

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ З ОСНОВАМИ**  
**МЕТРОЛОГІЇ**

курс лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти ОПП  
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141  
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної форми здобуття вищої  
освіти

**Миколаїв**

**2023**

УДК 006.91:621.039.564  
К64

Друкується за рішенням науково-методичної комісії інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 13.11.2023 р., протокол № 3.

Укладач:

О. С. Садовий – канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Рецензенти:

І. С. Білюк – канд. техн. наук, доцент завідувач кафедри автоматичної, НУК ім. адм. Макарова.

І. П. Атаманюк – д-р техн. наук, професор кафедри прикладної математики, Варшавського університету наук про життя (Республіка Польща).

**Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології : курс лекцій /**  
**К64** О. С. Садовий. – Миколаїв : МНАУ, 2023. – 84 с.

У курсі викладено теоретичний матеріал з дисципліни контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології.

УДК 006.91:621.039.564

© Миколаївського національного аграрного  
університету, 2023  
© Садовий О.С., 2023

## ПЕРЕДМОВА

Вивчення природних явищ, розвиток науки і техніки нерозривно пов'язані з вимірюваннями. Електричні вимірювання грають важливу роль як найбільш надійний і самий об'єктивний спосіб контролю виробничих процесів. Дисципліна "Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології" надає можливість майбутнім фахівцям правильно використовувати електровимірювальну техніку в сукупності з відповідними методами електричних вимірювань в усіх галузях використання електротехнічних пристроїв в аграрному виробництві та забезпечувати їх безаварійну роботу.

Програмою дисципліни передбачено вивчення загальних питань об електричних вимірюваннях, будови та роботи вимірювальних приладів, а також способів та методів вимірювання електричних і неелектричних величин.

Мета вивчення дисципліни – надання майбутнім фахівцям теоретичних знань і практичних навичок о будові основних електровимірювальних приладів, принципах і методах загальних і спеціальних електричних вимірювань, їх практичному використанні в техніці електроприводу, автоматики, енергетичному господарстві, енергопостачанні в сільському господарстві.

**Мета** вивчення дисципліни – надання майбутнім фахівцям теоретичних знань і практичних навичок о будові основних електровимірювальних приладів, принципах і методах загальних і спеціальних електричних вимірювань, їх практичному використанні в техніці електроприводу, автоматики, енергетичному господарстві, енергопостачанні в сільському господарстві.

## ЛЕКЦІЯ 1

### Основні поняття і визначення

Вимірюванням називається знаходження значення фізичної величини дослідним шляхом за допомогою спеціальних технічних засобів.

Результатом виміру є значення фізичної величини, знайдене шляхом її виміру.

Наука про виміри, методи і засоби забезпечення їх єдності, а також способи досягнення необхідної точності називається метрологією.

Під єдністю вимірів розуміють такий стан вимірів, при яких їх результати, виражені в узаконених одиницях і погрішність вимірів відомі із заданою ймовірністю. Єдність вимірів потрібна для забезпечення можливості порівняння результатів вимірів виконаних в різних місцях, в різний час, з використанням різних методів і засобів вимірів.

Виміри здійснюються за допомогою технічних засобів вимірювання, які діляться на заходи, вимірювальні перетворювачі, вимірювальні прилади, вимірювальні установки і вимірювальні системи.

Міра - засіб вимірів, призначений для відтворення фізичної величини заданого розміру.

Вимірювальний перетворювач - засіб вимірів для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, зручній для передачі, подальшого перетворення, обробки або зберігання, але непридатної для безпосереднього сприйняття спостерігача.

Електричний датчик - це один або декілька вимірювальних перетворювачів, що служать для перетворення вимірюваної неелектричної величини в електричну.

Вимірювальний прилад - засіб вимірів, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, доступній для безпосереднього сприйняття спостерігачем.

Вимірювальна установка - сукупність функціонально об'єднаних засобів вимірювань, призначене для вироблення сигналів вимірювальної інформації у

формі, зручній для безпосереднього сприйняття спостерігачем і розташована в одному місці.

### Класифікація методів вимірювань

Виміряти величину – можливо визначити методом фізичного експерименту, скільки разів міститься в ній інша величина такого ж роду, прийнята за одиницю.

#### Електричні вимірювання:

1) Непрямі методи

2) Прямі методи

- Метод порівняння (Нульовий метод; Метод заміщення;

Диференціальний метод)

- Метод безпосередньої оцінки

3) Сукупні вимірювання

Прямі вимірювання - це такі вимірювання, при яких безпосередньо вимірюють величину, що цікавить, за допомогою приладів (вимір сили струму - А, наприклад).

Непрямі вимірювання - це такі вимірювання, при яких вимірювану величину обчислюють за результатами прямих обчислень інших величин, пов'язаних з вимірюваною величиною відомою математичною залежністю (наприклад, вимірявши силу струму  $I$  і напруга  $U$ , обчислюють потужність  $P=UI$ ).

Сукупні вимірювані проводяться одночасно над декількомаоднойменними величинами, причому шукані значення величини знаходять рішенням системи рівнянь, що отримуються при прямих вимірах різних поєднань цих величин (наприклад, знаходження опору двох резисторів за результатами виміру послідовного і паралельного з'єднань цих резисторів, значення опору знаходиться з системи двох рівнянь).

Метод безпосередньої оцінки. Вимірювану величину визначають за свідченнями одного або декількох приладів, проградуєваних в одиницях вимірюваних величин.

Методи порівняння. Вимірювану величину порівнюють з мірою, при цьому застосовуються також вимірювальний прилад, проте він не вимірює безпосередньо шукану величину. До методів порівняння відносяться:

- нульовий метод, при якому дія вимірюваної величини урівноважується відомою величиною (мірою), при цьому вимірювальний прилад, включений в ланцюг, показує нуль (вимірювальний міст R, L, C).

- диференціальний метод, при якому на вимірювальний прилад впливає різниця між вимірюваною величиною і відомою, відтворюючою мірою. У відмінності від нульового методу в цьому випадку вимірювана величина урівноважується не повністю. Точність методу підвищується при зменшенні різниці між вимірюваною і відомою величинами.

- метод заміщення, при якому вимірювану величину заміщають відомою регульованою величиною (мірою) такого ж роду, підбираючи її так, щоб не помінялися показання приладу в ланцюзі (наприклад, визначаючи місткість конденсатора, включеного в коливальний контур, домагаються резонансу, а потім замість конденсатора з невідомою місткістю  $C_x$  включають змінний зразковий конденсатор і знову домагаються резонансу зміною значення місткості зразкового конденсатора, (при резонансі  $C_x = C_0$ ).

## ЛЕКЦІЯ 2

### Похибки вимірів

При будь-яких вимірах через недосконалість їх методів, неточність вимірювальних приладів та інші чинники виникають похибки, тобто виміряна величина відрізняється від її дійсного значення, під яким розуміють величину, яка знайдена точнішими методами і приладами.

Алгебраїчна різниця між знайденим  $X$  і дійсним  $X_0$  значенням вимірюваної величини називається абсолютною похибкою виміру.

$$\Delta X = X - X_0$$

Відносною похибкою виміру називається виражене у відсотках відношення абсолютної похибки виміру до дійсного значення вимірюваної величини.

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} \cdot 100\%$$

Залежно від причин виникнення похибки вимірювання поділяються на:

- систематичні, які при повторних вимірах однієї і тієї ж величини залишаються незмінними або змінюються по певному визначеному закону (неточне градування шкали, неточна установка на нуль, прилад знаходиться в зоні дії постійних магнітних полів і т.д.)

- випадкові, які не підкоряються якому-небудь закону. Ці погрішності виникають через численні змінні причини випадкового характеру, між якими відсутні взаємні зв'язки (механічні струси, тимчасові відсутності контакту в схемі і так далі)

- промахи - дуже великі погрішності, що різко спотворюють результати вимірів. Вони виникають внаслідок несправностей вимірювальних приладів, неправильного відліку за шкалою, помилок у вимірювальних системах і так далі. Результати вимірів, що містять промахи, не є достовірними і мають бути виключені.

