуваної напруги та напруги розгортки. Розрізняють два види синхронізації: внутрішню і зовнішню. При **внутрішній синхронізації** генератор розгорнення запускають дослідною напругою, а при **зовнішній**

– зовнішньою напругою, що подається на спеціальний вхід синхронізації або напругою мережі (мережна синхронізація).

**Підсилювач 6 горизонтального відхилення**, призначений для збільшення напруги розгорнення до потрібної величини. За допомогою перемикача підсилювач підключається або до виходу генератора 5 (положення I), або до зовнішньої напруги, яку подають на вхід X (положення II). В останньому випадку можуть бути виміряні зсув фаз між напругами, поданими на входи X і Y, та частота однієї із цих напруг (якщо частота другої відома). Крім цього, при рівності напруг і зсуву фаз між ними в  $90^0$  можна одержати колову розгортку, що застосовується для спеціальних досліджень.

Осцилографи оснащуються також **калібраторами** – спеціальним устаткуванням, що дозволяє точно встановлювати чутливість по вертикалі (вольти/поділку) і по горизонталі (секунди/поділку), тобто використовувати осцилограф для вимірювання.

Якщо необхідно відтворити на екрані одночасно дві або декілька вимірюваних величин, то в таких випадках застосовують **багатопроменеві осцилографи**, які з'явилися завдяки розвитку мікроелектронної техніки та технології виготовлення спеціальних електронно-променевих трубок. Існують два різновиди таких спеціальних трубок. В одних двоканальних осцилографах є дві електронно-променеві системи, які вмонтовані в одну вакуумну трубку, що дозволяє одержати два незалежні зображення на одному екрані. Для цього кожній із двох пар відхильних пластин потрібні окремі вимірювальні підсилювачі та окремі розгортки в часі. Якщо для обох електронно-променевих систем потрібно мати спільну вісь часу, то в конструкції достатньо мати один спільний блок розгортки.

Для іншої групи дво- та багатопроменевих осцилографів, які тільки умовно можна назвати багатоканальними, є одна звичайна однопроменева трубка, а декілька вимірюваних величин відтворюються на екрані послідовно в часі внутрішнім перемиканням в осцилографі. Для цього в конструкцію додається комутатор. Якщо перемикання відбувається дуже швидко щодо швидкості зміни вимірюваних величин (за великої частоти досліджуваних сигналів), то на екрані при двох вимірюваних величинах матимемо дві переривчасті криві.

Для дослідження дуже повільних процесів і для подальшого їх розгляду буває потреба запам'ятовувати отримане зображення на досить тривалий час. Для цього використовуються спеціальні **запам'ятовувальні осцилографи**. Це осцилографи із запам'ятовувальними електронно-променевими трубками (з нагромадженням заряду), або більш сучасні цифрові запам'ятовувальні осцилографи.

Також існують спеціалізовані **стробоскопічні осцилографи**, які призначені для досліджування імпульсів наносекундної тривалості (тобто для високочастотних сигналів).

## 4. ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ТА ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ

### 4.1. Структурна схема цифрового вимірювального приладу. Дискретизація у часі та квантування за рівнем

Цифрові засоби вимірювальної техніки виникли через потреби практики в суттєвому підвищенні точності, швидкодії і чутливості засобів вимірювань. У свою чергу, їх висока швидкодія та точність привели до нагромадження великих масивів даних про результати вимірювань, що стимулювало здійснення повної автоматизації складних процедур прямих, опосередкованих, сукупних і сумісних вимірювань на основі засобів обчислювальної техніки. Необхідність в повній автоматизації різноманітних виробничих процесів та експериментальних досліджень з опрацюванням, накопиченням, передаванням на значні відстані і ресетрацією результатів вимірювань стало потужним стимулом у розвитку елементної бази цифрової вимірювальної техніки – мікроелектроніки.

Сьогодні цифрові засоби охоплюють практично всі вимірювані в промисловості та наукових дослідженнях фізичні величини. З метою уніфікації елементної бази та забезпечення зручності в користуванні, фізичним носієм вимірювальної інформації у них вибрані електричні сигнали, найчастіше напруга постійного струму, які мають ряд незаперечних переваг перед рештою сигналів, а саме: універсальність, дистанційність, наявність добре розроблених методів та засобів опрацювання, можливість ресетрації швидкоплинних процесів, простота узгодження із засобами цифрової обчислювальної техніки (комп'ютерами).

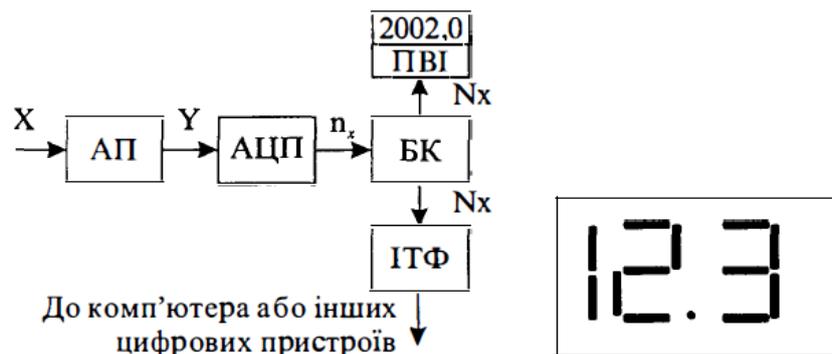


Рис. 4.1 Узагальнена структурна схема цифрового вимірювального приладу

Цифрові засоби вимірювальної техніки (рис. 4.1) в загальному випадку складаються із вхідного аналогового перетворювача (АП) вимірюваної фізичної величини  $X$  в електричну вихідну величину  $Y$ , аналого-цифрового перетворювача (АЦП), обчислювального та керуючого

блоку (БК), пристроїв відображення інформації (ПВІ) і стандартного (може бути і декілька, які працюють за різними стандартами обміну інформацією) інтерфейсу (ІТФ), що і визначило їх основну роль у вимірювально-обчислювальних комплексах.

З погляду функціонального призначення цифрові засоби вимірювальної техніки розділяються на аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), цифрові вимірювальні прилади та цифрові вимірювальні системи.

В аналого-цифровому перетворювачі здійснюються три базові операції над вхідною величиною: її часова дискретизація, квантування за рівнем і кодування отриманих квантованих значень. Дискретизація сигналу означає заміну неперервної в часі величини її окремими вибірками, взятими в певні моменти часу (рис. 4.2,а). Суть квантування полягає у заміні неперервних значень сигналу в області його інтенсивності (рівня) квантованими (дозволенними) значеннями – подібно як при заокругленні чисел (рис. 4.2,б).

Квантований номер, що відповідає вибірці вхідної величини в певний момент часу, зображується певним кодом і подається цифровим сигналом, який в більшості практичних випадків незалежно від використовуваної системи числення є бінарним, тобто подається лише двома різними рівнями. Загалом АЦП не мають відлікових і (або) реєструвальних пристроїв і є базовою частиною складніших приладів або вимірювально-обчислювальних систем. Сучасні інтелектуальні АЦП можуть видавати вихідні сигнали також і в аналоговому виді, здебільшого уніфікованих стандартних сигналів напруги або постійного струму.

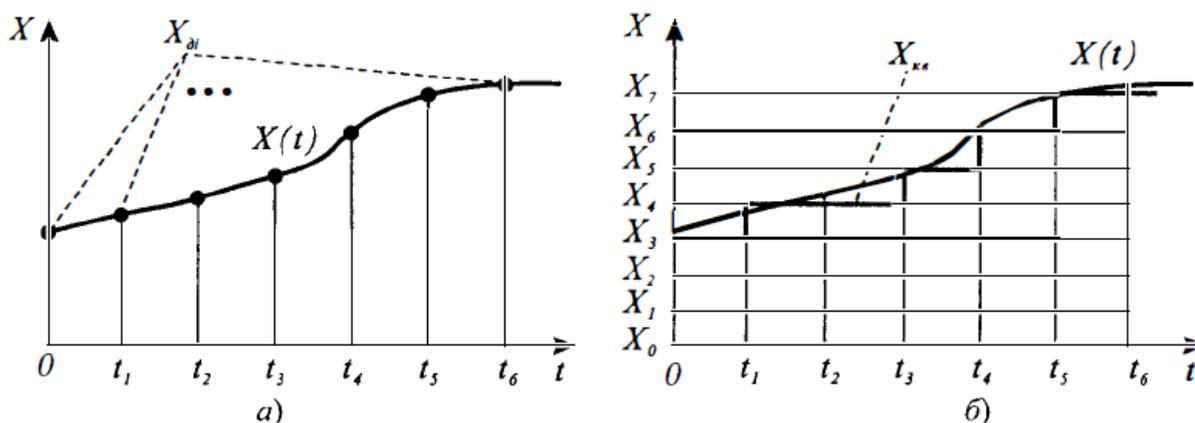


Рис. 4.2 Дискретизація в часі та квантування за рівнем вимірюваної величини

ЦАП призначені для зворотного перетворення кодових сигналів в пропорційні їм аналогові (напругу, струм, кут, тощо). Вони застосовуються при побудові деяких АЦП, формування кодо-керованих зразкових сигналів, а також (разом з вихідними підсилювачами, фільтрами, оберненими перетворювачами, тощо) для створення

аналогових сигналів, які використовують для збудження об'єкта дослідження.

Завдяки успіхам мікроелектроніки багато різновидів АЦП і ЦАП серійно виготовляються у вигляді інтегральних мікросхем, мають високі метрологічні характеристики при невеликій вартості та об'ємно-масових показниках.

Цифрові вимірювальні прилади (ЦВП) є засобами вимірювань у повному розумінні цього слова, вони автоматично видають числове значення вимірюваної величини на цифровому відліковому пристрої (цифровий індикатор, табло, дисплей тощо). В сучасних інтелектуальних цифрових приладах у блоці обчислення, побудованому на основі однокристальних мікроконтролерів, для визначення результату вимірювання у цифровій формі відбуваються такі вимірювальні операції, як корекція похибок (адитивних, мультиплікативних та нелінійних складових) вимірювального тракту, лінеаризація загальної функції перетворення, цифрова фільтрація та усереднення тощо.

**Цифровими вимірювальними системами (ЦВС)** називають сукупність вимірювальних каналів, вимірювальних пристроїв та інших технічних засобів, об'єднаних для створення та аналізу сигналів цифрової вимірювальної інформації про декілька одно- чи різнорідних вимірюваних величин та інших видів інформації.

**Вимірювальний канал** – це сукупність засобів вимірювальної техніки, засобів зв'язку та інших технічних засобів, призначених для створення сигналу вимірювальної інформації про одну вимірювану величину. Як правило, вимірювальний канал є складовою частиною вимірювальної системи.

**Інтерфейс** – це сукупність технічних і програмних засобів, а також правил (протоколів) для здійснення одно- або ж двостороннього обміну інформації між цифровими засобами. Через інтерфейс, як правило, забезпечується зв'язок із зовнішніми цифровими пристроями - ЕОМ, цифровими друкарними пристроями, засобами відображення вимірювальної інформації, пам'яттю тощо.

Крім цього, в багатьох сучасних цифрових приладах передбачений аналоговий вихідний сигнал, здебільшого, у вигляді стандартних уніфікованих сигналів постійного струму або напруги постійного струму для використання в системах керування технологічними процесами, для передачі на значні відстані, для здійснення аналогового відображення або реєстрації вимірювальної інформації, яке для оператора при наявності багатьох вимірюваних величин є більш інформативним порівняно з цифровим.

У зв'язку із швидким поширенням і розвитком спеціалізованих однокристальних мікро-ЕОМ та комп'ютерних мереж змінюються можливості і властивості цифрових вимірювальних систем. Крім функцій

збору та опрацювання отриманої вимірювальної інформації, з'являються нові можливості: аналіз даної інформації, інтелектуальні функції, пов'язані із змінами алгоритмів та структурних схем вимірювання і контролю необхідних величин досліджуваних об'єктів та вироблення сигналів керування для зміни стану контрольованого об'єкта.

Основними перевагами ЦВП є:

- висока швидкодія – до сотень мільйонів вимірювань за секунду, що об'єктивно вимагає використання засобів обчислювальної техніки для опрацювання результатів вимірювань;

- висока точність, яка, за умов наявності автоматичного калібрування і опрацювання результатів перетворень, може наближатися до точності робочих еталонів одиниць фізичних величин;

- відсутність суб'єктивних складових похибки відліку, наявність яких (при обмеженій довжині шкали) лімітує максимально можливу точність аналогових приладів;

- наявність кодового вихідного сигналу є зручним для його опрацювання, запам'ятовування, реєстрації і передачі на великі відстані без похибок та корекцією збоїв;

- можливість зменшення складових похибки вимірювального кола, в тому числі і систематичних, автоматичними калібруваннями і (або) уведенням поправок. Причому, в багатьох випадках, апаратна частина ЦВП не змінюється, переробляється тільки програмне забезпечення і перепрограмовуються постійні запам'ятовувальні пристрої, що особливо зручно в ЦВП для наукових досліджень;

- можливість забезпечення високої завадостійкості перетворення аналог-код за допомогою цифрової фільтрації результатів перетворень;

- можливість визначення статистичних параметрів вимірюваних процесів на базі програмної реалізації відомих теоретичних математичних залежностей.

До недоліків ЦВП слід віднести певну незручність для оператора у порівнянні даного показу з границями вимірювання. Якщо аналогову інформацію оператор оцінює миттєво, то цифрову – повинен запам'ятовувати та зіставляти з границями вимірювання. Час зчитування показів та імовірність помилок при цьому зростає, що й послужило основною причиною для використання аналогових засобів вимірювань на диспетчерських пультах складних технічних об'єктів, наприклад, електростанцій.

## **4.2. Аналого-цифрове перетворення**

Як було зазначено вище, основним та найважливішим вузлом будь-яких цифрових вимірювальних засобів є АЦП, від метрологічних параметрів якого прямо залежать параметри вимірювального засобу в цілому. При аналого-цифровому перетворенні, у загальному випадку,

виконуються операції дискретизації вимірюваної величини в часі, квантування її за рівнем та кодування у певній системі числення.

У дискретизованому сигналі відсутні проміжні значення вхідного сигналу між мітками часу  $t_i$  та  $t_{i+1}$ . Завдяки цьому може втрачатися вимірювальна інформація про проміжні значення сигналу, тобто виникає похибка від дискретизації. Крім того, завжди існує певна, не нульова, тривалість аналого-цифрового перетворення сигналу, яка залежить від використовуваного методу перетворення та швидкодії елементної бази АЦП. Тому під час дискретизації сигналу можна розглядати дві часові характеристики цього процесу: (1) – часовий інтервал поміж між почерговими вимірюваннями сигналу (при сталому часі його називають періодом дискретизації сигналу  $T_\delta = t_{i+1} - t_i$ ); і (2) - інтервал часу  $T_{a/c}$  аналого-цифрового перетворення сигналу - час, який необхідно затратити, щоб отримати один цифровий результат вимірювання сигналу. Відповідно до цього при цифрових вимірюваннях розглядають похибки двох різновидів (рис. 4.3):

- 1) похибка  $\Delta T_\delta(t)$ , що пов'язана зі зміною вимірюваного сигналу за час між окремими вибірками (інтервал дискретизації);
- 2) похибка  $\Delta T_{a/c}(t)$ , що пов'язана зі зміною сигналу за час його аналого-цифрового перетворення.

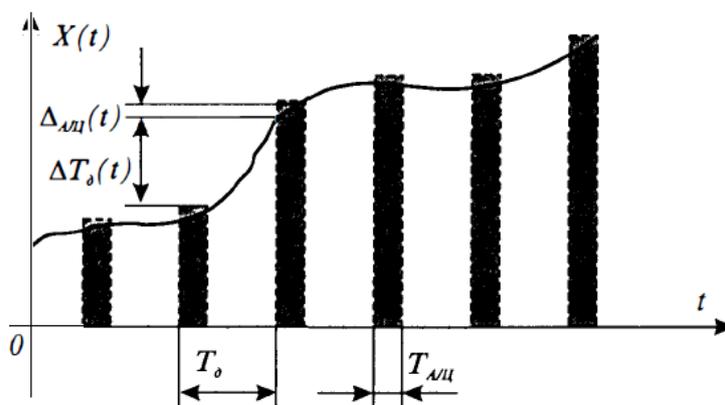


Рис. 4.3 Похибки дискретизації при аналого-цифровому перетворенні

При відомому періоді дискретизації перша складова похибки однозначно залежить від властивостей зміни вимірюваного сигналу і способу наступного використання результатів його вимірювань.

Якщо до отримання наступної вибірки  $X_{i+1}$  за поточне значення сигналу  $x(t)$  приймається стале значення, яке дорівнює значенню попередньої вибірки  $X$ , (відтворення сигналу подібною до сходинок функцією (рис. 4.4)), то найбільша похибка пропорційна до найбільшої зміни сигналу на проміжку  $t_i \leq t < t_{i+1}$  між почерговими вибірками

$$|\Delta_{dc}(T_\Delta)| \leq |x'(t)|_{\max} T_\Delta .$$

Якщо при гармонійному сигналі амплітудою  $x_m$  і частотою  $\omega$ :  $|x'(t)|_{\max} = \omega x_m$ , то максимальна похибка дискретизації не перевищує значення

$$|\Delta_{dc}(T_\Delta)| \leq x_m \omega T_\Delta .$$

Цю похибку можна зменшити, якщо зачекати до моменту часу  $t_{i+1}$  отримання наступної вибірки  $X_{i+1}$  і апроксимувати залежність зміни сигналу між почерговими вимірюваннями лінійною функцією (рис. 4.4).

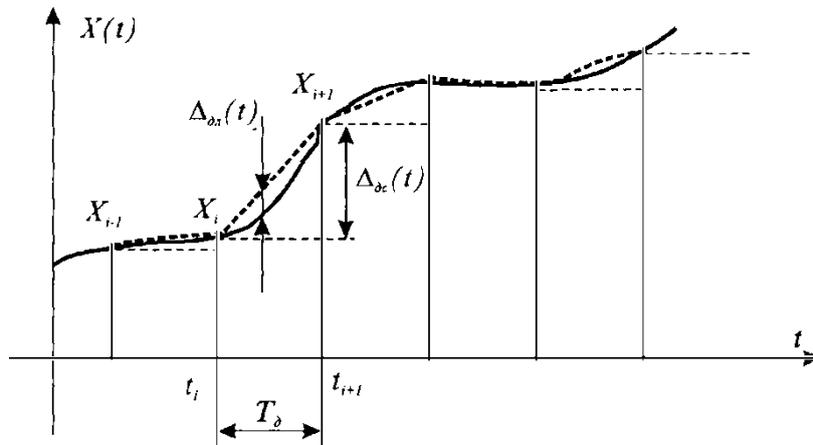


Рис. 4.4 Похибка дискретизації при відтворенні сигналу лінійними функціями

В цьому випадку максимальне значення похибки залежить від максимальної другої похідної сигналу (при лінійній зміні сигналу похибка відсутня)

$$|\Delta_{dc}(T_\Delta)| \leq \frac{|x''(t)|_{\max}}{2} \left( \frac{T_\Delta}{2} \right)^2 ,$$

і для гармонійного сигналу, для якого  $|x''(t)|_{\max} = \omega^2 x_m$ , максимальна динамічна похибка від дискретизації не перевищує значення

$$|\Delta_{dc}(T_\Delta)| \leq \frac{x_m}{2} \left( \frac{\omega T_\Delta}{2} \right)^2 .$$

**Квантування за рівнем** вимірюваної величини  $X$  полягає у визначенні квантованого і заокругленого в результаті квантування значення даної величини

$$x_{кв} = N_x q ,$$

де  $N_x q$  – квантовий (дозволений) рівень, до якого заокруглюється значення вимірюваної величини;  $N_x$  – числове значення;  $q$  – крок квантування (різниця між сусідніми рівнями квантування).

Як наслідок цього, цифровий результат містить похибку заокруглення, яку стосовно фізичних величин (а також внаслідок певних відмінностей заокруглення від загально прийнятих в математиці) називають *похибкою квантування*. Отже, *похибка квантування* – це різниця між заокругленим результатом вимірювання та справжнім значенням вимірюваної величини (рис. 4.5)

$$\Delta_{кв} = x_{кв} - X = N_x q - X$$

Спосіб заокруглення до квантового рівня значною мірою визначається технічною реалізацією АЦП. Для різних значень вимірюваної величини похибка квантування змінюється періодично, у вигляді зубців пили (рис. 4.5). Використовують заокруглення до ближчого рівня (рис. 4.5,а), більшого рівня (рис. 4.5,б) чи меншого рівня (рис. 4.5,в). При заокругленні до ближчого квантового рівня (рис. 4.5,а) похибка квантування найменша, вона не перевищує половини кроку квантування

$$|\Delta_{кв}| \leq \frac{q}{2},$$

а при заокругленні до більшого чи меншого рівнів вона може досягати розміру кванту з різним знаком.

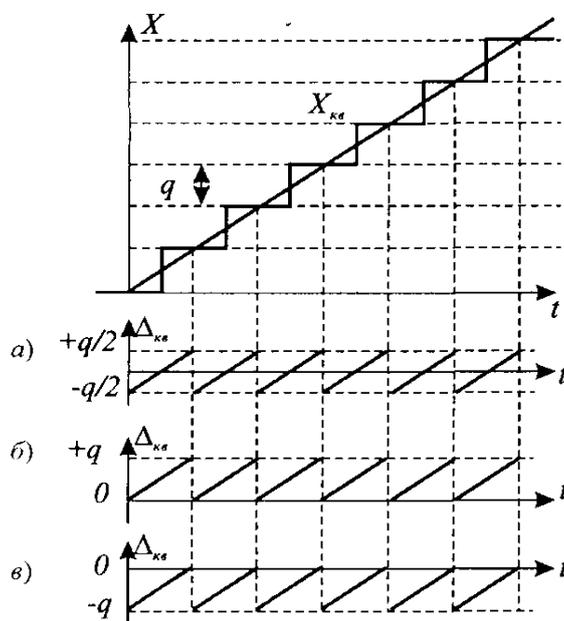


Рис. 4.5 Похибки квантування

Останній (молодший) розряд заокругленого результату вимірювання не обов'язково мусить змінюватися через десяткову одиницю, як це є звичайно в математиці. На практиці молодший розряд в певних випадках

може набувати лише парних значень (тобто результат вимірювання закінчується цифрами 0; 2; 4; 6; 8) або набувати значення через 5 (тобто закінчуватися цифрами 0 та 5).

Із збільшенням номінального значення ступенів квантування  $N_n$  та із зменшенням тривалості циклу дискретизації  $T_n$  складність і вартість ЦВП суттєво зростають. Тому кількість ступенів квантування  $N_n$  та тривалість циклу дискретизації слід вибирати за заданими значеннями похибки вимірювання і швидкодії. На сучасному етапі складність і вартість ЦВП може бути суттєво знижена використанням малогабаритних та порівняно недорогих інтегральних АЦП.

### 4.3. Цифро-аналогове перетворення

Цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) призначені для перетворення коду керування в напругу або струм. Використовуються ЦАП як вузли зворотного зв'язку АЦП та для формування вихідних сигналів цифрових вимірювальних і обчислювальних пристроїв.

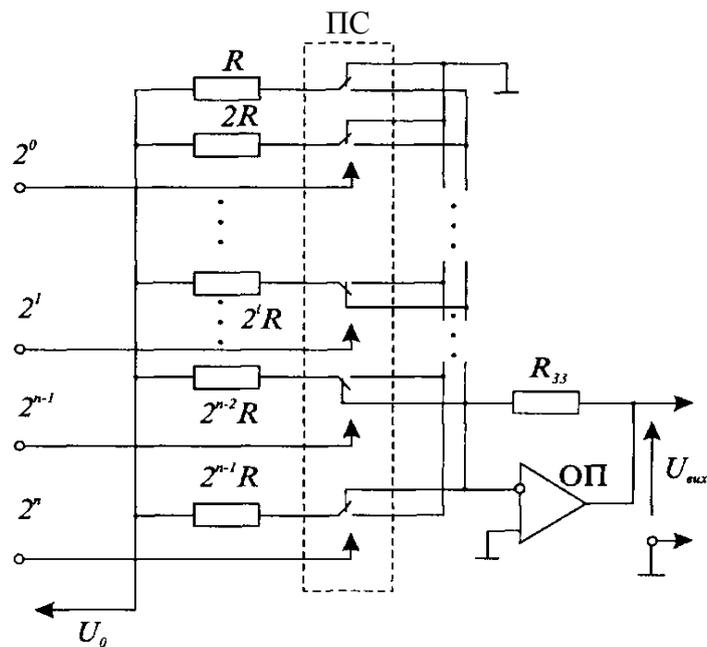


Рис. 4.6 Спрощена структура ЦАП з підсумовуванням розрядних струмів

Для перетворення двійкового коду в аналоговий сигнал зазвичай формуються струми, пропорційні до ваг розрядів коду, і потім підсумовують ті із струмів, які відповідають ненульовим (одичним) розрядам вхідного коду. Спрощена структура ЦАП подана на рис. 4.6. Опорна напруга  $U_0$  ЦАП подається одночасно на всі двійково-вагові резистори,  $2^0 R$ ,  $2^1 R$ , ...,  $2^i R$ , ...,  $2^{n-1} R$ ,  $2^{n-2} R$ , інші виводи яких під'єднані до входів

перемикача струмів ПС. Один вихід цього перемикача з'єднаний із спільною шиною, в той час як інший – з входом перетворювача струму на напругу (операційний підсилювач ОП та резистор зворотного зв'язку  $R_{33}$ ). Завдяки такому включенню незалежно від поданого коду керування через  $i$ -й ваговий резистор  $2^i R$  завжди протікає струм  $I_i = \frac{U_0}{2^i R}$ , який за наявності одиниці в  $i$ -му розряді вхідного коду  $N$  замикається через резистор  $R_{33}$ , а в протилежному випадку стікає на спільну шину. Вихідна напруга  $U_{ВИХ}$  ЦАП визначається як падіння напруги на резисторі  $R_{33}$  від суми струмів  $I_i$

$$U_{ВИХ} = U_0 \sum_{i=1}^{n-1} a_i \frac{R_{33}}{2^i R} = U_0 \frac{N}{N_{\max}},$$

де  $a_i$  – комутаційний коефіцієнт ( $a_i = 1$ , якщо в  $i$ -тому розряді вхідного коду  $N$  є одиниця і  $a_i = 0$  – у протилежному випадку);  $N, N_{\max}$  – відповідно, вхідний код керування та його максимальне значення.

Проблемами описаного ЦАП є велика кількість прецизійних резисторів з різними номіналами, а також обмеженість мінімального значення опору  $R$  ЦАП через вплив опорів замкнених ключів ПС, суттєвий вплив опорів ізоляції для багаторозрядних ЦАП.

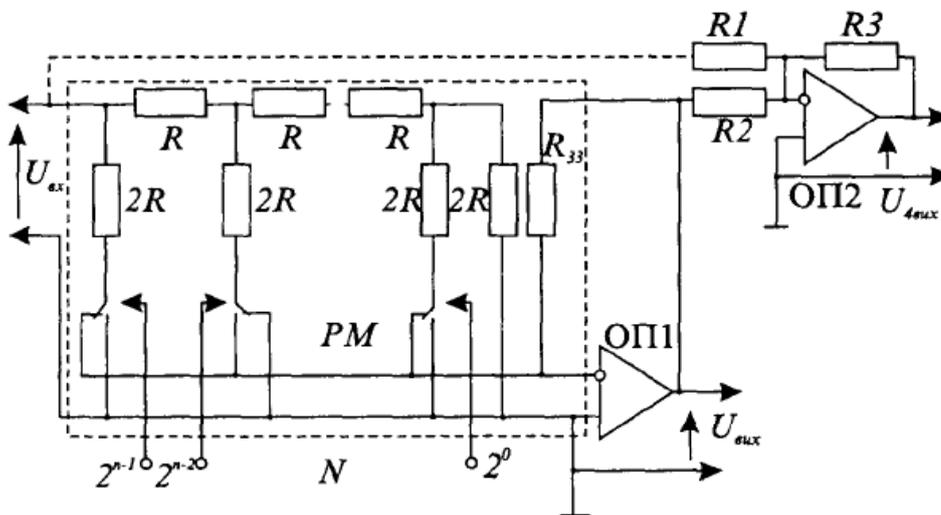


Рис. 4.7 ЦАП з резистивною матрицею R-2R

Ці недоліки усунені в ЦАП з матрицею  $R-2R$ , принцип дії якої полягає у поділі удвічі струмів у кожному її вузлі (рис. 4.7). При виготовленні резистивна матриця РМ підганяється за допомогою лазера із врахуванням дійсних значень опорів замкнених ключів, що дає можливість досягнення високих метрологічних параметрів (зведена похибка  $\pm(0,001$

...0,1%). Завдяки малим розмірам РМ в інтегральній мікросхемі і температури, і температурні коефіцієнти, і часові дрейфи всіх резисторів приблизно однакові, що забезпечує високі температурну та часову стабільність таких ЦАП. ЦАП формує два вихідні струми –  $I_i$  пропорційний до коду керування  $N$  та  $I_2 = I_{1\max} - I_1$ , де  $I_{1\max}$  – максимальне значення вхідного струму  $I_1$ , яке відповідає максимальному значенню коду  $N_{\max}$ .

Вихідний струм  $I_1$  ЦАП протікає через резистор  $R_{33}$  зворотного зв'язку і формує його вихідну напругу  $U_{\text{вих}}$

$$U_{\text{вих}} = - U_{\text{вх}} \frac{N}{N_{\max}},$$

де  $U_{\text{вх}}$  – вхідна напруга ЦАП.

#### 4.4 Кодування інформації. Види кодів цифрових приладів та систем

**Кодування** результату аналого-цифрового перетворення – це операція його представлення за допомогою сукупності (кодових) символів вибраного алфавіту (системи числення), що здійснюється за однозначними правилами. При цьому переважно використовується числове кодування і для цифрових вимірювань це є операція перекладу числового значення даної величини  $N_x$  в іншу систему числення. Незалежно від використовуваної системи числення, результати перетворення АЦП переважно представляються бінарними символами, тобто лише двома різними рівнями. Зворотня операція має назву **декодування**.

Крім безпосереднього кодування результатів аналого-цифрового перетворення, у вимірювальній техніці кодування використовується у пристроях відображення результатів, а також з метою отримання певного рівня завадостійкості при передачі результатів каналами зв'язку.

Кожен закодований результат зображується певною кількістю кодових символів або кодовою комбінацією, яка відповідає правилам використовуваного коду. При цьому існують різні системи кодування, які, однак, використовують одні і ті ж кодові символи.