### Основні характеристики вимірювальних приладів

Функція перетворення - функціональна залежність між вихідною величиною  $y$

і вхідною величиною  $x$ . Може задаватися аналітично, таблично або графічно. Чутливість - це відношення зміни вихідної величини вимірювального приладу до зміни вхідної величини, що викликала її

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} \cdot 100\%$$

Абсолютна похибка приладу  $\Delta A$  - різниця між свідченням приладу  $A_{\text{вим}}$  і дійсним значенням вимірюваної величини  $A_{\text{д}} = A_{\text{вим}} - A_{\text{д}}$

Поправка приладу  $\delta A$  - це абсолютна похибка із зворотним знаком

$$\delta A = -\Delta A.$$

Абсолютна похибка і поправка виражаються в тих же одиницях, що і вимірювана величина.

Відносна похибка приладу  $\gamma$  - це виражене у відсотках відношення абсолютної похибки  $\Delta A$  до істинного значення  $A$  вимірюваної величини

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

Міру точності характеризують приведеною похибкою приладу під якою розуміють виражене у відсотках відношення абсолютної похибки  $\Delta A$  до верхньої межі виміру (номіналу) приладу  $A_H$

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

Для приладів з нерівномірною шкалою приведена похибка визначається залежно від довжини шкали  $l_{ш}$

$$\gamma = \frac{\Delta l}{l_{ш}} \cdot 100\%$$

де  $\Delta l$  - довжина відрізка дуги шкали приладу, що лежить між відмітками вимірюваного і дійсного значень вимірюваної величини. Найбільша приведена похибка, яка допускається для вимірювального приладу по ГОСТ носить назву допустимої похибки

$$\gamma_D = \frac{\Delta A_{\text{наиб}}}{A_H} \cdot 100\%$$

Поріг чутливості, - це зміна вимірюваної величини, що викликає найменшу зміну свідчень, помітну при нормальному для цього приладу способі відліку.

#### Визначення похибки вимірювань

1. Величина опору вимірювалася омметром з нерівномірною шкалою.  
Довжина шкали



$l_m = 100$  мм. Прилад показав  $R_{\text{изм}} = 600$  Ом. Дійсне значення вимірюваного опору  $R_0 = 640$  Ом відповідає відмітці на шкалі, що віддалена від показаного на  $\Delta l = 1,2$  мм. Визначити приведену похибку приладу та поправку при вимірюванні.

1) Приведена похибка приладу

$$\gamma_{\text{п}} = \frac{\Delta l}{l_m} \cdot 100\% = \frac{1,2}{100} \cdot 100\% = 1,2\%$$

2) Абсолютна похибка приладу

$$\Delta R = R_{\text{изм}} - R_0 = 600 - 640 = -40 \text{ Ом}$$

3) Поправка приладу  $\delta R = -\Delta R = 40$  Ом

2. Вольтметр з верхньою межею виміру напруги  $U_{\text{н}} = 150$  В при включенні в ланцюг показав  $U_{\text{изм}} = 63$  В. Свідчення зразкового вольтметра, включеного паралельно  $U_0 = 60$  В. Визначити абсолютну, відносну і приведену похибку і поправку приладу.

1) Абсолютна похибка

$$\Delta U = U_{\text{изм}} - U_0 = 63 - 60 = 3 \text{ В}$$

2) Відносна

$$\gamma = \frac{\Delta U}{U_0} \cdot 100\% = \frac{3}{60} \cdot 100\% = 5\%$$

3) Приведена відносна похибка приладу

$$\gamma_{\text{п}} = \frac{\Delta U}{U_{\text{н}}} \cdot 100\% = \frac{3}{150} \cdot 100\% = 2\%$$

4) Поправка приладу

$$\delta U = -\Delta U = -3 \text{ В}$$

Визначення найбільшої можливої абсолютної та відносної похибки

Найбільша можлива абсолютна похибка

$$\Delta A_{\text{нв}} = \pm \gamma_{\text{д}} \frac{A_{\text{н}}}{100\%} \quad (\gamma_{\text{д}} - \text{найбільша приведена похибка})$$

Величина  $\gamma_{\text{д}}$ , що визначає клас точності приладу вказується на його шкалі.

Найбільша можлива відносна похибка

$$\gamma_{\text{нв}} = \pm \gamma_{\text{д}} \frac{A_{\text{н}}}{A_{\text{изм}}}$$

3. Є два амперметри: класу 1 з межею виміру 50 А і класу 2,5 з межею виміру 15 А. Який з цих приладів слід застосувати для виміру сили струму 10А, щоб найбільша можлива відносна похибка не перевищувала 4%, і яка при цьому буде найбільша можлива абсолютна похибка?

1) Найбільша можлива відносна похибка при вимірюванні першим амперметром

$$\gamma_{\text{нв}_1} = \gamma_{\text{д}_1} I_{\text{н}_1} / I_{\text{изм}} = 1 \cdot 50 / 10 = \pm 5\%$$

2) Найбільша можлива відносна похибка при вимірюванні другим амперметром

$$\gamma_{\text{нв}_2} = \gamma_{\text{д}_2} I_{\text{н}_2} / I_{\text{изм}} = 2,5 \cdot 15 / 10 = \pm 3,75\%$$

3) Для вимірювання слід застосовувати другий амперметр оскільки при цьому  $\gamma_{\text{нв}} < 4\%$

4) Найбільша можлива абсолютна похибка вимірювання

$$\Delta A_{\text{нв}} = \gamma_{\text{д}} \frac{I_{\text{н}_2}}{100\%} = \pm 2,5 \cdot 15 / 100\% = \pm 0,375 \text{ А.}$$

Отже, виміряна сила струму 10 А може відрізнятись від дійсної не більше ніж на  $\pm 3,75\%$

З прикладу виходить, що результат виміру буде точнішим, коли значення вимірюваної величини близьке до межі виміру приладу.

Визначення найбільшої можливої відносної похибки при непрямому методі вимірювань.

Шукана величина визначається виразом

$$X = B^n C^m D^k \text{ де } B, C, D \text{ — величини отримані при прямих вимірах.}$$

Прологарифмуємо, а потім продиференціюємо цей вираз

$$\ln y = n \ln B + m \ln C + k \ln D$$

$$\frac{dx}{x} = n \frac{dB}{B} + m \frac{dC}{C} + k \frac{dD}{D}$$

Замінімо диференціали  $dx$ ,  $dB$ ,  $dC$ ,  $dD$  приростом  $\Delta x$ ,  $\Delta B$ ,  $\Delta C$ ,  $\Delta D$ , які можна розглядати як абсолютні похибки отримаємо

$$\frac{\Delta x}{x} = n \frac{\Delta B}{B} + m \frac{\Delta C}{C} + k \frac{\Delta D}{D} \text{ де знаменники – відносні похибки}$$

$$\gamma_x = n\gamma_b + m\gamma_c + k\gamma_D$$

Для визначення найбільшої можливої абсолютної похибки  $\Delta A_{\text{нб}}$  при непрямому вимірі необхідно вичислити вимірювану величину  $A_{\text{изм}}$

$$\gamma_{\text{нб}} = \gamma_{\text{д}} \frac{A_{\text{н}}}{A_{\text{изм}}}; \quad \gamma_{\text{д}} A_{\text{н}} = \gamma_{\text{нб}} A_{\text{изм}};$$

$$\Delta A_{\text{нб}} = \gamma_{\text{д}} \frac{A_{\text{н}}}{100\%}; \quad \Delta A_{\text{нб}} = \gamma_{\text{нб}} A_{\text{изм}}.$$

4. Визначити найбільшу відносну і абсолютну похибки при вимірюванні непрямим методом енергії, споживаної ЕД постійного струму за 10 годин його роботи. Підведена напруга 220 В виміряна вольтметром класу точності 1,5 з межею виміру 220 В, а сила струму 25 А - амперметром класу точності 1 з межею виміру 50А. Час вимірянй з точністю до 3 хвилин.