**Цифровим кодом** називається сукупність правил, які встановлюють значення кожного елемента залежно від його місця в кодовій комбінації та її довжини.

За способом передачі інформації коди бувають: паралельні, послідовні, паралельно-послідовні.

У **послідовних** кодах інформація передається по одній лінії із розподіленням у часі. При використанні **паралельних** кодів інформація

передається або по кільком лініям одночасно, або по одній лінії, але із частотним розподіленням сигналів.

У багатьох цифрових вимірювальних приладах застосовується біт—паралельна, байт—послідовна передача. Тобто є вісім каналів, по ним виконується одночасна передача байтів інформації. Це паралельно-послідовні коди.

За ступенем захищеності коди бувають **захищені від завад** та **незахищені**. У цифрових приладах застосовуються коди, незахищені від завад. Захищені коди використовуються при передачі інформації на відстань (наприклад, у інформаційно-вимірювальних системах).

#### Коди, що незахищені від завад

У вимірювальній техніці найчастіше використовується такі цифрові коди, як: одиничний нормальний, одиничний позиційний, двійковий нормальний, ціла група двійково-десяткових кодів, код Грея (в АЦП з перетворенням просторових (кутове чи лінійне положення) параметрів), та інші, які зручні для реалізації різноманітними цифровими пристроями (табл.4.1).

Одиничний нормальний (число-імпульсний) код – значення числа подається кількістю імпульсів.

Одиничний позиційний код – значення числа подається положенням одиниці серед нулів.

Десятковий код (основою є число 10) – значення числа подається у десятковій системі числення цифрами від 0 до 9 з вагами, пропорційними 10 у відповідному степені, наприклад,  $733 = 7 \cdot 10^2 + 3 \cdot 10^1 + 3 \cdot 10^0$ .

Таблиця 4.1

Цифрові символи первинних цифрових кодів загального використання

Десятковий код	Одиничний нормальний код	Одиничний позиційний код	Двійковий нормальний код	Двійково-десятковий код
0	1	0000000000	00000	0000 0001
1	11	0000000001	00001	0000 0010
2	111	0000000010	00010	0000 0011
3	1111	0000000100	00011	0000 0100
4	11111	0000001000	00100	0000 0101
5	111111	0000010000	00101	0000 0110
6	1111111	0000100000	00110	0000 0111
7	11111111	0001000000	00111	0000 1000
8	111111111	0010000000	01000	0000 1001
9	1111111111	0100000000	01001	0000 1010
10	11111111111	1000000000	01010	0001 0000

**Двійковий нормальний код** (основою є число 2) – у цьому коді

значення числа подається у двійковій системі числення послідовністю  $n$  двійкових цифр  $a_{n-1}, a_{n-2}, a_2, a_1, a_0$ , кожна з яких може мати лише значення  $a_i = 0$  та 1, наприклад, 10011101, при цьому вага цифри у числі дорівнює числу два у степені, яка визначається номером (позиції) розряду

$$N_x = a_{n-1}2^{n-1} + a_{n-2}2^{n-2} + \dots + a_22^2 + a_12^1 + a_02^0 = \sum a_i2^i$$

Перевод будь-якого десяткового числа у іншу систему зчислення здійснюється шляхом послідовного ділення чисел на основу цієї системи та виписування залишків, які і складають число у іншій системі.

Наприклад, число 27(10) можна легко перевести у двійковий еквівалент шляхом ділення на 2:

$$\begin{array}{ll} 27:2 = 13 & \text{залишок 1;} \\ 13:2 = 6 & \text{залишок 1;} \\ 6:2 = 3 & \text{залишок 0;} \\ 3:2 = 1 & \text{залишок 1;} \\ 1:2 = 0 & \text{залишок 1.} \end{array}$$

Читаємо залишок знизу в гору та отримуємо число 21(10) = 11011(2)

Це число переводиться у десяткову систему наступним чином:

$$11011_{(2)} = 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = 16 + 8 + 0 + 2 + 1 = 27_{(10)}$$

Недоліком двійкового коду є те, що при переході від одного сусіднього числа до іншого змінюються одразу усі розряди кодової комбінації. Наприклад, 7(10)  $\rightarrow$  8(10). У двійковій системі це 0111(2)  $\rightarrow$  1000(2). Це може призвести до значних помилок при проходженні завади. Захищений від цього недоліку двійковий рефлексний код (**код Грея**).

Для його утворення двійковий код даного числа зсувається на один розряд праворуч та додається із вихідним по правилу mod2 (додавання без переносу одиниць у старші розряди).

Наприклад, число 1011(2) перетворюється в код Грея таким чином:

$$\begin{array}{r} 1011 \\ +1011 \\ \hline \end{array}$$

1110 — прями́й перехід (остання одиниця відкидається).

Двійковий код незручний з-за своєї громіздкості при вводі та виводі інформації. На практиці отримали поширення коди, які легко зводяться до двійкового, але зберігають переваги десяткових. До них відносяться шістнадцятковий, вісімковий та **двійково-десятковий** коди. Останній отримав найбільше розповсюдження у вимірювальній техніці. Суть коду полягає в тому, що кожна цифра десяткового числа подається його чотирьохрозрядним двійковим кодом 8-4-2-1. Наприклад, число 393:

$$3 \ 9 \ 3 \ (10) \ \rightarrow \ 0011 \ 1001 \ 0011.$$

Двійково-десяткові коди у межах тетради можуть мати не тільки двійкові ваги 8421, а й інші, наприклад, 4221, 2421, 5211 тощо.

Зміщений двійковий код утворюється введенням додаткового старшого розряду, запис в яких активного одиничного рівня означає додатне число, а запис нуля – від’ємне.

Доповняльний код буває двох типів – прямий та зворотний. Прямий з доповненням до двох має однакові зі зміщеним кодом стани вагових розрядів. Проте додатні числа кодуються нулем у старшому розряді, а від’ємні – одиницею. Нормалізовані додатні числа утворюються підсумовуванням вагових коефіцієнтів розрядів, а від’ємні – підсумовуванням вагових коефіцієнтів з мінус одиницею. Зворотний з доповненням до двох код має подвійне відтворення нуля. Для додатних чисел подання в доповняльному та зворотному кодах збігається з поданням у прямому.

### Коди, захищені від завад

Усі коди, які захищені від завад, характеризуються коефіцієнтом надлишковості  $k$ :

$$k = \frac{m}{n},$$

де  $n$  – кількість інформаційних символів кодової комбінації;

$m$  – загальна кількість символів комбінації, що передається.

Чим вища захищеність коду, тим вищий коефіцієнт надлишковості.

Завадозахищені коди розділяються на дві великі групи: коди з виявленням помилок та коди з виявленням та виправленням помилок.

Розглянемо деякі види **кодів з виявленням помилок**.

**Код із перевіркою на парність** утворюється шляхом додавання до комбінації, що передається, одного надлишкового символу (0 або 1) так, щоб загальна кількість одиниць у комбінації була парною. Наприклад:

$$11011 + 0 \rightarrow 110110$$

$$10011 + 1 \rightarrow 100111.$$

Цей код розпізнає тільки одиничні помилки.

Аналогічно утворюється **код із постійною кількістю одиниць або нулів** (додаванням відповідних надлишкових символів).

**Кореляційний код** дає більш високу захищеність від завад. Кожен елемент двійкового коду передається двома символами, причому 1 перетворюється у 10, а 0 у 01.

Наприклад, замість комбінації 11011 у лінію зв’язку передається комбінація 10 10 01 10 10. Таким чином, кореляційний код має удвічі більше елементів, ніж вихідний. Помилка не виявляється тільки тоді, коли два поряд розташованих символи, які відповідають одному елементу вихідної кодової комбінації, будуть викривлені так, що 1 перейде в 0, а 0 в 1.

Правило утворення **інверсного коду** наступне: якщо у вихідній комбінації парна кількість одиниць, то комбінація, що додається, повторює

вихідну; якщо непарна — то у розрядах, що додаються, усі 0 перетворюються в 1, а 1 в 0.

Наприклад,  $1110001 + 1110001 \rightarrow 11100011110001$

$1111100 + 0000011 \rightarrow 11111000000011$ .

Цей код також має подвоєння елементів вихідної кодової комбінації та високий ступінь виявлення помилок.

Коди з **виявленням та виправленням помилок** характеризуються подальшим підвищенням коефіцієнту надлишковості. До таких кодів відносяться коди Хеммінга та циклічні коди. Ці коди є коректуючими, тобто вони дозволяють по кодовій комбінації, яка є у надлишковості, виявляти та виправляти помилки.

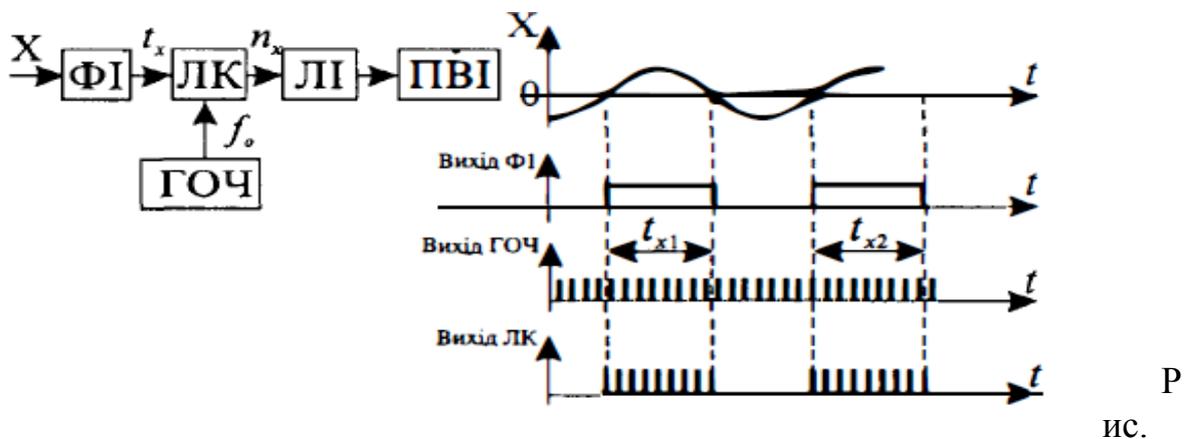
#### 4.5 Типові структури цифрових приладів для вимірювання електричних величин

Найчастіше у ЦВПІ кодується інтервал часу, частота імпульсів та напруга. У вимірювальній техніці при дистанційних вимірюваннях широко використовуються синусоїдальні та імпульсні сигнали, які модульовані по частоті, фазі чи тривалості. Такі сигнали мають високу стійкість проти завад та мало підлягають впливу каналу зв'язку.

##### 4.5.1 Цифрові засоби вимірювань з квантуванням частотно-часових параметрів.

Основною операцією таких перетворень є підрахунок кількості імпульсів — так зване число-імпульсне перетворення, при якому результат визначається кількістю імпульсів  $n$ , що надійшли в лічильник.

Найчастіше метод послідовної лічби застосовують при побудові вимірювачів частотно-часових параметрів неперервних та імпульсних сигналів, зокрема вимірювачів тривалості часових інтервалів, частоти, періоду, фази, відношення частот тощо.



4.8 Структурна схема та часові діаграми роботи вимірювача інтервалів часу (хронометра)

Спрощена структурна схема вимірювача інтервалів часу (хронометра)

наведена на рис. 4.8. Часовий інтервал  $t_x$  вимірюється підрахунком кількості імпульсів стабільної частоти  $f_0 = 1/T_0$ , які надходять до лічильника імпульсів за час його тривалості.

Формувач імпульсів ФІ із вхідного сигналу довільної форми формує імпульсні сигнали тривалістю  $t_x$  прямокутної (чи іншої потрібної) форми. За проміжок часу  $t_x$  підраховується кількість імпульсів, які через ключовий елемент ЛК надходять на вхід лічильника імпульсів ЛІ, а результат відображається на пристрої відображення інформації ПВІ. Оскільки кількість імпульсів, підрахованих лічильником імпульсів, дорівнює

$$n_x = t_x f_0,$$

то вимірювальний проміжок часу можна визначити як  $t_x = n_x / f_0$ .

При такому перетворенні виникає похибка квантування, яка зумовлена несинхронністю (незбіганням) початку та закінчення вимірюваного інтервалу  $t_x$  з моментами появи відповідних квантуючих імпульсів. У найгіршому випадку похибка квантування не перевищує  $\pm 1$  імпульс, а відносне значення цієї похибки становить

$$\delta_k = \pm 1/n_x = \pm 1/(f_0 t_x),$$

тобто є обернено пропорційною до тривалості вимірюваного інтервалу.

Цифрові вимірювачі періоду відрізняються від вимірювачів часових інтервалів наявністю замість формувача імпульсів пристрою виділення одного або декількох періодів  $T_x$  вхідного сигналу. При цьому вимірюваний період  $nT_x$  (де  $n = 1, 2, 3, \dots$  – ціле число) квантується імпульсами зразкової частоти  $f_0$  від генератору ГОЧ.

При малих значеннях періоду (велика частота) використовують режим вимірювання частоти: задають точно відомий проміжок часу  $T_0 = n/f_0$  (де  $n = 1, 2, 3, \dots$  – ціле число) і заповнюють його імпульсами тривалістю  $T_x$ . У цьому випадку кількість імпульсів, яка пройшла на ЛІ

$$n_x = T_0 f_x,$$

звідки  $f_x = n_x / T_0$ .

Тут похибка квантування також не перевищує  $\pm 1$  імпульс, а відносне значення цієї похибки становить

$$\delta_k = \pm 1/n_x = \pm 1/(T_0 f_x),$$

тобто похибка квантування зростає зі зменшенням вимірюваної частоти.

Наприклад, при часі вимірювання  $T_0 = 1$  секунда, вимірюючи

промисловою частотою  $f \approx 50 \text{ Гц}$ , отримаємо всього  $n_x = T_0 f_x = 1 \text{ с} \cdot 50 \text{ Гц} = 50$  імпульсів. Відносна похибка квантування може досягнути дуже великого значення  $\delta_k = \pm 1/50 = \pm 0,02 = \pm 2\%$ . В цьому випадку краще застосувати непряме вимірювання частоти - виміряти період  $T_x$  і далі знайти обернену величину  $f_x = 1/T_x$ . При частоті квантуючих імпульсів  $f_x = 10 \text{ МГц}$  кількість імпульсів у лічильнику становить  $n_x = f_0 T_x = f_0 / f_x = 10^6 \text{ Гц} / 50 \text{ Гц} = 20000$ .

В цьому випадку відносна похибка квантування не перевищує величини  $\delta_k = \pm 1/20000 = \pm 0,00005 = \pm 0,005\%$ , тобто у 400 разів менша. Як правило, в універсальному приладі (частотомір-періодомір) є заданими максимальний час вимірювання частоти  $T_{0max}$  та максимальна частота квантуючих імпульсів  $f_{0max}$ . Для таких параметрів існує так звана гранична частота

$$f_{gp} = \sqrt{T_{0max} f_{0max}},$$

що визначає таку частоту сигналу, при вимірюванні періоду або частоти якої отримується однакова похибка квантування. Якщо частота сигналу менша за граничну частоту, то більша точність вимірювання досягається у непрямому методі – вимірювання періоду, а якщо частота більша за граничну, то точніше пряме вимірювання частоти.