1) Найбільша можлива відносна похибка вимірювання напруги

$$\gamma_{\text{нб}_V} = \gamma_V \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{изм}}} = \pm 1,5 \cdot \frac{250}{220} = \pm 1,7\%$$

2) Найбільша можлива відносна похибка вимірювання сили струму

$$\gamma_{\text{нб}_i} = \gamma_i \frac{I_{\text{н}}}{I_{\text{изм}}} = \pm 1 \cdot \frac{50}{25} = \pm 2\%$$

3) Найбільша можлива відносна похибка вимірювання часу

$$\gamma_t = \gamma_{\text{точ}} / t_{\text{изм}} \cdot 100\% = \frac{3}{60} \cdot 100\% = \pm 0,5\%$$

4) Найбільша можлива відносна похибка вимірювання енергії

$$\gamma_w = \pm (\gamma_{\text{нб}} U + \gamma_{\text{нб}_i} + \gamma_t) = \pm (1,7 + 2 + 0,5) = \pm 4,2\%$$

5) Виміряна енергія

$$W_{\text{изм}} = U_{\text{изм}} \cdot I_{\text{изм}} \cdot t_{\text{изм}} = 220 \cdot 25 \cdot 10 = 55 \text{ кВт/ч}$$

б) Найбільша абсолютна похибка вимірювання енергії

$$\Delta W_{\text{нв}} = \gamma_W \frac{W}{100} = 4,2 \cdot 55 / 100 = 2,21 \text{ кВт/ч}$$

### Міжнародна система одиниць (самостійно)

Для виконання будь-якого виду вимірів потрібні певні одиниці виміру фізичних величин. Сукупність таких одиниць, що охоплює усі або деякі області вимірів, є системою одиниць.

У 1960р. в цілях міжнародної уніфікації одиниць фізичних величин була прийнята Міжнародна система одиниць СІ (System International)

### Основні одиниці СІ

| Найменування           | Одиниця виміру | Скорочене позначення |            |
|------------------------|----------------|----------------------|------------|
|                        |                | Російське            | міжнародне |
| Довжина                | метр           | м                    | m          |
| Маса                   | кілограм       | кг                   | kg         |
| Час                    | секунда        | с                    | s          |
| Сила електр.<br>Струму | Ампер          | А                    | A          |
| Температура            | Кельвін        | К                    | K          |
| Сила світла            | Канделла       | Кд                   | Cd         |

Електричні і магнітні одиниці СІ є похідними і утворюються з основних на підставі відомих фізичних законів (наприклад, заряд  $q=It$ ,  $1\text{К}=1\text{А}\cdot 1\text{с}$ )

|                                |               |     |          |
|--------------------------------|---------------|-----|----------|
| Електричний заряд              | Кулон         | Кл  | К        |
| Напруга, потенціал             | Вольт         | В   | V        |
| Напруженість ел.<br>стат. Поля | Вольт на метр | В/м | V/m      |
| Опір                           | Ом            | Ом  | $\Omega$ |

|                         |                            |                   |                   |
|-------------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|
| Провідність             | Сименс                     | См                | S                 |
| Електр. Місткість       | Фарад                      | Ф                 | F                 |
| Сила                    | Ньютон                     | Н                 | N                 |
| Робота і енергія        | Джоуль                     | Дж                | J                 |
| Активна потужність      | Ват                        | Вт                | W                 |
| Реактивна               | Вар                        | Вар               | var               |
| Повна                   | Вольт-ампер                | В·А               | V·A               |
| Магн. Потік             | Вебер                      | Вб                | Wb                |
| Магн. Індукція          | Тесла                      | Тл                | T                 |
| МДС                     | Ампер                      | А                 | A                 |
| Напруженість магн. Поля | Ампер на метр              | А/м               | A/m               |
| Індуктивність           | Генрі                      | Гн                | H                 |
| Світловий потік         | Люмен                      | Лм                | Lm                |
| Яскравість              | Кандела на квадратний метр | кд/м <sup>2</sup> | cd/m <sup>2</sup> |
| Освітленість            | Люкс                       | Лк                | Lx                |
| Частота                 | Герц                       | Гц                | Hz                |

Кратні і дольні одиниці утворюються додаванням приставок.

|       |    |           |       |    |            |
|-------|----|-----------|-------|----|------------|
| Тера  | Т  | $10^{12}$ | санті | с  | $10^{-2}$  |
| Гіга  | Г  | $10^9$    | мілі  | м  | $10^{-3}$  |
| Мега  | М  | $10^6$    | мікро | мк | $10^{-6}$  |
| кіло  | к  | $10^3$    | нано  | н  | $10^{-9}$  |
| гекто | г  | $10^2$    | пико  | п  | $10^{-12}$ |
| дека  | да | $10^1$    | фемто | ф  | $10^{-15}$ |
| деци  | д  | $10^{-1}$ | ато   | а  | $10^{-18}$ |

## ЛЕКЦІЯ 3

### Класифікація електровимірювальних приладів

Залежно від способу перетворення вимірюваної електричної величини в зусилля, що переміщає рухливу частину електровимірювального приладу, а також від їх конструктивних особливостей прилади класифікуються по системах.

Магнітоелектрична система: рухлива частина приладу рухається в результаті взаємодії контура, що обтікається струмом з полем постійного магніта. Конструктивно прилади виконуються як з рухливою рамкою, так і з рухливим магнітом.

Електромагнітна система: рухлива частина приладу (сердечник з феромагнітного матеріалу) рухається в результаті дії на нього магнітного поля нерухомої котушки із струмом.

Електродинамічна система: прилад складається з нерухомої котушки, усередині якої розміщена рухлива котушка. При проходженні струму по котушках між ними виникає взаємодія, в результаті якої переміщається рухлива котушка.

Феродинамічна система: принцип такий же як і електродинамічної системи. Відмінність: наявність сердечника з феромагнітного матеріалу, сприяючого посиленню магнітного поля.

Індукційна система: прилад складається з двох або декількох котушок, обтічних змінним струмом і що створюють змінні магнітні поля, що індують струми в рухливій частині, що складається з алюмінієвого диска. В результаті взаємодії змінних полів з наведеними струмами відбувається переміщення рухливої частини приладу.

Термоелектрична система складається з термоперетворювача та вимірювального механізму магнітоелектричної системи.

Випрямна система складається з напівпровідникових випрямлячів та вимірювального механізму магнітоелектричної системи.

Електронна система є вимірювальною схемою, що складається з електронного пристрою, а в якості індикатора використовується магнітоелектричний вимірювальний механізм.








Електростатична система: рухома та нерухома частини прилада заряджені електричними зарядами, внаслідок чого між ними виникає взаємодія, що приводить до переміщення рухомої частини приладу.




Вібраційна система: рухома частина приладу коливається (вібрує) під дією змінного магнітного поля, створюваного котушкою зі змінним струмом.

#### Маркування приладів




Для того щоб можна було отримати уявлення про електровимірювальні прилади без детального вивчення його опису або паспорта, на шкалі приладу та на його зовнішній лицьовій наноситься спеціальне маркування, що складається з умовних позначень.

#### Умовне позначення      Пояснення









|   |   |
|---|---|
| Магнітоелектричний прилад з рухомою рамкою..... |  |
| Магнітоелектричний прилад з рухомим магнітом    |  |
| Електромагнітний прилад                         |  |
| Електродинамічний прилад...                     |  |
| Феродинамічний прилад                           |  |
| Індукційний прилад                              |  |
| Магнітоіндукційний прилад                       |  |

|  |   |
|--|---|
| Електростатичний прилад                          |  |
| Вібраційний прилад                               |  |
| Тепловий прилад з проволокою, що нагрівається... |  |

Позначення виду струму

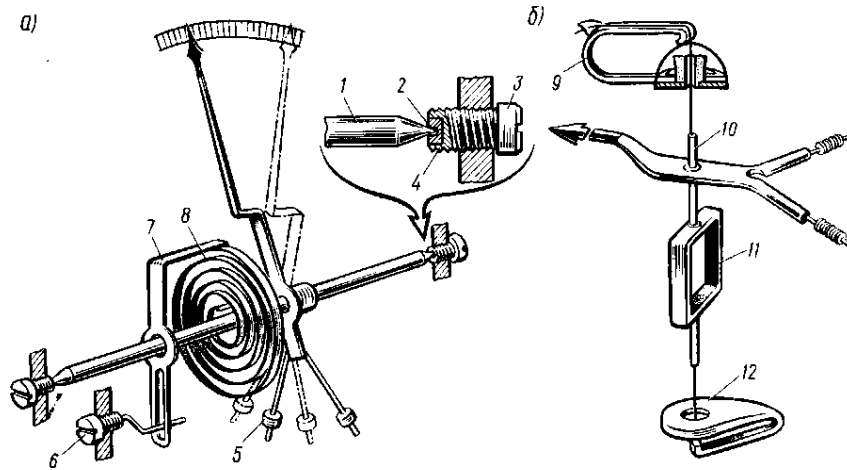
|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| 1. Постійний струм               |  |
| 2. Змінний (однофазний) струм    |  |
| 3. Постійний та змінний струм... |  |

Позначення класу точності, положення приладу, надійності ізоляції

|  |   |
|--|---|
| Клас точності наприклад 0,5...   | 0,5   |
| Горизонтальне положення шкали приладу...   |  |
| Вертикальне положення шкали приладу...   |  |
| Похилене положення шкали під певним кутом до горизонту   |  |
| Напрямок орієнтуру приладу в земному магнітному полі   |  |
| Вимірювальний ланцюг, ізольований від корпусу та випробуваний напругою наприклад 2кВ   |  |
| Прилад випробуванню надійності ізоляції не підлягає  |  |
| <u>Обережно!</u> Надійність ізоляції вимірювального ланцюга по відношенню до корпусу не відповідає нормам (знак показується червоним кольором) |  |
| <u>Увага!</u> Дивись додаткові вказівки в паспорті та інструкції по експлуатації   |  |



## Електровимірювальний прилад



Електровимірювальні прилади зазвичай постачають коректором — пристосування, що дозволяє встановлювати стрілку в нульове положення. Коректор складається з гвинта 6, виходить з корпусу, і повідця 7, за допомогою яких можна зміщувати на деяку відстань точку закріплення спіральної пружини 8, створює протидіючий зусилля. У більшості сучасних електровимірювальних приладів рухома частина 11 підвішується на двох розтяжках 10 — пружних металевих стрічках, які служать для підведення струму до котушки приладу і одночасно створюють протидіючий момент (рис. б). Розтяжки прикріплені до двох плоским пружинам 9 і 12, розташованих у взаємно перпендикулярних площинах.

Електровимірювальний прилад складається з вимірювальної схеми і вимірювального механізму.

У вимірювальну схему входять елементи (резистори, перетворювачі, перемикачі, затискачі) спільно з якими вимірювальний механізм дає можливість визначати значення вимірюваної величини.

Вимірювальний механізм складається з рухливої і нерухомої частин, що взаємодіють між собою, внаслідок чого рухлива частина обертається відносно нерухомої так, що кут її повороту пропорційний вимірюваній величині.

Нерухомою частиною приладу служить котушка. Основною деталлю рухливої частини є феромагнітний сердечник, жорстко прикріплений до осі, що

упирається в підп'ятники. До цієї ж осі прикріплена стрілка, що вказує вимірювану величину за шкалою. Спиральна пружина є елементом, що забезпечує пропорційність кута повороту стрілки вимірюваній величині. Для заспокоєння рухливої частини призначається заспокоювач. Установка стрілки на нуль забезпечується коректором. Урівноваження рухливої частини досягається за допомогою балансних важків - противаг.

Обертаючий, протидіючий і встановлюючий моменти.

Вимірювана електрична величина у вимірювальному механізмі перетворюється в механічне зусилля, що створює обертаючий момент, переміщає рухливу частину відносно нерухомої осі. Момент, що обертає, залежить від вимірюваної величини

$$M_{\text{вр}} = f(x).$$

Для того, щоб положення рухливої частини приладу залежало від значення вимірюваної величини, у вимірювальному механізмі в процесі виміру повинен виникати протидіючий момент, що перешкоджає переміщенню рухливої частини приладу і пропорційний вимірюваній величині.

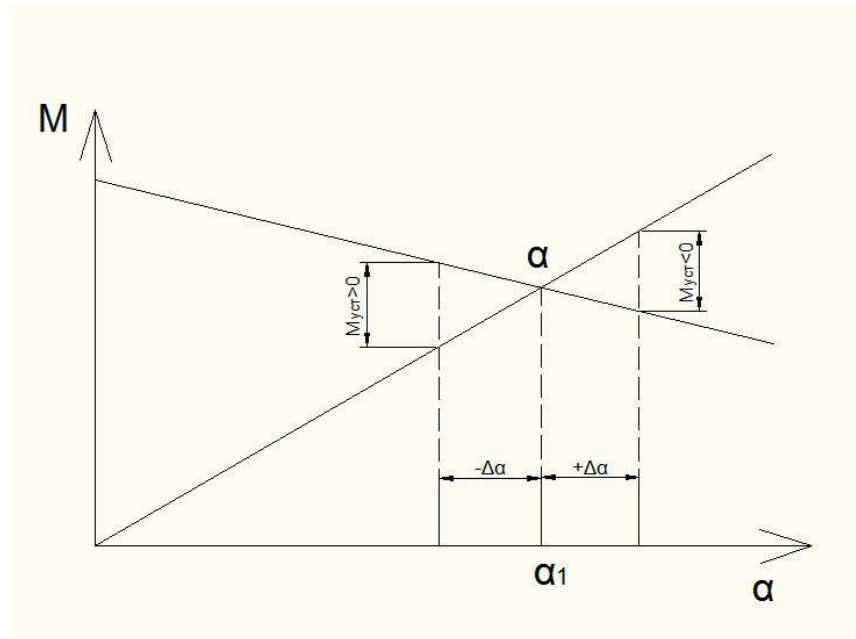
$$M_{\text{пр}} = D\alpha, \alpha - \text{кут повороту рухомої частини приладу}$$

$D$  - питомий протидіючий момент елемента, що створює протидіючий момент.

Відлік вимірюваної величини виробляють в положенні рівноваги рухливої частини, при якій  $M_{\text{вр}} = M_{\text{пр}} =$

$$\text{чи } f(x) = D\alpha, \alpha = \frac{1}{D} f(x) = kf(x)$$

З виразу виходить, що кут повороту рухомої частини вимірювального приладу залежить від вимірюваної величини і від параметрів приладу.



$\alpha$  - положення рівноваги при повороті на  $\alpha$  якщо вивести рухому частину вимірювального прилада з положення рівноваги, повернувши її на деякий кут  $\pm \Delta\alpha$  виникає встановлюючий момент, прагнення повернути рухому частину прилада в положення рівноваги.

$$M_{уст} = M_{вр} - M_{пр}$$

При порівнянні різних вимірювальних приладів користуються питомим встановлюючим моментом

$$M_{уст} = \frac{M_{уст}}{\Delta\alpha} - \text{приріст кута повороту.}$$

Чим більше  $M_{уст}$  при одному і тому ж  $\Delta\alpha$ , тим швидше і надійніше встановлюється рухлива частина в положенні рівноваги. В основному  $M_{пр}$  створюється пружними зусиллями закручених спіральних пружин. В деяких приладах  $M_{пр}$  створюється електромагнітними силами, що виникають в результаті проходження струму по протидіючому елементу (рамці або котушці).

Чутливість  $S$  характеризується кутом відхилення його рухливої частини (що вимірюється кількістю поділок) на одиницю вимірюваної величини.

Чутливість по струму

$$S_i = \alpha / I \left( \frac{\text{делений}}{\text{А}} \right)$$

по напрузі

$$S_U = \alpha / U \left( \frac{\text{делений}}{\text{В}} \right).$$

Чим вище чутливість вимірювального приладу, тим менше значення вимірюваної величини можна визначити цим приладом.