#### 4.5.2 Цифрові фазометри

Цифрові фазометри призначені для вимірювання зсуву фаз сигналів, кутів повороту, знімання ФЧХ різних ланок. Цифрові фазометри можна розділити на дві групи: для вимірювання миттєвого значення зсуву фаз та для вимірювання середнього значення зсуву фаз.

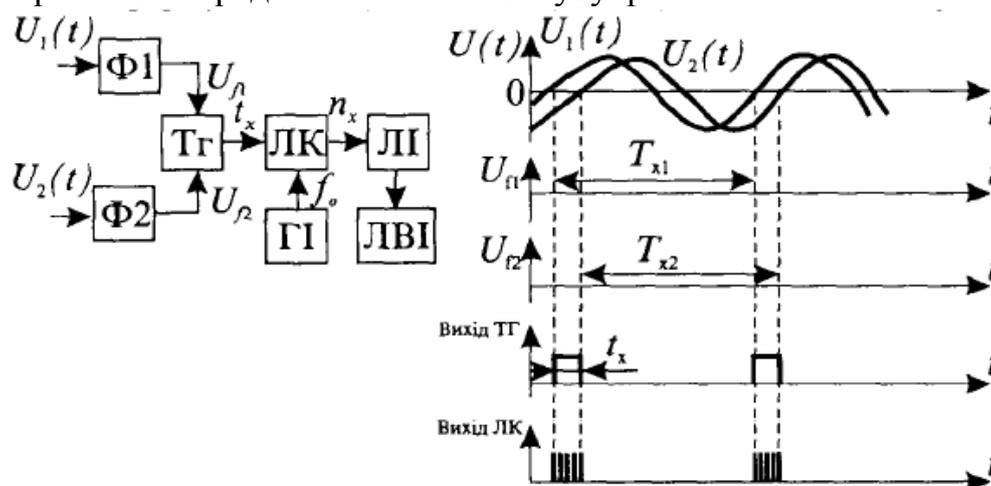


Рис. 4.9 Структурна схема та часові діаграми роботи цифрового фазометра

Зсув фаз двох електричних сигналів неважко перетворити в часовий інтервал за допомогою формувачів імпульсів, використовуючи моменти переходів цих сигналів через нуль. На рис. 4.9 приведена схема цифрового фазометра - приладу для вимірювань зсуву фаз між двома синусоїдними сигналами з однаковою частотою  $f$  та періодом  $T$ .

Принцип дії фазометра полягає у перетворенні вимірюваного зсуву фаз між сигналами  $u_1(t)$  та  $u_2(t)$  в часовий інтервал  $t_x$  з подальшим вимірюванням цього інтервалу способом, описаним у попередній схемі. Досліджувані сигнали надходять на формувачі імпульсів Ф1 та Ф2, які виробляють імпульси  $u_{f1}$  та  $u_{f2}$  у моменти переходу через нуль вхідних сигналів. Ці імпульси керують роботою тригера ТГ, що формує означений часовий інтервал  $t_x$ . Оскільки імпульсів за час  $t_x$  буде  $n_x = f_0 t_x$ , а зсув фази між  $u_1(t)$  та  $u_2(t)$  дорівнює  $\varphi_x = \omega t_x = 2\pi f t_x$ , то залежність між  $\varphi_x$  та  $n_x$  визначиться як

$$\varphi_x = 2\pi f t_x = \frac{2\pi f}{f_0} n_x.$$

Для отримання результату вимірювання у радіанах чи градусах необхідно задати відповідне значення зразкової частоти. Такі фазометри використовуються для вимірювань зсуву фаз між гармонічними чи імпульсними сигналами частотою до декількох мегагерц з точністю до сотих часток відсотка. Недоліком таких приладів є залежність показів від частоти вхідних сигналів.

В АЦП з квантуванням параметрів інтенсивності перетворення може відбуватися паралельним чи послідовним способом.

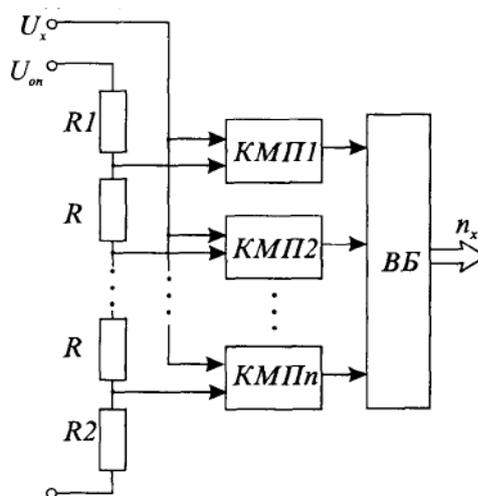


Рис. 4.10 Структурна схема паралельних АЦП

*Паралельні АЦП.* В таких АЦП операції дискретизації та квантування



зрівноважуваної напруги  $U_x$  на виході перетворювача коду в напругу ПКН (ЦАП), а на виході пристрою порівняння ПП встановлюється одиничний рівень  $U_m$ , що означає  $U_x > U_k$ . Тактові імпульси генератора Г частотою  $f_0$  поступово заповнюють лічильник Л, а вихідна напруга ПКН наростаючим кодом з виходу Л перетворюється в ступенево-зростаючу напругу компенсації  $U_k$ . З кожним імпульсом Г  $U_k$  збільшується на один ступінь квантування до моменту виконання рівності  $U_x = U_k$ . В цей момент  $t$ , часу ПП закриває цифровий ключ ЛК, а в лічильнику Л встановлюється код  $n_x = (1/q_k)U_x$ , де  $q_k = U_0/2^m$  – крок квантування і  $m$  – розрядність Л. Тут  $U_0$  – опорна напруга, що подається від джерела опорної напруги ДОН. Тому в момент порівняння вхідна напруга дорівнює

$$U_x = \frac{U_0}{2^m} \cdot n_x$$

Точність такого вимірювача визначається похибками перетворювача код – напруга ПКН та пристрою порівняння ПП і може сягати  $\pm(0,01 \dots 0,1)\%$ . Час перетворення достатньо великий, особливо у випадку великої розрядності  $m$ .

#### 4.5.4 Кодо-імпульсні цифрові вольтметри з порозрядним зрівноваженням

Вищу швидкодію забезпечують цифрові засоби вимірювання з порозрядним зрівноваженням, які частіше називають АЦП порозрядного зрівноваження. У таких ЦВ вимірювана напруга  $U_x$  порівнюється з сумою дискретних значень компенсуючої напруги  $U_k$ , яка змінює своє значення відповідно числовим кодам, наприклад, двійково-десятковому коду з вагами 8-4-2-1. Ця компенсуюча напруга виробляється ЦАП.

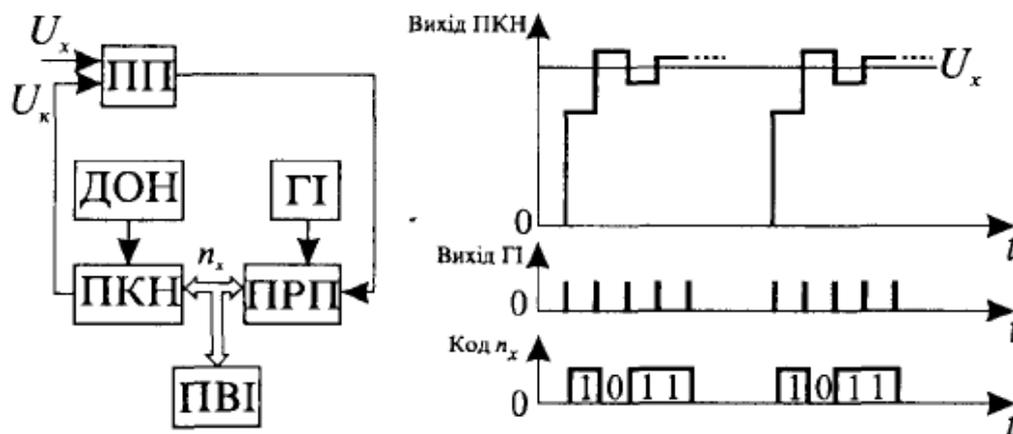


Рис. 4.12 Структурна схема та часові діаграми роботи цифрового вольтметра порозрядного зрівноваження

Структура та часові діаграми роботи такого приладу зображені на рис. 4.12. Вимірювана напруга  $U_x$  порівнюється із ступінчастою змінною компенсуючою напругою  $U_k$ , для якої ваги сходинок неоднакові і дорівнюють  $2^{-1}, 2^{-2}, 2^{-3}, \dots, 2^{-m}$  часток від значення зразкової напруги  $U_0$  джерела опорної напруги ДОН, а значення  $U_0$  – максимальному значенню вимірюваної напруги  $U_x$ . Принцип дії цього АЦП відрізняється від вимірювача розгортального зрівноваження тим, що вихідний код  $n_x$  формується не одиничним наближенням  $U_k$  до  $U_x$ , а виробляється порозрядно, починаючи із старшого розряду, за результатами аналізу програмним пристроєм ПРП вихідного сигналу пристрою порівняння ПП. З надходженням першого тактового імпульсу від генератора ГІ програмний пристрій ПРП встановлює у першому старшому розряді одиничний рівень, що призводить до появи на виході перетворювача код – напруга ПКН напруги  $U_{k1} = U_0/2$ . Пристрій порівняння ПП порівнює цю напругу із вхідною  $U_x$ . Якщо  $U_x > U_{k1}$ , то на виході ПП залишається попередній одиничний рівень, а в старшому розряді ПРП – логічна одиниця. Після другого тактового імпульсу ГІ встановлюється одиниця в другому старшому розряді ПРП, який має вдвічі меншу вагу порівняно з попереднім розрядом. На виході ПКН встановлюється напруга  $U_k = U_{k1} + U_{k2} = U_0/2 + U_0/4$ . Якщо  $U_k > U_x$ , то на виході ПП змінюється код на протилежний, після чого ПРП визначає стан в АЦП як перекомпенсацію і встановлює в другому старшому розряді нуль замість раніше виставленої одиниці. При цьому значення  $U_{k2}$  виключається з компенсаційної напруги  $U_k$ . З третім імпульсом ГІ встановлюється одиниця в третьому розряді ПРП з вагою  $2^{-3}$ . Напруга  $U_{k3} = U_0/8$  підсумовується з  $U_{k1}$ . Якщо ПП показує, що перекомпенсація ще не настала, то в третьому розряді ПРП залишається одиниця. Аналогічно опрацьовуються решта молодших розрядів ПРП. Отже, вимірювання в такому АЦП займає  $m$  тактів, на відміну від  $2^m - 1$  тактів у попереднього вимірювача за рис. 4.11. Час перетворення АЦП порозрядного зрівноваження складає одиниці мікросекунд, а оскільки розрядність ПКН не накладає обмежень на швидкодію схеми, то її можна вибрати достатньо великою (10-16 розрядів), що забезпечить достатньо високі метрологічні характеристики приладу.

Перевагами такого вольтметра є висока швидкодія, можливість вимірювання з найбільшою точністю. Похибка ЦАП залежить від точності завдання і стабільності опорної напруги  $U_0$ , від точності підбору опорів резисторів  $R$  цифро-аналогового перетворювача ЦАП та залишкових опорів електронних ключів.

#### 4.5.5 Часо-імпульсні цифрові вольтметри

Часо-імпульсні ЦВ можуть бути неінтегровальні та інтегровальні. Неінтегровальні призначені для вимірювання миттєвих значень вхідної напруги. Ці вольтметри не захищені від дії завад та не забезпечують високої чутливості. Тут значення вимірної напруги  $U_x$  попередньо перетворюється у інтервал часу  $T_x$ , який кодується методом послідовної лічби. У ЦВР (такі вольтметри також називаються цифровими вольтметрами розгортуючого перетворення ЦВР) перетворення  $U_x$  у  $T_x$  виконується шляхом порівняння  $U_x$  з напругою, яка лінійно змінюється ( $U_p$ ). Напругу  $U_p$  формує генератор пилкоподібної напруги ГПН.

Структурна схема та часові діаграми роботи цього приладу подані на рис. 4.13, де (крім означених для попередньої схеми) ПП – пристрій порівняння, ПЧ – подільник частоти, ГПН – генератор пилкоподібної напруги.

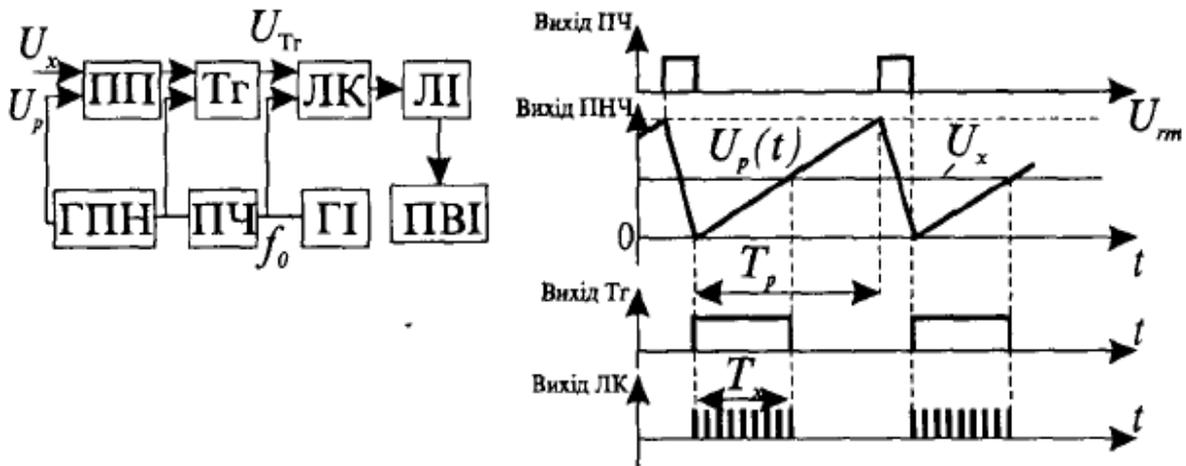


Рис. 4.13 Структурна схема та часові діаграми роботи цифрового вольтметра розгортального часового перетворення

Сформовані генератором імпульсів ГП та подільником частоти ПЧ імпульси встановлюють тригер Тг у початковий одиничний стан. Одночасно починає наростати пилкоподібна напруга розгортки  $U_p(t) = v_p t$ , де  $v_p = U_{pm}/T_p$  – швидкість зміни цієї напруги,  $U_{pm}$  – її амплітудне значення,  $T_p$  – час розгортки. У момент рівності вхідної напруги  $U_x$  та пилкоподібної напруги  $U_p(t)$  пристрій порівняння ПП видає імпульс, котрий скидає тригер Тг в нульовий стан. Отже, на виході Тг формується одиничний імпульс тривалістю  $T_x = U_x/v_p$  в границях якого лічильником ЛІ підраховується кількість імпульсів генератора ГП, яка буде пропорційна значенню напруги  $U_x$ :

$$n_x = f_0 \cdot U_x = \frac{f_0}{v_p} \cdot U_x, \quad \text{звідки } U_x = \frac{v_p}{f_0} \cdot n_x.$$

У момент зворотного ходу пилкоподібної напруги  $U_p(t)$  імпульс  $U_z$ , що надходить з виходу ПЧ, відновлює початковий одиничний стан Тг і, таким чином, готує схему до наступного вимірювання вхідної напруги  $U_x$ . Похибка перетворення АЦП на основі такої структури визначається нелінійністю пилкоподібної напруги  $U_p(t)$  та нестабільністю порогу спрацювання пристрою порівняння і, в кращому випадку, становить декілька десятих-сотих долей відсотка. Цей метод забезпечує швидкодію не менше кількох сотень мікросекунд.