Величина зворотна чутливості називається постійною приладу (ціною поділки)

Знаючи постійну приладу визначають вимірювану величину

## ЛЕКЦІЯ 4

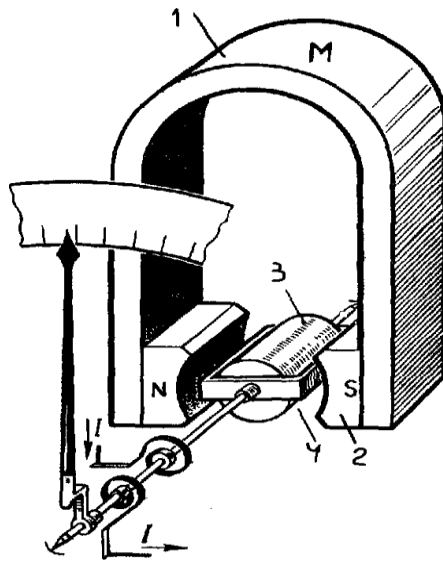
### Прилади для вимірювання сили струму і напруги

Прилади, призначені для виміру сили струму, залежно від їх номіналів підрозділяються на мікроамперметри, міліамперметри, амперметри і кілоамперметри.

При вимірюванні сили струму через амперметр повинен протікати увесь струм навантаження, тому прилад включається послідовно з опором навантаження. Для того, щоб включення приладу не впливало на режим роботи навантаження, його внутрішній опір має бути дуже малим (0,008 - 0,5 Ом). Чим вище номінал амперметра тим менше його внутрішній опір.

Для вимірювання напруги залежно від номіналів вимірюваних величин застосовуються мілівольтметри, вольтметри і кіловольтметри. При вимірі напруги прилад приєднують паралельно до вимірюваної ділянки ланцюга. Для того, щоб його підключення не впливало на режим роботи ланцюга, його внутрішній опір має бути дуже великим. Гальванометром називають прилад з неградуированою шкалою, що має високу чутливість по струму або напрузі. Гальванометри призначені для виміру малих струмів, напруги і електричних зарядів і широко використовуються як нульові покажчики в мостових схемах.

Прилади магнітоелектричної системи



Вимірювальний механізм приладу складається з постійного магніта 1. Між полюсними наконечниками 2 встановлений центрований сталевий циліндр 3.

Рухомою частиною служить легка алюмінієва рамка 4 з обмоткою з тонкого ізолюваного мідного дроту. Рамка встановлена в проміжку, не торкаючись полюсних

наконечників і сталевого циліндра.

При протіканні постійного струму по обмотці рамки виникає механічна взаємодія між магнітним полем струму і полем постійного магніта.

Сила  $F$ , діюча на кожну з активних сторін рамки  $F = BIl$ , де  $B$  – індукція в проміжку;  $I$  – сила струму в рамці;  $l$  – активна довжина однієї сторони рамки;  $W$  – число витків обмотки рамки.

Обертаючий момент  $M_{вр} = Fb/2$ , де  $b$  – ширина рамки

$$M_{вр} = BIlbW/2 = BISW, \text{ где } S = b \cdot l \text{ – активна площа рамки}$$

При повороті рамки виникає протидіючий момент  $M_{пр} = M_{вр}$  или  $BISW = D\alpha$  звідки  $\alpha = \frac{BISW}{D} = \frac{BSW}{S_i D}$  - чутливість приладу по струму.

Отже кут  $\alpha$  пропорціональний току и шкала у приладу рівномірна.

Падіння напруги на затисках приладу  $U = Ir$ , де  $r$  – внутрішній опір приладу

Знаючи постійну приладу  $C_i = 1/S_i$  можна визначити  $I = C_1 \alpha$ , тоді  $U = C_1 \alpha r = C_u \alpha$ , де  $C_u = C_1 r$  – постійна приладу по напрузі.

Магнітоелектричний прилад може бути застосований як для виміру сили струму так і для виміру напруги. Залежно від призначення прилад має певну вимірювальну схему. При безпосередньому включенні вимірювального механізму в схему ним можна виміряти невеликі величини струму або напруги, що обумовлено високою чутливістю вимірювального механізму. Тому для розширення меж вимірів застосовуються додаткові пристосування (шунти і додаткові резистори).

Достоїнства: висока чутливість, висока міра точності, рівномірна шкала; незначний вплив зовнішніх магнітних полів, невелика споживана потужність.

Недоліки: складність і дороговизна конструкції; низька перевантажувальна здатність (при нагріві струмом втрачають свої пружні властивості протидіючі пружини), застосування в ланцюгах тільки постійного струму.

Використовуються в якості вольтметра, мілівольтметра, амперметра, міліамперметра, мікроамперметра.

Розширення меж виміру приладів магнітоелектричної системи

Силу струму при якому стрілка відхиляється до верхньої крайньої відмітки називається номінальним струмом приладу.

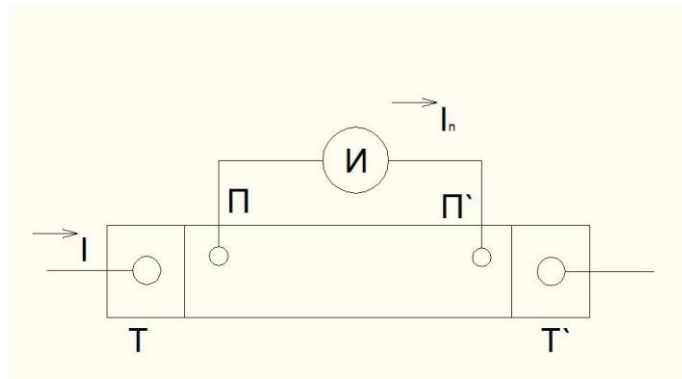
У приладах магнітоелектричної системи номінальний струм складає від 0,5 до 30 мА.

Тому для виміру струмів і напруги тих, що перевищують вказані значення, застосовують пристосування що дозволяють розширити межу вимірів.

Для розширення меж вимірів по струму застосовуються шунти, а по напрузі - додаткові резистори.

### Шунти

Шунт є резистором з чотирма затисками, величина опору якого значно менше опору рамки вимірювального механізму. Його включають послідовно в ланцюг. Паралельно шунту приєднують вимірювальний механізм. У такому з'єднанні вимірювальний прилад (амперметр) використовують для вимірювання струму.



ТТ' - струмові затиски

ПП' - потенційні затиски.

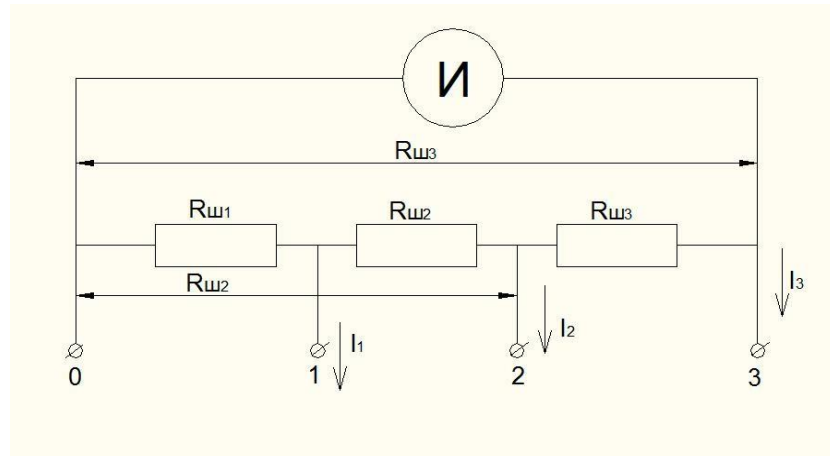
Падіння напруги між точками П і П'

$U_{\Pi} = I_n R_n = I \frac{R_{\text{ш}} \cdot R_n}{R_{\text{ш}} + R_n}$  поділимо обидві частини рівняння на  $R_n$  отримаємо

$R_{\text{ш}} \left( \frac{I}{I_n} - 1 \right) = R_n \quad \frac{I}{I_n} = n$  - шунтуючий множник показує в скільки разів

розширюється межа виміру  $R_{\text{ш}} = R_n / (1 - n)$  - для одномежного шунта.

Розглянемо схему багатомежного амперметра



Затискач 0 є загальним при усіх вимірах. Інші затискачі використовуються залежно від заданої межі виміру сили струму.

Найбільша межа виміру буде у приладу, включеного в ланцюг за допомогою затискачів 0-1, і найменший - 0-3.

Опір усього шунта  $R_{ш3} = \frac{R_n}{n-1}$ , де  $n$  - шунтуючий множник всього шунта.

$$\text{Опір ділянки } R_{ш1} = \frac{R_n + (R_{ш3} - R_{ш1})}{n_1 - 1} \text{ або } R_{ш1} = \frac{R_n + R_{ш3}}{n_1}$$

$$R_n + R_{ш3} = R - \text{постійний опір контура}$$

$$R_{ш1} = \frac{R}{n_1}.$$

Для визначення величини опору будь-якої ділянки багатомезного шунта потрібно опір контура розділити на шунтуючий множник цієї ділянки шунта.

Приклад. Розрахувати опір шунта до амперметра з номінальним струмом 0,5 А і внутрішнім опором 1,99 Ом для розширення межі виміру сили струму до 100 А.

1. Визначаємо шунтуючий множник

$$n = \frac{I}{I_n} = \frac{100}{0,5} = 200$$

2. Обчислюємо опір шунта

$$R_{ш} = R_n / (1 - n) = 1,99 / (200 - 1) = 0,01 \text{ Ом.}$$

Приклад



Визначити номінальний струм амперметра з внутрішнім опором 0,57 Ом і струмом повного відхилення стрілки, рівним 5 А, якщо його підключити до шунта з опором 0,03 Ом.

1. Визначаємо величину шунтуючого множника

$$R_{\text{ш}} = R_n / (1 - n); n = \frac{R_{\text{ш}} + R_n}{R_{\text{ш}}} = \frac{0,57 + 0,03}{0,03} = 20$$

2. Обчислюємо номінальний струм приладу з шунтом

$$\frac{I}{I_n} = n; I = I_n \cdot n = 5 \cdot 20 = 100 \text{ А}$$

Приклад. Розрахувати величини опорів ділянок багатомезного шунта  $R_{\text{ш}1}, R_{\text{ш}2}, R_{\text{ш}3}$  для виміру граничних значень сили струму 1 А, 5 А, і 50 А, якщо до шунта підключений магнітоелектричний вимірювальний механізм з опором рамки 4,9 Ом і струмом повного відхилення стрілки, рівним 20 мА.

1. Визначаємо шунтуючі множники для кожної межі вимірів сили струму

:

$$n_1 = \frac{I_1}{I_n} = \frac{50}{0,02} = 2500; n_2 = \frac{I_2}{I_n} = \frac{5}{0,02} = 250; n_3 = \frac{I_3}{I_n} = \frac{1}{0,02} = 50$$

2. Обчислюємо величину всього шунта  $R_{\text{ш}3}$

$$R_{\text{ш}3} = R_{\text{ш}3} + R'_{\text{ш}2} + R'_{\text{ш}3} = \frac{R_n}{n_3 - 1} = \frac{4,9}{50 - 1} = 0,1 \text{ Ом}$$

3. Обчислюємо величину опору контура

$$R = R_{\text{ш}} + R_{\text{в}} = 0,1 + 4,9 = 5 \text{ Ом}$$

4. Определяем величину опору шунта  $R_{\text{ш}2}$

$$R_{\text{ш}2} = \frac{R}{n_2} = \frac{5}{250} = 0,02 \text{ Ом}$$

5. Обчислюємо величину опору ділянки шунта  $R_{\text{ш}1}$

$$R_{\text{ш}1} = \frac{R}{n_1} = \frac{5}{2500} = 0,002 \text{ Ом}$$

6. Обчислюємо величину опору ділянки шунта  $R'_{\text{ш}2}$

$$R'_{\text{ш}2} = R_{\text{ш}2} - R_{\text{ш}1} = 0,02 - 0,002 = 0,018 \text{ Ом}$$

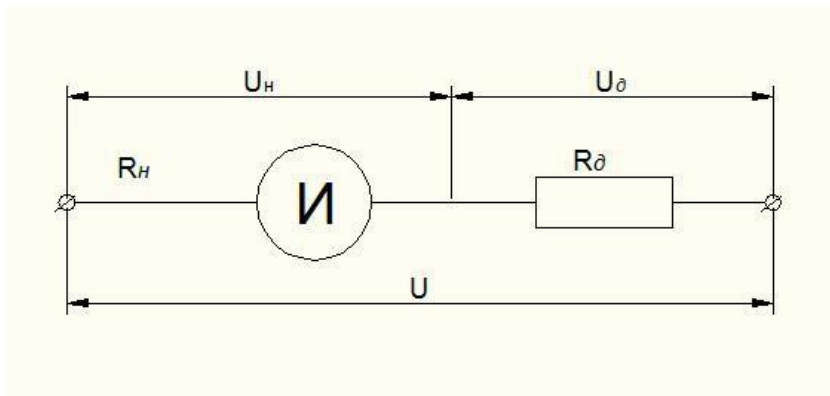
7. Вычисляем величину опоры ділянки шунта  $R'_{ш3}$

$$R'_{ш3} = R_{ш3} - R_{ш2} = 0,1 - 0,02 = 0,08 \text{ Ом}$$

$$R'_{ш3} = R_{ш3} - R_{ш2} = 0,1 - 0,02 = 0,08 \text{ Ом}$$

### Додаткові резистори

Для вимірювання напруги, що перевищує напругу, на яку розрахований вимірювальний механізм (прилад), послідовно з ним включають додатковий резистор.



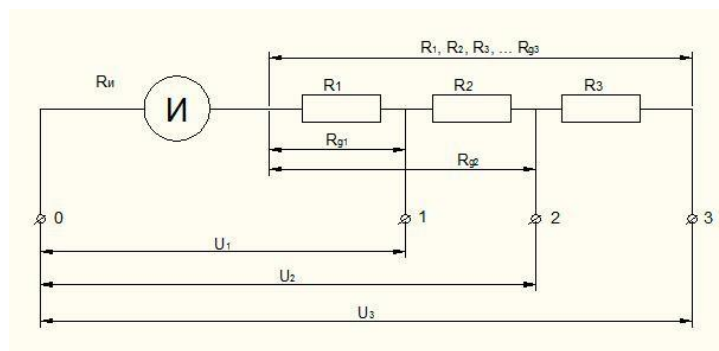
В цьому випадку частина вимірюваної напруги подається на опір вимірювального механізму, інша частина - на  $R_d$

Сила струму в ланцюзі приладу

$$I = \frac{U}{R_u + R_d} = \frac{U_n}{R_n}; R_d = R_n \left( \frac{U}{U_n} - 1 \right) = R_n (m - 1),$$

$\frac{U}{U_n} = m$  - множник додаткового резистора

У багатомезних вольтметрів додатковий резистор складається з ділянок  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$ .



В цьому випадку розраховують спочатку додатковий резистор  $R_{д1} = R_1$  першої межі виміру напруги  $U_1$ . Потім обчислюють  $R_{д2}$  і отримують опір

$R_2 = R_{д2} - R_{д1}$ . У такій же послідовності визначають опори інших ділянок додаткового резистора.

Приклад. Визначити номінальну напругу  $U$  вольтметра, у якого опір рамки вимірювального механізму дорівнює 30 Ом, струм повного відхилення стрілки складає 10 мА. Послідовно з вимірювальним механізмом включений додатковий резистор з опором 29970 Ом.

1. Визначаємо напругу на рамці вимірювального механізму при струмі повного відхилення стрілки

$$U_n = R_n I_n = 30 \cdot 0,01 = 0,3 \text{ В}$$

2. Знаходимо значення  $m$  - множника додаткового резистора

$$R_d = R_n(m - 1); m = \frac{R_d}{R_n} + 1 = \frac{29970}{30} + 1 = 1000.$$

3. Визначаємо момент напруги вольтметра

$$U/U_n = m; U = mU_n = 1000 \cdot 0,3 = 300 \text{ В}$$

Приклад. Розрахувати опір  $R_1, R_2, R_3$  ділянок додаткового резистора  $R_{д3}$  багатомезного вольтметра і потужності, споживані приладом на кожній межі, якщо опір рамки 50 Ом, струм повного відхилення стрілки - 5 мА, межа виміру 5, 30 і 150 В.