#### 4.5.6 Цифрові вольтметри з двотактним інтегруванням

Значно вищу точність забезпечують АЦП з двотактним інтегруванням (рис. 4.14). У таких приладах спочатку інтегрується за певний фіксований інтервал часу  $T_p = t_2 - t_1$  вхідна вимірювана напруга  $U_x(t)$ , що надходить на вхід інтегратора ІНТ через ключ Кл1 за командою пристрою керування ПК. При цьому вихідна напруга інтегратора ІНТ лінійно наростає за законом

$$U_l = \frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{T_1} U_x dt = \frac{T_1}{\tau} \cdot U_x,$$

де  $\tau$  - стала часу інтегратора.

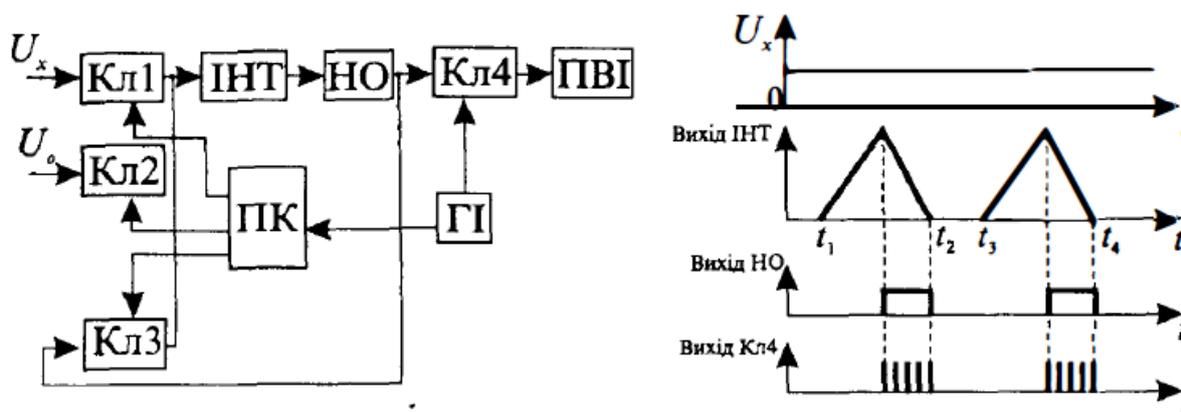


Рис. 4.14 Структурна схема та часові діаграми роботи приладу з двотактним інтегруванням

Після цього в момент часу  $t_2$  схемою керування на вхід ІНТ через ключ Кл2 підключається зразкова напруга  $U_0$ , протилежної до  $U_x$  полярності. Момент часу  $t_3$ , коли вихідна напруга інтегратора дорівнює

нулю, фіксується нуль-органом НО. Оскільки площі, окреслені вихідною напругою ІНТ за інтервали часу  $T_1$  та  $T_2 = t_3 - t_2$ , однакові (рис. 4.14), то можна записати

$$\frac{T_1}{\tau} \cdot U_x - \frac{T_2}{\tau} \cdot U_0 = 0, \quad \text{звідки } U_x = \frac{T_2}{T_1} \cdot U_0.$$

За час  $T_2$  за сигналом з НО лічильник імпульсів ЛІ підраховує кількість імпульсів  $n_x$ , що надходять через ключ Кл4 з виходу генератора імпульсів ГІ. Аналогічно, як і в попередніх схемах, інтервал часу  $T_2 = \frac{1}{f_0} \cdot n_x$ , тому вимірювана напруга визначається як

$$U_x = \frac{U_0}{f_0 T_1} \cdot n_x = k U_0 n_x,$$

де  $f_0$  - частота генератора імпульсів ГІ.

В момент часу  $t_3$  на інтервал  $t_4 - t_3$  ПК замикає ключем Кл3 вихід НО із входом ІНТ, завдяки чому в останньому перед кожним циклом перетворення встановлюється початкова напруга інтегрування. Її значення дорівнює напрузі зміщення НО і тому вона не погіршує точності інтегруючого АЦП. В момент  $t_4$  починається наступний цикл перетворення.

Перевагою таких приладів є високий коефіцієнт послаблення промислових завад завдяки вибору тривалості  $T_1$ , яка дорівнює чи кратна періоду завади частоти електромережі. Основна зведена похибка таких АЦП може бути зменшена до декількох сотих-тисячних долей відсотка, а час вимірювання – від 40 до 100 мс.

#### 4.5.7 Вимірювання опору цифровими приладами

Для вимірювання опору застосовують цифрові мости. Позитивною особливістю цифрових мостів є незалежність їх показів від значення напруги живлення. Крім цього, завдяки вибору невеликих значень розсіюваної потужності (десятки мВт), суттєво зменшена методична похибка, яка виникала від перегріву вимірюваного опору. У сучасних цифрових мостах забезпечується автоматичний вибір піддіапазонів вимірювання шляхом перемикавання опорів  $R_{An}$  та  $R_{Bm}$  плеч відношення (рис. 4.15).

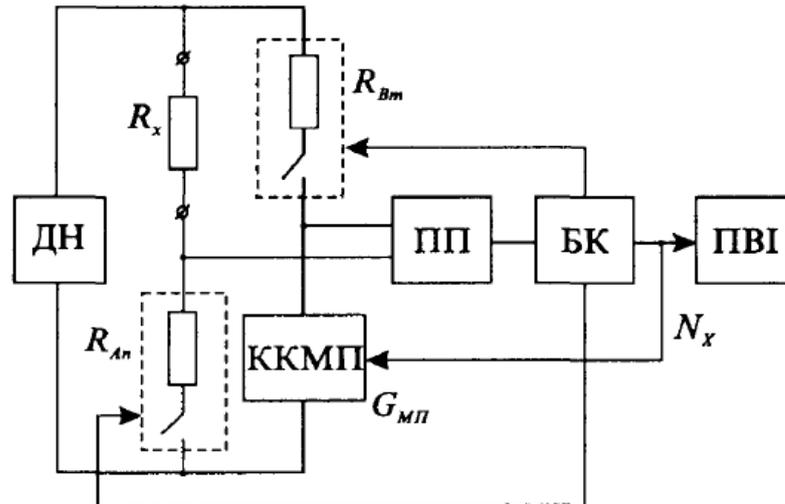


Рис. 4.15 Структурна схема цифрового моста

Для зменшення впливу залишкових параметрів комутаційних елементів і спрощення їх комутації, в цифрових мостах використовуються тільки кодокеровані магазини провідності (ККМП), які вмикаються в плече протилежне до вимірюваного опору. Напряга нерівноваги моста сприймається пристроєм порівняння (ПП). Блок керування (БК) аналізує знак вихідного сигналу ПП і, залежно від нього, збільшує або ж зменшує код  $N_x$ , який керує ККМП та подається на пристрій відображення інформації (ПВІ). Зрівноваження відбувається до моменту зменшення напруги нерівноваги до значення меншого від порогу чутливості ПП, при цьому значення вимірюваного опору знаходиться як

$$R_x = G_{МП} R_{An} R_{Bm} = R_{An} R_{Bm} \sum_{i=1}^k a_i g_i$$

де  $G_{МП} = \sum_{i=1}^k a_i g_i$  – увімкнена провідність ККМП;  $a_i$  – коефіцієнт комутації ( $a_i=1$  при наявності одиниці у відповідному розряді коду  $N_x$  і  $a_i=0$  – в протилежному випадку);  $g_i$  – провідність і-го розряду ККМП;  $k$  – кількість двійкових розрядів коду  $N_x$ ;  $n, m$  – відповідно, кількість резисторів в плечах відношення  $R_{An}$  та  $R_{Bm}$ ;  $n \cdot m$  – кількість піддіапазонів вимірювання опору.

Як видно з цього рівняння, похибка вимірювання опору цифровими мостами залежить від інструментальних похибок резисторів плеч відношення і ККМП, а також від залишкових параметрів (опорів замкнених ключів і залишкових ЕРС) перемикачів резисторів плеч відношення та ККМП. За допомогою цифрових мостів вимірюють опір в широкому діапазоні значень -  $(10^2 \dots 10^{10})$  Ом, з похибкою  $\pm(0,05 \dots 2)$  % та роздільною здатністю  $10^5$ .

Принципово нові можливості побудови цифрових омметрів відкриває застосування в них кодо-керованих імітаторів електричного опору. В компенсаційному цифровому омметрі (рис. 4.16) вимірюваний опір  $R_x$  вмикається в коло від'ємного зворотнього зв'язку інвертуючого ОП2, а значення його вимірювального струму задається резисторами  $R_{Nj}$ , які перемикаються ключами  $S_j$  залежно від вибраного піддіапазону вимірювання.

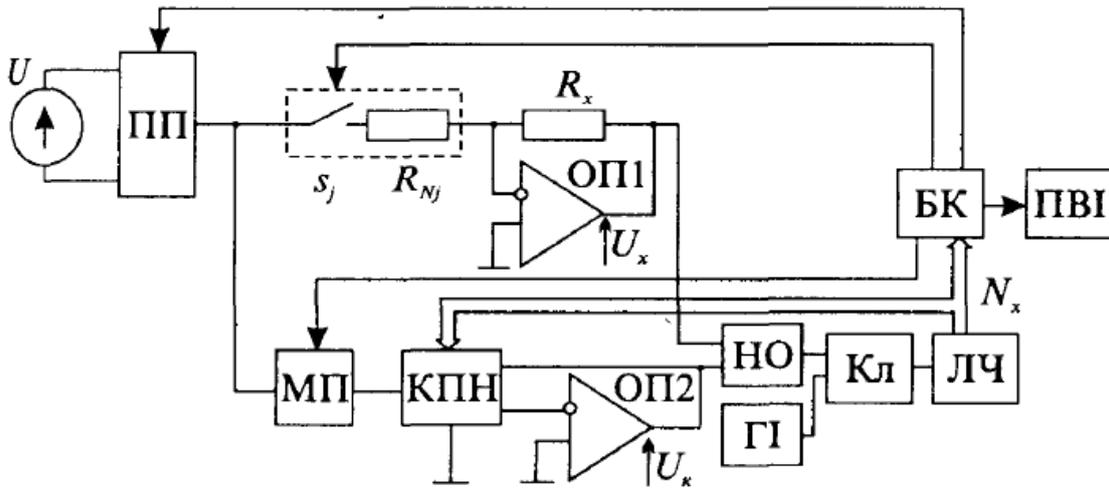


Рис. 4. 16 Структурна схема компенсаційного цифрового омметра

Масштабний подільник МП, кодо-керований подільник (ЦАП напруги) КПН та операційний підсилювач ОП2 є кодо-керованим подільником компенсаційної напруги  $U_k$ . На обидва входи нуль-органа НО подаються напруги однакової полярності з виходів підсилювачів ОП1  $U_x$  та ОП2  $U_k$ . За проміжок часу, доки вимірювальна напруга (вихідна напруга підсилювача ОП1) є меншою від компенсувальної напруги (вихідна напруга підсилювача ОП2), до моменту спрацювання НО формується результат вимірювання підсумовуванням імпульсів генератора ГІ на лічильнику ЛЧ, вихідним кодом якого збільшується компенсувальна напруга  $U_k$ . У момент рівності вимірювальної та компенсувальної напруг спрацьовує НО, ключ Кл закривається і вихідний код лічильника фіксується в блоці керування приладом БК. Вимірювання опору тут здійснюється за методом комутаційного інвертування при різних полярностях тестової напруги  $U$  омметра. При додатній полярності напруги  $U$  рівняння рівноваги компенсатора запишеться як

$$(U + e_j) \frac{R_x}{R_{Nj} + R_{Kj}} + \Delta_a - (m_j U + e_k) \frac{N_1}{N_m} = e_{HO} ,$$

де  $e_j, R_{Kj}$  – відповідно ЕРС та опір  $j$ -го замкненого ключа  $S_j$ ,  $\Delta_a = e_1 + e_2$  - еквівалентна напруга зміщення ОП1 та ОП2;  $m_j$  - коефіцієнт передачі МП;  $e_k, e_{HO}$  - відповідно напруга зміщення КПН та НО;  $N_1, N_m$  - відповідно поточне та максимальне значення коду вимірювання; а при від'ємній полярності -  $(U - e_j) \frac{R_x}{R_{Nj} + R_{Kj}} - \Delta_a - (m_j U - e_k) \frac{N_1}{N_m} = e_{HO}$ .

Код результату вимірювання  $N_x$  визначається в БК як півсума кодів  $N_1, N_2$ , отриманих при обох зрівноваженнях

$$N_x = \frac{N_1 + N_2}{2} = \frac{R_x}{R_{Nj} + R_{Kj}} \cdot \frac{N_m}{m_j}$$

Похибка результату вимірювання не залежить від адитивних складових, а визначається тільки мультиплікативними складовими похибки - похибкою струмозадавального резистора, коефіцієнтів передачі МП та КПН.

#### 4.5.8 Цифрові осцилографи

Цифровий осцилограф дозволяє одночасно спостерігати на екрані сигнал і отримувати чисельні значення ряду його параметрів з більшою точністю, ніж це можливо шляхом зчитування цих величин з екрана електронно-променевого осцилографа. Це можливо тому, що параметри сигналу вимірюються безпосередньо на вході цифрового осцилографа, тоді як сигнал, що пройшов через канал вертикального відхилення звичайного осцилографа, може бути виміряний з істотними помилками. Ці помилки можуть досягати 10%.

Основними параметрами, вимірюваними сучасними цифровими осцилографами, є амплітуда сигналу, його частота або тривалість. На екрані осцилографа, крім самих осцилограм, відображається стан органів керування (чутливість, тривалість розгорнення й т.п.).

Передбачений вивід інформації з осцилографа на принтер, флеш-пам'ять та локальну мережу. Однак цим не обмежуються можливості цифрових осцилографів. Мікропроцесор цифрового осцилографа дозволяє визначати діюче значення напруги, розтягувати в часі фрагменти записаного в пам'ять сигналу, додавати й віднімати сигнали на різних каналах, визначати частотний спектр сигналу шляхом застосування швидкого перетворення Фур'є та ін.

Таким чином, до основних переваг цифрових осцилографів можна віднести:

- високу точність вимірів;
- широку смугу пропускання;

- можливість зберігати зображення в пам'яті осцилографа або зовнішньому носії;
- яскраве, кольорове, чітке зображення сигналів на будь-якій швидкості розгорнення;
- можливість виявлення імпульсних перешкод;
- автоматичні засоби виміру параметрів сигналів;
- можливість підключення до комп'ютера, принтера або плоттера;
- можливості математичної й статистичної обробки сигналу;
- засоби самодіагностики й самокалібрування.

Недоліки цифрових осцилографів:

- висока вартість;
- затримка відображення на дисплеї на час, необхідний для обробки сигналів;
- складність в керуванні.

Розглянемо структурну схему типового двохканального цифрового осцилографа (рис. 4.17).

Пройшовши через пристрій масштабування (підсилювач, атенюатор – аналогічний схемі електронно-променевого осцилографа), вхідна напруга кожного каналу  $u(t)$  надходить до пристрою вибірки та зберігання, потім на інформаційний вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП). З таймера на АЦП поступають ще й тактові імпульси  $U_T$  з періодом слідування  $T$ .

При надходженні в деякій момент часу  $t_i$  одного з них, АЦП перетворює миттєве значення амплітуди сигналу у двійковий код, тобто набір кодових чисел 0 або 1. В кінці такого перетворення АЦП видає на мікроконтролер відповідний сигнал.