1. Визначаємо напругу повного відхилення стрілки вимірювального механізму

$$U_n = R_n I_n = 50 \cdot 0,005 = 0,25 \text{ В}$$

2. Обчислюємо множники  $m_1, m_2, m_3$  додаткових резисторів для кожної межі

$$m_1 = \frac{U_1}{U_n} = \frac{5}{0,25} = 20; \quad m_2 = \frac{U_2}{U_n} = \frac{30}{0,25} = 120; \quad m_3 = \frac{U_3}{U_n} = \frac{150}{0,25} = 600.$$

3. Обчислюємо опір резисторів

$$R_1 = R_{д_1} = R_n(m_1 - 1) = 50(20 - 1) = 950 \text{ Ом}$$

$$R_2 = R_{д_2} - R_{д_1} = R_n(m_2 - 1) - R_1 = 50(120 - 1) - 950 = 5000 \text{ Ом}$$

$$R_3 = R_{д_3} - R_{д_2} = R_n(m_3 - 1) - R_{д_2} = 50(600 - 1) - 5950 = 24000 \text{ Ом}$$

4. Обчислюємо потужності, споживані приладом на кожній межі

$$P_1 = U_1 \cdot I = 5 \cdot 0,05 = 0,025 \text{ Вт} \quad P_2 = U_2 \cdot I = 30 \cdot 0,05 = 0,15 \text{ Вт}$$

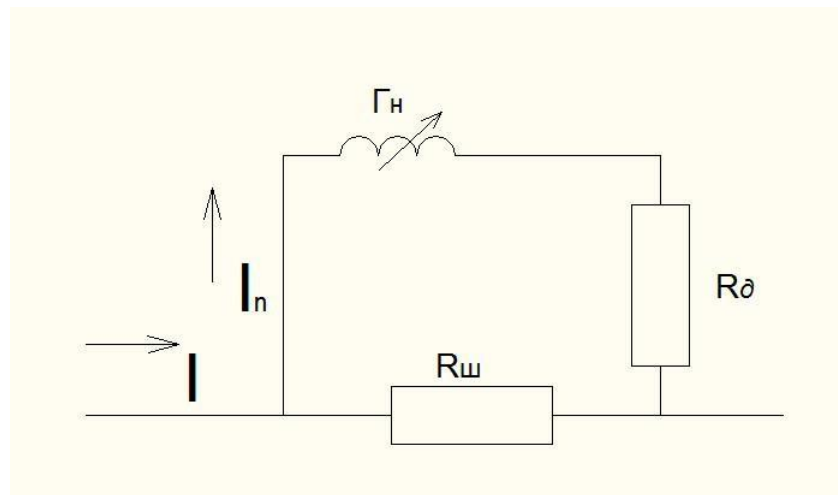
$$P_3 = U_3 \cdot I = 150 \cdot 0,05 = 0,75 \text{ Вт}$$

### Температурна компенсація

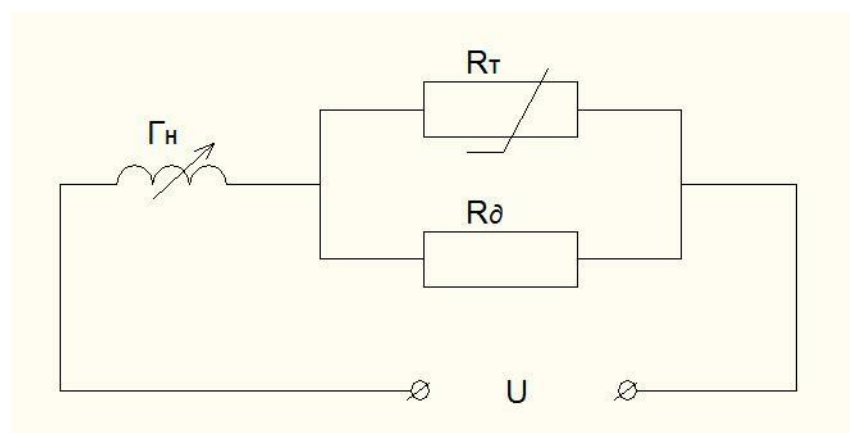
Температура зовнішнього середовища чинить вплив на роботу електровимірювального приладу, особливо на опір провідників, що утворюють електричний ланцюг приладу, що підвищує похибку в показаннях приладу.

При включенні приладу з шунтом, зміна температури призводить до зміни опору мідної обмотки рамки (температурний коефіцієнт міді  $\alpha_{\text{атм}} \approx 0,44\%$ ). Опір шунта які в основному виконуються з манганинового дроту ( $\alpha_{\text{атм}} \approx 0$ ) практично не змінюється. Тому відбувається зміна розподілу струмів в паралельних гілках.

Для усунення похибок послідовно з рамкою включають додатковий резистор  $\Gamma_{\text{д}}$  виконаний з манганинового дроту. Завдяки цьому відносна зміна опору ланцюга рамки вимірювального механізму в порівнянні з опором ланцюга шунта зменшується.

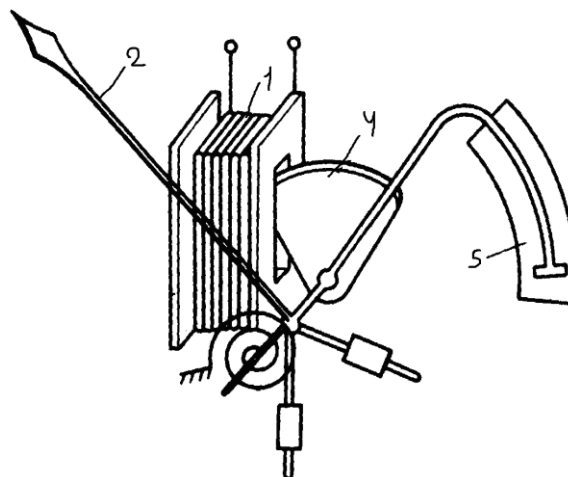


У вольтметрах застосовуються терморезистори



## ЛЕКЦІЯ 5

### Прилади електромагнітної системи



При протіканні струму по обмотці котушки 1 виникає магнітне поле що пронизує сердечника 4 і що намагнічує його. При цьому під дією сили  $F$  сердечник повертає вісь із стрілкою 2.

Сила що діє на сердечника, пропорційна значенням магнітної індукції в котушці  $B_1$  сердечникові  $B_2$

$$F = kB_1B_2 \cdot B_1 = k_1I; B_2 = k_2I, \text{ де } I - \text{ струм що обтікає обмотку котушки.}$$

Отже сила  $F$  і створюваний нею  $M_{вр}$  пропорційні квадрату сили

$$\text{струму } k_3I^2; M_{вр} = k_4I^2$$

Напрямок  $F$  не залежить від роду струму

Протидіючий момент створюється спіральною пружиною 6.