Кожне нове кодове слово через інтерфейс записується в оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП). При цьому всі попередньо записані у нього дані зсуваються на одну комірку (регістр зсуву), а дані з найпершої комірки зникають, як би «виштовхуються». Якщо ОЗП складається з  $M$  гнізд, то в ньому, постійно оновлюючися, утримується  $M$  останніх, «свіжих», кодових слів. Так триває доти, поки не буде виконана якась задана умова, наприклад, коли яке-небудь  $u_i$  уперше перевищить заданий оператором рівень («запуск за рівнем»). Після цього вміст деякої кількості комірок ОЗП передається у внутрішній запам'ятовуючий пристрій (ЗП), що входить до складу мікроконтролера.

Кожній комірці цього ЗП відповідає точка на екрані, яка по кольору відмінна від тіла екрану. Її абсцису визначає номер комірки, а ординату – кодове слово, що перебуває в цій комірці. Таким чином, на екрані виникає осцилограма, яка представляє собою набір точок, що світяться. Для отримання неперервної осцилограми після ЗП встановлюють блок згладжування — фактично фільтр низьких частот (на схемі не показаний).

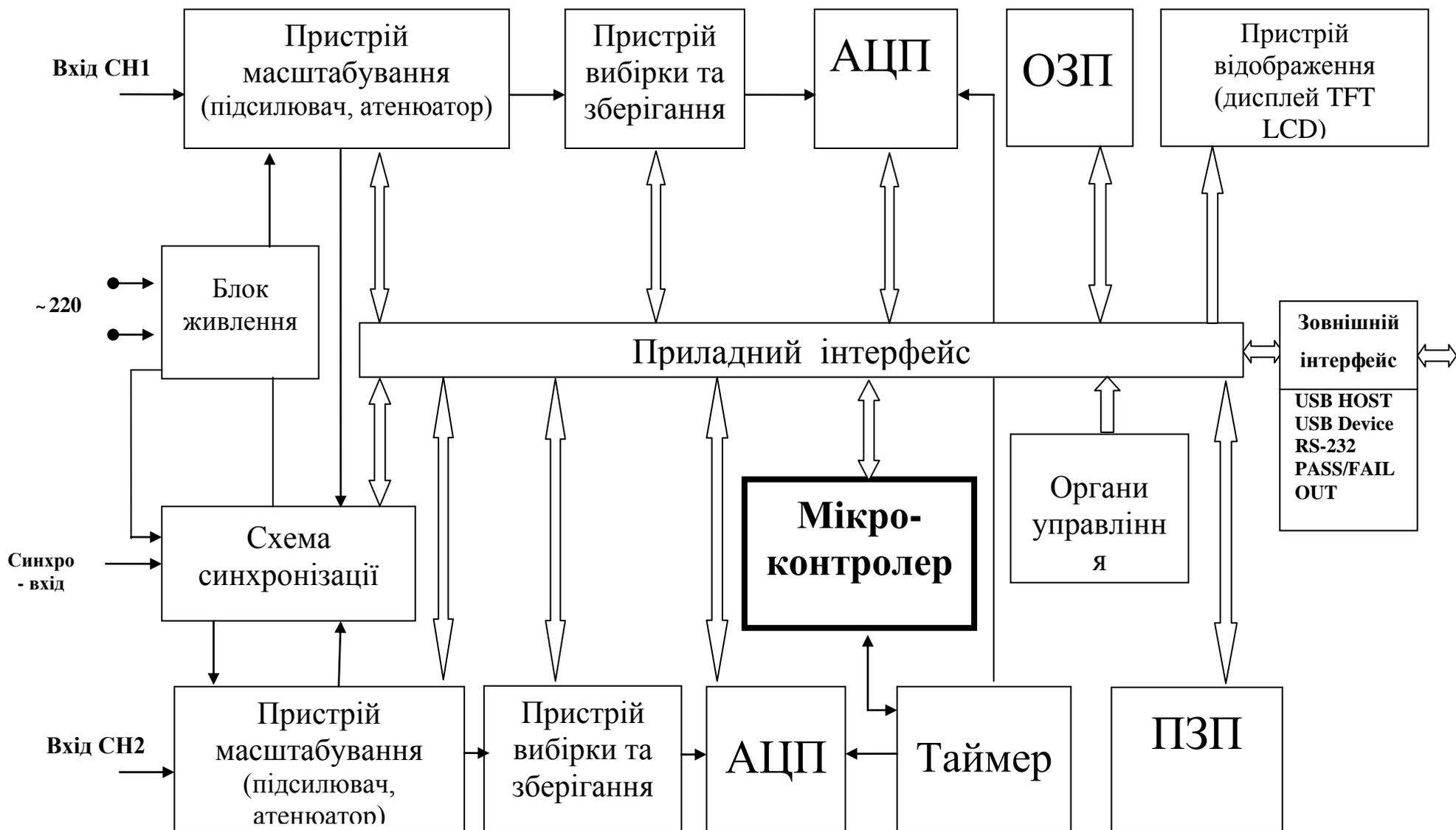


Рисунок 4.17 Структурна схема цифрового осцилографа

Для якісного зображення сигналу на екрані цілком достатньо 2 точки на 1мм. Середніх розмірів дисплей має висоту 100 мм і ширину 120 мм. Отже, на екрані повинні розташовуватися  $200 \times 240 = 48\ 000$  точок.

В цифровому осцилографі є можливість автоматичної установки коефіцієнтів горизонтального і вертикального відхилення. При цьому амплітудні й часові параметри досліджуваного сигналу визначаються за допомогою вбудованих у прилад вимірювачів. На підставі даних вимірів мікропроцесорний контролер робить обчислення необхідних коефіцієнтів відхилення та розгорнення й через інтерфейс встановлює ці коефіцієнти в апаратній частині каналів вертикального й горизонтального відхилення. Це забезпечує на екрані оптимальні розміри зображення по вертикалі й горизонталі, а також автоматичну синхронізацію сигналу.

Мікроконтролер також опитує положення органів керування на передній панелі, і дані опитування після кодування знову надходять у контролер, який через інтерфейс включає відповідний режим автоматичного виміру. Результати вимірів індуються на пристрої відображення (дисплеї), причому амплітудні й часові параметри сигналу відображаються одночасно, також ці результати можуть зберігатися необмежено довго у постійному запам'ятовуючому пристрої (ПЗП). За необхідності отримана інформація через зовнішній інтерфейс передається до комп'ютера, принтера або плоттера.

#### **4.6 Цифрові мультиметри. Застосування мікропроцесорів у вимірювальній техніці**

Узагальнена структурна схема цифрового вимірювального приладу була вже наведена вище на рис. 4.1. Загалом електричні сигнали порівняно з неелектричними значно простіше та точніше передавати, перетворювати (наприклад, підсилювати, фільтрувати, здійснювати відповідні математичні операції тощо), а також перетворювати їх в цифровий електричний сигнал (код), і далі його відображувати, зберігати, опрацьовувати тощо. Тому при вимірюванні неелектричних (фізичних, хімічних та інших) величин  $X$  їх перетворюють за допомогою первинних вимірювальних перетворювачів у електричні сигнали, найчастіше, в інтенсивність напруги  $U_x$ , частотно-часові параметри сигналів (в частоту  $f_x$  чи тривалість імпульсів  $T_x$ ), або параметри електричних кіл (електричний опір  $I_z$ , індуктивність  $L_x$  чи ємність  $C_x$ ), які далі перетворюються в інтенсивність напруги чи частотно-часові параметри.

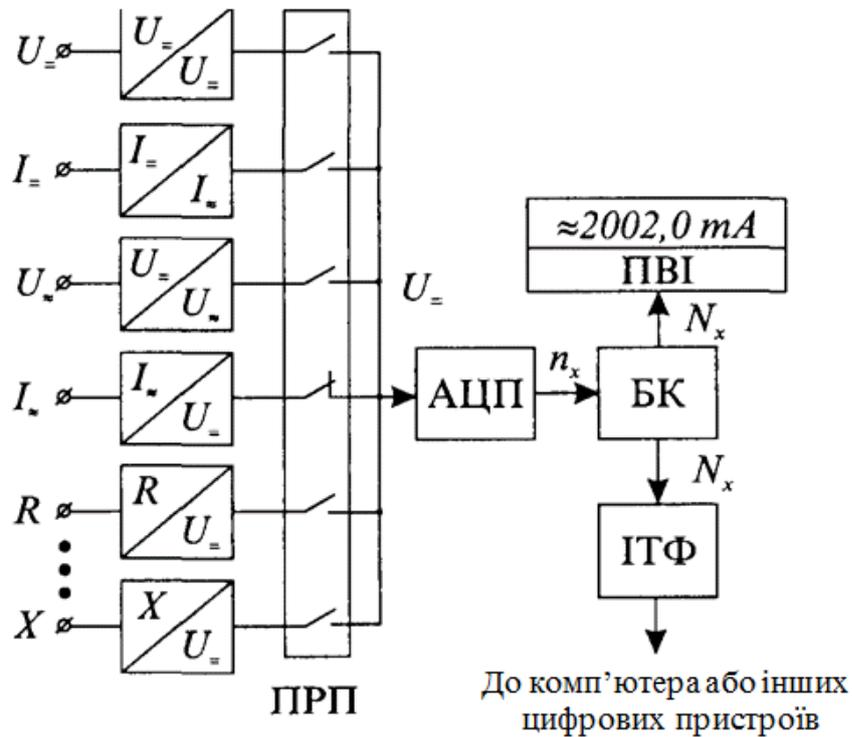


Рис. 4.18 Структурна схема цифрового мультиметра

На рис. 4.18 подана структурна схема цифрового мультиметра, який призначений для вимірювання напруги постійного струму  $U_{\sim}$ , постійного струму  $I_{\sim}$ , напруги змінного струму  $U_z$ , змінного струму  $I_z$ , опору  $R$  та інших фізичних величин  $X$ , перетворених в напругу постійного струму. Вимірювані величини під'єднуються до окремих входів мультиметра  $U_{\sim}, I_{\sim}, U_z, I_z, R, \dots, X$ , вибір роду вимірюваної величини, а також її піддіапазону вимірювання здійснюється за допомогою перемикача ПРП.

Кожна з вимірюваних величин або масштабним перетворювачем  $U_{\sim}/U_{\sim}$ , або перетворювачами роду фізичної величини

$$U_z/U_{\sim}, I_z/U_{\sim}, I_{\sim}/U_{\sim}, \dots, X/U_{\sim}$$

перетворюється в уніфікований сигнал напруги  $U_{\sim}$  постійного струму, яка, у свою чергу, за допомогою АЦП перетворюється в кодовий сигнал  $n_x$  і подається до блока керування БК.

Функціональна схема сучасного цифрового (процесорного) приладу показана на рис. 4.19. Основними пристроями такого приладу є входні пристрої (кондиціонер сигналів), АЦП, процесор (мікропроцесор), пристрої відображення, реєстрації та пересилання вимірювальних даних (інтерфейс), пристрої керування, введення даних та команд керування (клавіатура), а також блоки живлення пристрою.

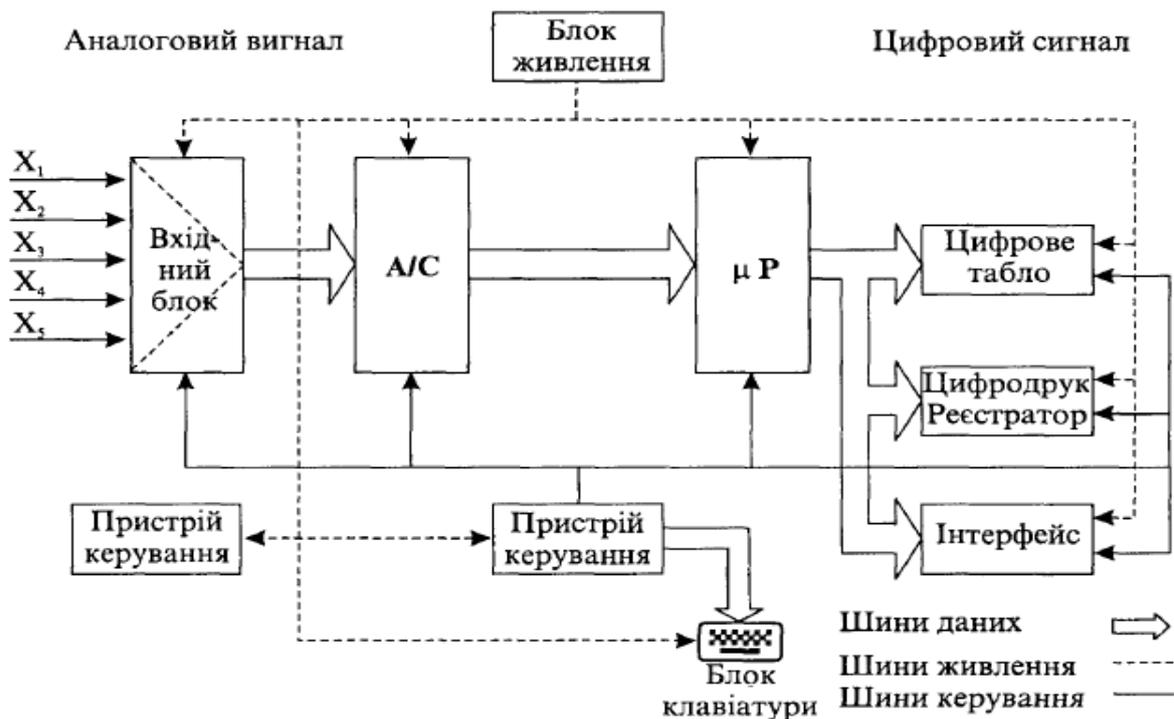


Рис. 4.19 Функціональна схема цифрового процесорного приладу

Шляхом різного виду перетворень вхідної величини значення вихідного сигналу вхідного блока доводять до номінального діапазону перетворення АЦП. Останні, здебільшого, виготовляються на заданий діапазон вхідної напруги, наприклад в діапазонах 0-1В; 0-2В; 0-5В; 0-10В або у двополярних діапазонах. Тому незалежно від роду і виду вихідного сигналу вимірювального перетворювача (сенсора) на виході вхідного пристрою мусить бути сформований сигнал із заданими властивостями, найголовніша з яких – це заданий діапазон її зміни. Цей елемент вимірювального каналу називають нормалізуючим перетворювачем, чи перетворювачем з уніфікованим вихідним сигналом. Останнім часом в зарубіжній літературі з вимірювальної техніки такі пристрої називають кондиціонерами сигналів, а відповідні вимірювальні операції називаються *кондиціонуванням вимірювального сигналу*. Дослівно англійський термін *conditioning* – означає покращувати стан, а термін *conditioned* – відповідний нормі чи стандарту. Тобто кондиціонований сигнал – це сигнал, що відповідає встановленим нормам.

Всі цифрові операції з опрацювання результатів перетворень АЦП здійснюються в мікропроцесорі відповідно до вибраної програми та команд, що можна вводити з клавіатури. Результати можуть відображатися у різній формі, запам'ятовуватися, реєструватися чи пересилатися до інших користувачів. Зазвичай аналогова та цифрова частини приладу гальванічно розділені (трансформаторним чи оптичним розв'язком), чим забезпечується високий рівень захисту від завад спільного виду.

Основні функції, що покладаються на мікропроцесори у вимірювальних приладах:

а) вимірювання – керування АЦ-перетворювачем; лінеаризація функції перетворення; автоматичний вибір межі виміру; компенсація завад; виключення систематичних похибок;

б) обробка – накопичування масивів вимірювальної інформації; побічне вимірювання; статистична та інші види обробки інформації; стиск даних;

в) керування – приймання керуючих дій оператора; настройка приладу на режим роботи; контроль за діями оператора; видача довідникової інформації; сигналізування у екстремальних ситуаціях;

г) відображення – зберігання результатів попередніх вимірювань; відображення текстової інформації; відображення графічної інформації; допоміжна та сервісна інформація (дата, час і т. п.);

д) інтерфейсні функції – керування інтерфейсом; робота в комплексі із іншими ЦВП;

е) тестові функції – самотестування; калібрування вимірювальних каналів.

Застосування мікропроцесорів (МП) у вимірювальній техніці дозволяє значно підвищити точність приладів, розширити їх можливості, підвищити надійність, дає можливість вирішувати нові задачі. У ряді випадків для ЦВП створюють багатопроцесорну систему керування, у якій здійснюється спеціалізація функцій процесорів: процесор вводу-виводу, процесор керування, процесор обробки інформації та інші.

## **4.7 Вимірювальні системи**

### **4.7.1 Класифікація, основні характеристики ВС**

Вимірювальні системи (ВС) – це сукупність вимірювальних каналів, засобів вимірювальної техніки і зв'язку, обчислювальних та інших технічних пристроїв, а також керуючих та обчислювальних програм, об'єднаних для отримання вимірювальної інформації про стан досліджуваного об'єкта в цілому. Вимірювальні системи призначаються для вимірювання не однієї величини, а сукупності величин, які характеризують стан об'єкта. При цьому ці величини можуть бути як одного виду, так і різного виду, що характеризують різні властивості об'єкта.

Наприклад, для вимірювання температури в різних просторових точках об'єкта (температурного поля у топці котлоагрегату) використовують багатоканальну вимірювальну систему, що має однотипні елементи. Для дослідження параметрів двигуна внутрішнього згорання використовують вимірювальну систему з різними вхідними величинами;

температура та тиск газів в циліндрі, напруга запалювання, швидкість обертів, витрата палива, потужність тощо.

Характерна особливість вимірювальних систем – невикористання їх для видання керуючої дії на відміну від автоматизованих систем керування (АСК). ВС можуть бути складовою частиною більш складних систем АСК, наприклад, систем зв'язку, телемеханіки. Вимірювальні системи можуть впливати на об'єкт, но тільки з метою отримання найбільш якісної інформації о системах, в яких вони зазвичай використовуються у якості постачальників інформації. Дія ВС полягає в алгоритмі вимірювань і не є наслідком обробки отриманої інформації.

Узагальнена функціональна схема вимірювальної системи наведена на рис. 4.20. На досліджуваному об'єкті встановлюються необхідні вимірювальні перетворювачі, які створюють сигнали про значення параметрів. Вихідні сигнали сенсорів за допомогою пристроїв збирання вимірювальної інформації перетворюються у цифрові дані, які пересилаються до обчислювальних пристроїв, де відбувається необхідне їх оброблення.

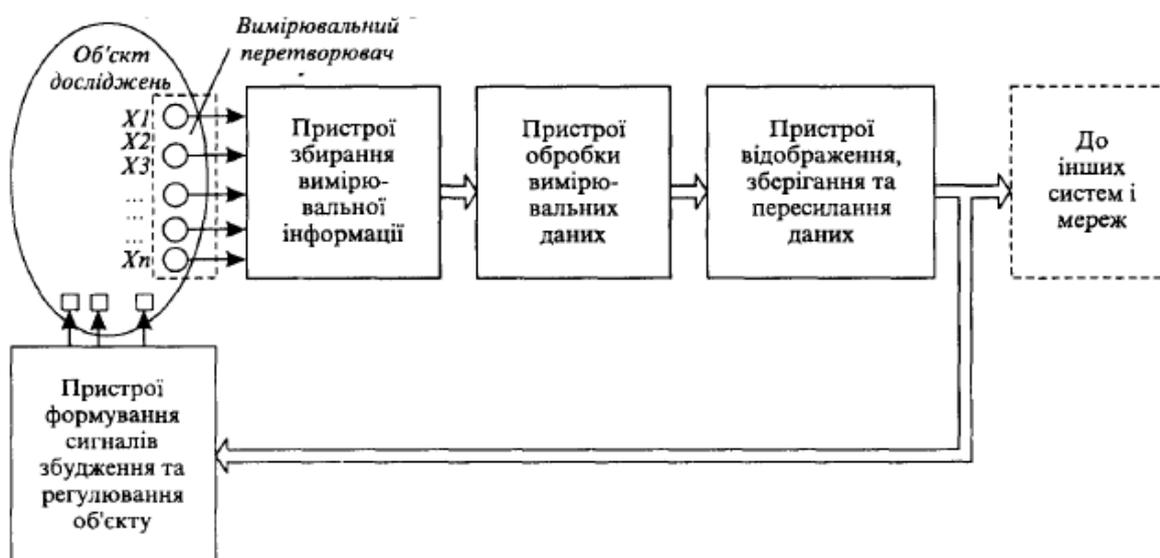


Рис. 4.20 Функціональна схема ВС

Етап оброблення вимірювальних даних містить широкий спектр математичних, зокрема логічних операцій, серед яких: розв'язування обернених вимірювальних задач для знаходження значень параметрів об'єкта за результатами вимірювань вихідних сигналів перетворювачів, цифрове згладжування, фільтрація та усереднення сигналів, їх статистичне опрацювання з метою визначення числових характеристик, лінеаризацію функцій перетворення сенсорів та вимірювальних каналів в цілому, корекцію статичних та динамічних похибок, порівняння результатів вимірювань контрольованих параметрів об'єкта з їх заданими допусками і формуванням відповідних сигналів, формування сигналів збудження об'єкта в процесі його діагностики тощо.

Ці функції виконують обчислювальні пристрої різної продуктивності, від найпростіших до надскладніших. Як обчислювальні засоби, у вимірювальних системах можуть використовуватися мікроконтролери, мікропроцесори, одноплатні та однокристальні ЕОМ, персональні комп'ютери широкого застосування, мультипроцесорні обчислювальні системи, спеціалізовані процесори тощо. Аналогічно програмне забезпечення вимірювальних систем також може бути різної складності, бути універсальним чи спеціалізованим.

Пристрої відображення, зберігання та пересилання (транспорту) даних забезпечують комунікацію вимірювальної системи з персоналом та системами інших ієрархічних рівнів, документування та архівування результатів вимірювань, контролю та діагностики об'єкту. При цьому відображення результатів може відбуватися як в цифровій, так і в аналоговій формі, за допомогою типових цифрових та аналогових відлікових пристроїв та табло, а також віртуальним способом на екранах моніторів.

З метою діагностування стану об'єкта необхідно здійснювати його збудження зовнішніми впливами і далі вимірювати реакцію об'єкта на ці збудження. Для цього служать пристрої формування сигналів збудження, в яких відбуваються зворотні операції: цифрові дані – цифро-аналогове перетворення – аналогове згладжування (фільтрація) – підсилення – зворотне перетворення електричного сигналу у вихідну неелектричну величину.

Об'єкт дослідження може бути просторово зосередженим або розпорошеним, може характеризуватися однотипними або різнотипними параметрами, тому збирання вимірювальних даних може здійснюватися зосередженим чи розподіленим способом на основі використання відповідних вимірювальних каналів, пересилання та комутації потоків даних. Важливими елементами вимірювальних систем є їх інтерфейсні компоненти, які забезпечують різні види погоджень між складовими системи: конструктивні, інформаційні, сигналові та програмні.

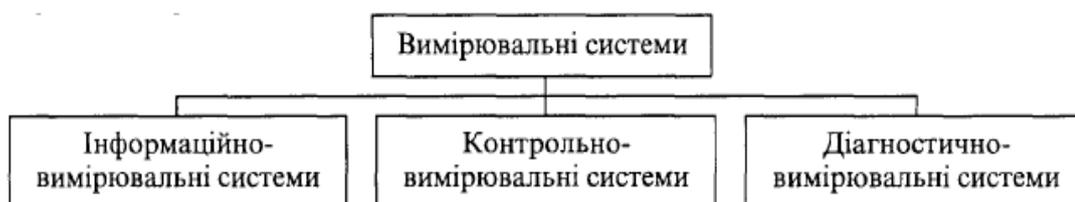


Рис. 4.21 Різновиди вимірювальних систем

Залежно від призначення вимірювальних систем розрізняють інформаційно-вимірювальні, контрольно-вимірювальні та діагностично-вимірювальні системи (рис. 4.21).

Завданням **інформаційно-вимірювальної системи** є визначення розмірів вимірюваних величин - параметрів досліджуваного об'єкта, тобто кількісного оцінювання процесів, що відбуваються в об'єкті. Такі системи переважно використовують в наукових дослідженнях.

Якщо стоїть питання встановити чи параметр (параметри) об'єкта є в нормі, чи ні, то виникає потреба реалізації формування нижнього та верхнього допустимих рівнів для кожного з параметрів об'єкта, порівняння результатів вимірювань з цими рівнями і формування відповідного результату контролю. Такі функції виконують **контрольно-вимірювальні системи**. Отже, контрольно-вимірювальна система, крім кількісного оцінювання параметрів стану об'єкта, дає також якісну його характеристику: вкладається об'єкт (або його параметри) в допустимі межі, чи ні.

Якщо ж один чи декілька параметрів, що характеризують стан об'єкта, виходять за межі допуску, то виникає проблема встановлення причини такого стану. Відповідь на це запитання дає **діагностично-вимірювальна система**. У такій системі результати діагностики отримують за допомогою відповідного збудження об'єкта і вимірювання та опрацювання реакцій на ці збудження.

За **способом обробки інформації** вимірювальні системи класифікуються на системи реального часу та системи, що накопичують інформацію. У системах реального часу обробка інформації проводиться до наступного вимірювального циклу. Такі системи використовуються як підсистеми АСК у якості постачальника інформації для наступного вироблення керуючої дії. У інших системах обробка інформації починається після закінчення вимірювань.

За **впливом на об'єкт дослідження** ВС розподіляються на пасивні та активні системи.

У пасивних вимірювальних систем дія на об'єкт вимірювання відсутня. В активних же формується дія на об'єкт за допомогою джерел тестових сигналів, яка необхідна для отримання найбільш певної інформації за малий проміжок часу та дозволяє найбільш повно досліджувати об'єкт.

В автоматизованих комп'ютерних системах керування та контролю цифрова інформація про значення технологічних параметрів може збиратися з  $N$  розпорозених у просторі технологічних об'єктів. Структура розпорозеної вимірювальної системи подана на рис. 4.22. Значення вимірюваних величин знаходяться за допомогою окремих вимірювальних каналів (сенсор + пристрій кондиціонування сигналу + АЦП + мікропроцесор), які можна розглядати як інтелектуальні вимірювальні перетворювачі  $ІВП_1, \dots, ІВП_M$ . Результати вимірювань від кожного каналу за допомогою інтерфейсів передаються до локальних вимірювальних

станцій, де здійснюється необхідне опрацювання і аналіз результатів, формування сигналів керування та корекції тощо.

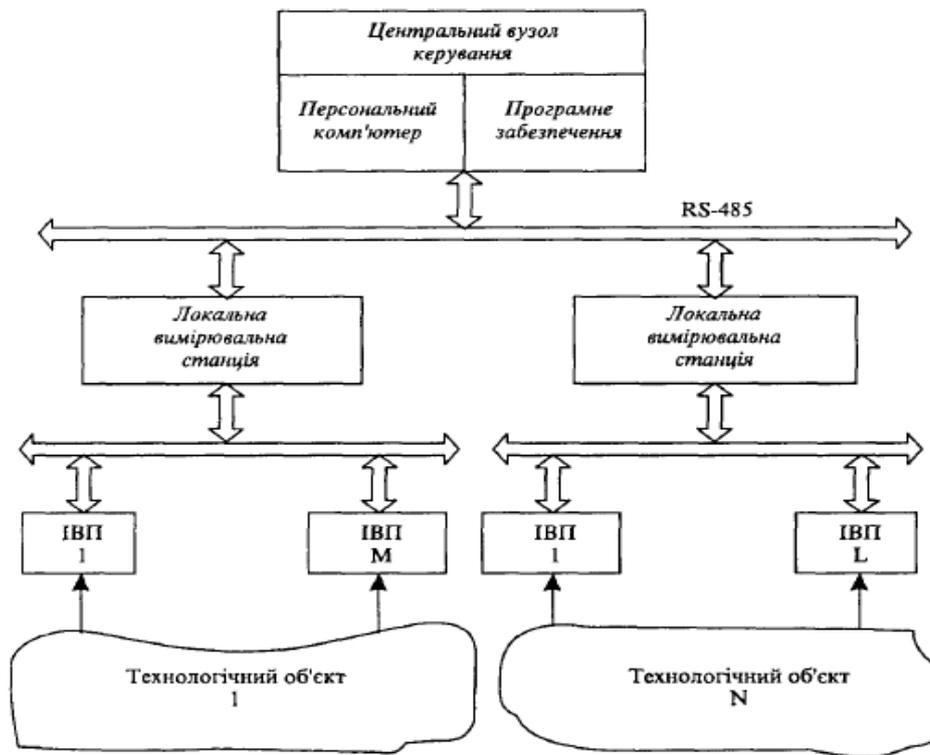


Рис. 4.22 Структура розпорошеної вимірювальної системи

Вимірювальні дані з локальної вимірювальної станції через комунікаційні вузли за допомогою інтерфейсів через відповідні канали зв'язку (радіо, оптоволоконні канали, телефонні лінії) або комп'ютерні мережі передаються до центрального вузла керування.

Центральний вузол керування може бути реалізований на основі персонального комп'ютера з відповідним програмним забезпеченням. Основними функціями центрального вузла керування є вироблення суджень про інтегральний стан контролюваного об'єкта на основі оброблення масивів вимірювальної інформації; візуалізація вибраних величин на екрані монітора; обслуговування запитів; архівація даних; формування повідомлень і підготовка даних на твердих носіях; обмін даними.

Найновішим напрямком розвитку цифрових засобів є створення **систем збирання вимірювальних даних** (СЗВД, англ. DAQ або DASY – Data Acquisition System), які можуть бути виконані як окремий пристрій, на одній платі, або навіть у вигляді однієї мікросхеми. В цих пристроях виконується повний набір комутуючих, вимірювальних, обчислювальних та інших операцій з метою формування, нагромадження і опрацювання результатів вимірювань широкого спектру вимірювальних величин як електричних, так і неелектричних. З метрологічного погляду такі пристрої належать до найважливіших функціональних частин сучасної

вимірювальної системи, а навіть часто вони самі виступають як вимірювальна система.

Основними функціональними блоками СЗВД є:

- вхідні комутатори (мультиплексори) аналогових сигналів, з кількістю входів від одиниць до кілька сотень (типово від 8 до 512);

- згадувані вище “кондиціонери” сигналів – пристрої, які виконують функції електричних перетворювачів (для перетворення вхідної електричної величини переважно в електричну напругу, найбільш придатну для подальшого перетворення), підсилення, нормування і фільтрації сигналів та інших аналогових операцій. Входи такого пристрою можуть бути несиметричними: “сигнал” – “маса”) або диференціальними: “сигнал високий (H)” V – “сигнал низький (L)” і окремо “маса” (“земля”). Вихідним сигналом такого кондиціонера зазвичай є напруга у певному діапазоні (типово від 1 до 10 В);

- аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), що здійснюють перетворення аналогового сигналу в цифрову форму. Можуть використовуватися найрізноманітніші типи АЦП, різної розрядності, швидкодії і точності.

Практичні реалізації пристроїв залежать від призначення і загальної концепції будови системи з урахуванням проблеми уніфікації в областях конструктивного поєднання та транспортування вимірювальної інформації. Широке поширення персональних комп’ютерів призвело до створення конструкцій так званих вимірювальних плат, які служать для багатоканального перетворення вимірювальних сигналів у цифрову форму і навпаки – для формування аналогових вихідних.

**Агрегатний принцип** є найбільш раціональним принципом побудови ВС. Така система виготовляється як агрегат з функціонально закінчених блоків, наприклад, частотомір, таймер, вольтметр, АЦП, ЦАП тощо. Безліч вимірювальних систем, які побудовані за цим принципом, досягається безліччю компонуємих блоків, які, у свою чергу, визначаються переліком параметрів, що вимірюються та реєструються.

При проектуванні ВС за агрегатним принципом повинні виконуватись 5 видів сумісності:

а) **інформаційна** сумісність (узгодженість вхідних та вихідних сигналів різних модулів);

б) **енергетична** сумісність (відповідність струмів та напруг живлення модулів);

в) **конструкційна** сумісність (сумісність конструктивних параметрів – розмірів, типів роз’ємів та ін.);

г) **метрологічна** сумісність (зіставлення по точності, швидкодії, діапазонів вимірів та ін.);

д) **експлуатаційна** сумісність (узгодженість по надійності, стабільності та стійкості до завад).

#### 4.7.2 Інтерфейси вимірювальних систем

**Інтерфейсом** називається система технічних пристроїв, зокрема приймально-передавальної апаратури, ліній зв'язку, вимог до характеристик сигналів, алгоритмів і правил їх опрацювання, призначена для організації обміну інформації між цифровими пристроями – цифровими вимірювальними засобами, мікропроцесорами, комп'ютерами, а також іншими периферійними пристроями (пам'яті, пристроями введення-виведення, відображення інформації тощо). У вимірювальній техніці широко використовуються як універсальні, так і спеціальні інтерфейси для вимірювальних ЗВТ – так звані приладні інтерфейси. Інтерфейс виконує в цифровій системі такі основні функції: синхронізація обміну інформацією, дешифрування адреси пристроїв вводу-виводу інформації, узгодження формату слів, дешифрування коду команд звертання до пристроїв пам'яті або пристроїв введення-виведення, електричне узгодження сигналів.

Важливою характеристикою будь-якого інтерфейсу є різновид протоколу обміну інформацією. Розрізняють синхронний і асинхронний протоколи обміну.

**Синхронний протокол** використовується в тих випадках, коли всі прилади, що беруть участь в обміні, мають однакову швидкодію. Така ситуація зустрічається досить рідко, хоча при цьому і забезпечується висока точність і швидкодія.

**Асинхронний протокол** обміну перед передачею даних вимагає опитування стану приладів, які будуть брати участь в обміні інформацією.

В залежності від способу з'єднання блоків між собою розрізняють каскадні, радіальні та магістральні інтерфейси.

В **каскадних** інтерфейсах інформація з попереднього модуля може передаватися тільки наступному. При використанні **радіального** інтерфейсу центральний модуль може зв'язуватися з кожним модулем по окремому каналу. Для цього треба мати достатню кількість каналів зв'язку, що створює значне ускладнення апаратної реалізації центрального модуля. Цей тип інтерфейсу забезпечує високу швидкодію роботи системи.

**Магістральний інтерфейс** застосовується в системах, у яких центральний модуль не володіє достатньою кількістю каналів зв'язку для підключення усіх модулів вимірювальної системи. У цьому випадку знижується швидкодія системи, однак значно спрощується апаратна реалізація інтерфейсу. Зв'язок модулів здійснюється через спільну магістраль. Застосовують також комбінації інтерфейсів: каскадно-радіальний, каскадно-магістральний.

Хоча загалом передача інформації здійснюється послідовно у часі, однак така передача може відбуватися посимвольно, біт за бітом, або послідовно-паралельно, наприклад, байт за байтом. У першому випадку маємо справу з **послідовним** інтерфейсом, з використанням двопровідної

лінії передачі. У другому випадку для передачі слова використовують багатопровідну лінію (для передачі одного байта – 8 бітів необхідно що найменше 9 ліній), при цьому організацію передачі здійснює **паралельний** інтерфейс. Очевидно, що завдяки паралельній передачі (наприклад, восьми бітів), швидкість обміну інформації у паралельному інтерфейсі набагато вища, ніж у послідовному.

Приклади широкоживаних послідовних інтерфейсів є універсальні стандартні інтерфейси RS232, RS485, в яких забезпечується повний дуплексний (двонаправлений) режим обміну інформацією, виявляються фальстартові послілки, перевіряється наявність помилок тощо. Довжина ліній зв'язку для інтерфейсу RS485 може сягати 1200 м.

Поширеними прикладом універсального паралельного інтерфейсу (а точніше послідовно-паралельного) є стандартний інтерфейс HP-IB (Hewlett-Packard Interface Bus), розроблений фірмою Hewlett-Packard для обміну інформацією між вимірювальними засобами. З часом цей інтерфейс отримав міжнародне визнання і був затверджений як міжнародний стандарт IEEE-488, IEC-625, MEK-625 (також має назву **КЗК** – канал загального користування). Для обміну інформації використовується магістраль, що містить 15 ліній, які об'єднані у три шини: шина даних – 8 проводів (ліній), шина синхронізації – 3 проводи і шина керування – 5 проводів. Цей інтерфейс представляє собою шістнадцятирозрядну двонаправлену шину, яка називається магістраллю. Відноситься до типу магістральних інтерфейсів. Він здійснює біт-паралельну, байт-послідовну передачу даних. В інтерфейсі використовується синхронний протокол обміну.

Інтерфейс КЗК дозволяє мати у системі до 15 приладів різної складності. Орієнтований на спряження пристроїв, які розташовані на відстані до 20 м.

Контролер будь-якого інтерфейсу (може бути або персональний комп'ютер, або спеціальний процесорний пристрій) виконує функції керування – задає параметри і режими роботи засобів вимірювання, синхронізує запуск і відбір інформації від потрібного пристрою, може організовувати локальні обчислювальні системи, тощо, завдяки широким функціональним можливостям інтерфейсу – послідовне, паралельне опитування системи, тестування і генерування сигналів запиту на передавання, формування вторинних адрес і т. ін. Наявність великої кількості універсальних команд дають можливість використовувати інтерфейс приладів за найрізноманітнішими призначеннями. Такий інтерфейс передбачає паралельне під'єднання декількох пристроїв, довжина лінії передачі становить кілька метрів, швидкість передачі кілька сотень біт за секунду.

З метою здійснення швидкого пересилання та збирання вимірювальної інформації у великих системах наукових досліджень були

створені спеціальні, так звані приладні, інтерфейси. Конструктивно всі пристрої збирання вимірювальної інформації виконуються у стандартних касетах з декількома типорозмірами їх ширини. Всі касети вставляються у спеціальні роз'єми шасі (блокового типу). Виводи роз'ємів мають стандартне призначення і їх контакти з'єднані з лініями відповідних шин (інформаційних, адресних та керування). Інформація передається на невелику відстань (в межах цілого блока), тому забезпечується найбільша швидкість передачі – кілька десятків сотень мегабіт за секунду. Класичним прикладом приладного інтерфейсу є інтерфейс САМАС, що був створений для вимірювальних систем при ядерних дослідженнях. Новим, значно вдосконаленим варіантом такого інтерфейсу є інтерфейс VME.

#### **4.8 Сучасний рівень метрологічних характеристик цифрових засобів вимірювання**

Завдяки відносній схемній простоті та можливості досягнення високих метрологічних властивостей АЦП з квантуванням частотно-часових параметрів приладобудівна промисловість багатьох країн світу серійно випускає на їх основі вимірювачі частоти, відношення частот, періоду, проміжків часу, фази. Основні технічні характеристики визначаються, у першу чергу, параметрами генератора опорної частоти та швидкодією елементної бази. Блок керування сучасних цифрових приладів виконується, здебільшого, на базі мікропроцесорів або однокристальних мікро-ЕОМ, що дає змогу легкого розширення їх функціональних можливостей. Тому вимірювачі частотно-часових параметрів є мультиметрами, призначені для вимірювання частоти, періоду, проміжків часу, відношення (різниці) частот, фази. Виготовляють високочастотні (діапазон вимірюваних сигналів до десятків – сотень гігагерц) та низькочастотні (починаючи від тисячних – десятитисячних герца) універсальні частотоміри. Наприклад, моделі 2741 та 2700 англійської фірми Solartron охоплюють вказані частотні діапазони і мають вбудовані прецизійні генератори опорної частоти високої часової стабільності: від  $5 \cdot 10^{-10}$  1/день до  $5 \cdot 10^{-7}$  1/місяць; чутливість по входу  $30\text{mV}$ ; діапазон вимірювання фази  $0...360^\circ$  з роздільною здатністю  $0,1^\circ$ .

Серед цифрових приладів найточнішим є вольтметри постійного струму на основі АЦП з інтегруючим перетворенням, в тому числі типу сигма-дельта. Завдяки інтегруючому перетворенню вхідного сигналу суттєво послаблюється вплив зовнішніх та внутрішніх завад та шумів. Зокрема цифровий вольтметр моделі 7081 англійської фірми Solartron має такі характеристики: діапазон вимірювання напруги постійного струму від  $10\text{nV}$  до  $1000\text{V}$  з похибкою не більшою  $\pm 0,00012\%$ .

Цифрові мультиметри цієї фірми дають можливість вимірювання напруги постійного струму, постійного струму, напруги змінного струму, змінного струму, електричного опору; діапазон вимірювання діючого

значення напруги змінного струму частотою від  $1,5\text{Гц}$  до  $1\text{МГц}$  – від  $1\text{мкВ}$  до  $750\text{В}$  з похибкою не більшою  $\pm 0,015\%$ ; електричного опору постійного струму від  $10\text{мкОм}$  до  $1\text{ГОм}$  з похибкою не більшою  $\pm 0,00015\%$ . Технічна характеристика мультиметрів з ширшими функціональними можливостями (модель 7151 Solartron): напруга постійного струму від  $100\text{нВ}$  до  $1000\text{В}$  з похибкою  $\leq \pm 0,002\%$ ; діюче значення напруги змінного струму від  $1\text{мкВ}$  до  $750\text{В}$  з похибкою  $\leq \pm 0,05\%$ ; постійний струм від  $1\text{мкА}$  до  $2\text{А}$  з похибкою  $\leq \pm 0,02\%$ ; діюче значення змінного струму від  $10\text{мкА}$  до  $2\text{А}$  з похибкою  $\leq \pm 0,05\%$ ; електричний опір з чотири- та дво- провідною лінією зв'язку від  $1\text{МОм}$  до  $20\text{МОм}$  з похибкою  $\leq \pm 0,002\%$ ; температуру в комплекті з платиновим термоперетворювачем опору від  $-200$  до  $+600$  °С з похибкою  $\leq \pm 0,1^\circ\text{C}$ .

Одним з найточніших вимірювачів напруги є модель 2002 фірми Keithley роздільною здатністю  $8\frac{1}{2}$  десяткових розрядів, з  $\text{ОМР} = 1\text{нВ}$  на найнижчому діапазоні. Модель 2700 цієї ж фірми при вимірюванні напруги забезпечує роздільну здатність  $100\text{нВ}$  в діапазоні  $100\text{мВ}$  (максимальний діапазон –  $1000\text{В}$ ). За 90 днів роботи похибка приладу (в режимі вольтметра постійної напруги) не перевищує  $\pm 0,0025\%$  від виміряного значення напруги плюс  $\pm 0,0035\%$  від діапазону, нелінійність характеристики менше  $\pm 1\text{ppm}$  від виміряного значення) плюс  $\pm 1\text{ppm}$  від діапазону.

Метрологічні характеристики цифрових мультиметрів також досягли високого рівня. Зокрема, згадувана модель 2700 фірми Keithley забезпечує вимірювання електричного опору в діапазонах від  $100\text{Ом}$  до  $100\text{МОм}$  з роздільною здатністю від  $100\mu\text{Ом}$  до  $100\text{Ом}$ , відповідно, при похибках, які не перевищують за 90 днів від  $\pm 0,008\%$  (на старшому діапазоні –  $\pm 0,02\%$ ) від виміряного значення опору плюс  $\pm 0,0020\%$  (на старшому діапазоні –  $\pm 0,0030\%$ ) від діапазону. Діюче значення змінної напруги (True RMS) можна вимірювати в діапазоні від  $100\text{мВ}$  до  $750\text{В}$  з роздільною здатністю від  $0,1\mu\text{В}$  до  $1\mu\text{В}$  в частотних смугах від  $3\text{Гц}$  до  $300\text{кГц}$  при допустимій похибці на основному діапазоні (від  $20\text{Гц}$  до  $20\text{кГц}$ ), що за 90 днів не перевищує  $\pm 0,06\%$  від виміряного значення опору плюс  $\pm 0,03\%$  від діапазону. Мультиметр модель 2700 Keithley дає можливість вимірювати також силу постійного та змінного струмів, частоти та періоду сигналів, температуру з використанням 8-ми термоелектричних перетворювачів зі стандартними градуювальними характеристиками, а також резистивними та напівпровідниковими (термістори) перетворювачами температури.

## ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, В. О. Яцук, В.М. Ванько, Т. Г. Бойко; За ред. проф. Є. С. Поліщука - 2-е вид., переробл. і доповн. – Л. : Вид-во Львів. політехніки, 2012. –534 с.
2. Авдеев Б.Я., Антонюк Е.М., Душин Е.М. и др. Основы метрологии и электрические измерения / Б.Я.Авдеев, Е.М. Антонюк, Е.М.Душин и др.; Под ред. Е.М.Душина – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.
3. Байда Л.И., Добротворский Н.С., Е.М. Душин Е.М. и др. Электрические измерения / Л.И.Байда, Н.С.Добротворский, Е.М. Душин и др.; Под ред. А.В.Фремке и Е.М.Душина. – Л.: Энергия, 1980. – 392 с.
4. Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А. Измерительная техника / Т.М.Алиев, А.А. Тер-Хачатуров. – М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.
5. Орнатский П.П. Автоматические цифровые измерительные приборы / П.П.Орнатский. – К.: Вища школа, 1985. – 560 с.
6. Орнатский П.П. Автоматические измерения и приборы / П.П.Орнатский. – К.: Вища школа, 1980. – 558 с.
7. Поліщук Є.С. Измерительные преобразователи / Є. С. Поліщук – К.: Вища школа, 1981. – 296 с.
8. Евтихийев Н.Н., Купершмидт Я.А. и др. Измерения электрических и неэлектрических величин. / Н.Н.Евтихийев, Я.А. Купершмидт и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

## ЗМІСТ

Вступ .....	3
1. Основи метрології.....	4
2. Електромеханічні вимірювальні прилади .....	42
3. Мостові вимірювальні прилади та осцилографи .....	86
4. Цифрові вимірювальні прилади та вимірювальні системи .....	99
Використана література .....	140