У позиції рівноваги  $M_{пр} = D\alpha. \quad M_{вр} = M_{пр}$

$$k_4I^2 = D\alpha \Rightarrow \alpha = \frac{k_4}{D}I^2 = k_5 - I^2$$

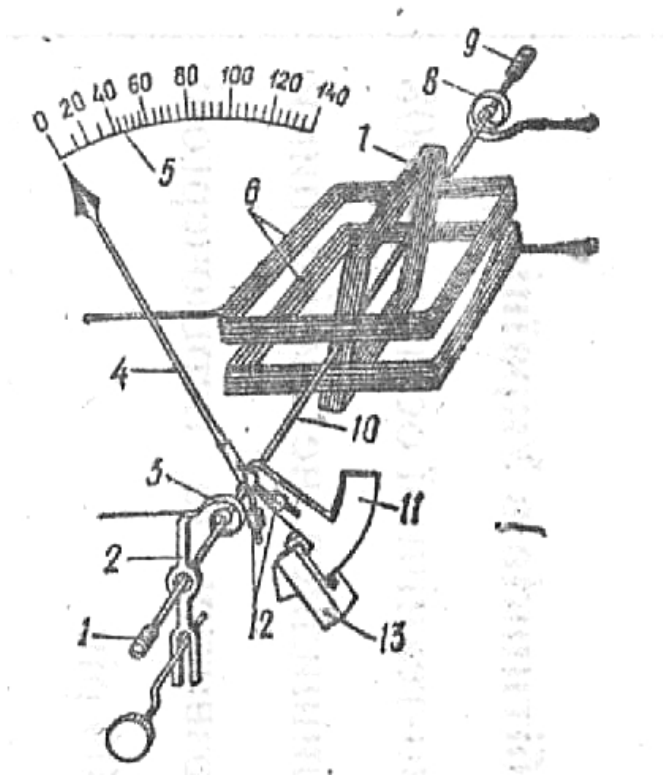
Коефіцієнт пропорційності визначається конструктивними даними вимірювального механізму.

При рівновазі стрілка не коливається завдяки дії заспокоювача 5.

Плюси: використання в мережах змінного і постійного струму, простота конструкції і дешевизна.

Недоліки: вплив зовнішніх магнітних полів, велике власне споживання енергії. Вимірювальний механізм застосовується для вольтметрів і амперметрів.

## Прилади електродинамічної системи



Вимірювальний механізм приладу електродинамічної системи складається з двох котушок. Нерухому котушку 6 конструктивно часто ділять на дві половини для того, щоб забезпечувати більш рівномірне магнітне поле між котушками. В середині нерухомої котушки поміщена рухома котушка 7, жорстко закріплена на осі 10. До цієї ж осі, що упирається в підп'ятники 1 і 9, прикріплена вказівна стрілка 4, на нижньому кінці якої знаходиться крило магнітоіндукційного заспокоювача 11, поміщене між полюсами постійного магніта 13. Рухома частина приладу урівноважена важками-балансирами 12. Кінці обмотки рухомої котушки 7 приєднані до спіральних пружин 3 і 8, що виконують одночасно роль протидіючих елементів і струмопідвідних провідників. Протилежні кінці пружинок з'єднані з нерухомою котушкою. Схема з'єднання котушок залежить від призначення приладу, про що сказано далі. Спіральна пружина 3 прикріплена до важеля коректора 2.

Заспокоєння у приладів електродинамічної системи частіше всього повітряне, оскільки власне магнітне поле приладу слабке. У приладах,

захищених від зовнішніх магнітних полів екраном, що утруднює застосування повітряних заспокоювачів, встановлюються магнітоіндукційні заспокоювачі.

За принципом дії вимірювальні прилади прилади електродинамічної системи схожі на прилади магнітоелектричної системи і відрізняються від них тим, що магнітне поле створюється не постійним магнітом, а вимірюваним струмом, що оточує нерухому котушку. При включенні приладу в ланцюг вимірюваного постійного струму виникає обертаючий момент,  $M_{\text{вр}}$  пропорційний силі взаємодії між струмом рухомої котушки і магнітним полем нерухомої котушки  $M = KF$ . Відомо, що сила  $F$  в цьому випадку визначається з виразу

$$F = kBl_2 I_{\text{п}} \omega_2 \quad (24)$$

де  $B$  - магнітна індукція поля нерухомої котушки;

$l_2$  — активна довжина провідників рухливої котушки;

$\omega_2$  — число витків цієї котушки;

$I_{\text{п}}$  — сила струму, що обтікає рухливу котушку. Виразивши магнітну індукцію  $B$  через напруженість магнітного поля  $H$  і магнітну проникність  $\mu$  і замінивши величину  $H$  її значенням  $H = 0,4\pi I_{\text{н}} \omega_1 / l_1$  можна перетворити вираз

(24), що визначає силу взаємодії  $F$  між котушками

$$F = kBl_2 I_{\text{п}} \omega_2 = k_1 \mu H I_{\text{п}} = k_1 \mu \cdot 0,4\pi I_{\text{н}} \omega_1 / l_1 \quad (25)$$

де

$I_{\text{н}}$  — сила струму в нерухомій котушці.

Постійні величини, що входять у формулу, залежні від конструкції приладу, виражають постійним коефіцієнтом  $k_2$ . Тоді формула (25) набуває наступного вигляду:

$$F = k_2 I_{\text{н}} I_{\text{п}}$$



Підставивши значення  $F$  у вираз, що визначає обертаючий момент  $M_{вр}$ , отримаємо

$$M_{вр} = KF = K k_2 I_H I_n, \text{ або } M_{вр} = K_1 I_H I_n$$

Рівновага рухомої частини приладу в процесі виміру настає при рівності обертаючого і протидіючого моментів  $M_{вр} = M_{пр}$ . Підставивши значення величин, що входять в написану рівність, визначають значення кута повороту рухливої частини прилада

$$K_1 I_H I_n = D\alpha \text{ звідки}$$

$$\alpha = K_1 I_H I_n / D \quad \text{или} \quad \alpha = K_2 I_H I_n \quad (26)$$

При вимірах в ланцюгах змінного струму кут повороту рухомої частини приладу  $\alpha$  пропорційний добутку діючих значень струмів в котушках і косинусу кута зсуву фаз між ними

$$\alpha = K_2 I_H I_n \cos \alpha$$

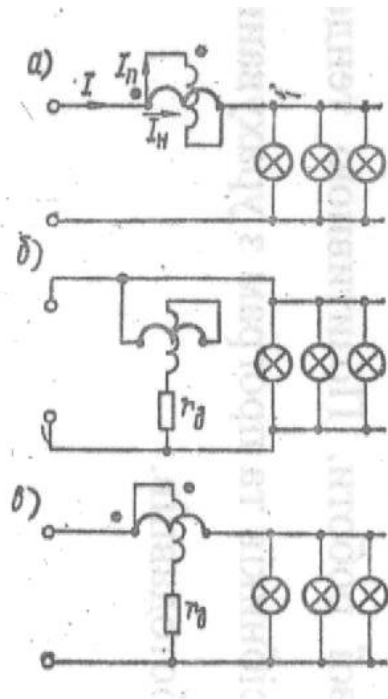
Прилади електродинамічної системи застосовують для виміру струму, напруги і потужності.

Від призначення приладу залежать число витків і діаметр дроту обмотки котушок, а також схема з'єднання котушок між собою. У амперметрів електродинамічної системи нерухома котушка намотується мідним ізольованим дротом діаметром 1 - 1,5 мм і має декілька десятків витків. Рухома котушка намотується найчастіше тонким (діаметром до десятих міліметра) алюмінійовим ізольованим дротом і складається з 200-250 витків. Котушки сполучають паралельно, а у вимірюваний ланцюг включають послідовно (мал. 32, а).

При вимірюванні сили струму  $I$  струм в нерухомій котушці  $I_H$  складе частину від вимірюваного  $I_H = k_1 I$ , а частина струму, що залишилася  $I_n = k_2 I$ ,

потече по рухомій котушці. У цьому випадку кут відхилення рухомої частини приладу визначиться з рівності (26)

$$\alpha = K_2 k_1 I k_2 I, \text{ или } \alpha = K_3 I^2.$$



Отже, шкала приладу буде квадратичною. Практично шкалу наближають до рівномірної підбором форми котушок і їх початкового взаємного розташування. Але і за цих умов робоча частина шкали починається з 20% від верхньої межі виміру.

У міліамперметрів котушки з'єднуються послідовно, і кут відхилення рухомої частини приладу також пропорційний квадрату сили вимірюваного струму.

Котушки вольтметрів електродинамічної системи сполучають послідовно один з одним і з додатковим резистором  $r_d$  (рис. 32, б). У ланцюг для вимірювань прилад включають паралельно. Нерухома котушка вольтметрів розділена на дві частини. На кожен з них намотано по 1700 витків ізолюваного мідного дроту діаметром 0,2-0,27 мм. Рухома котушка складається з 200 витків алюмінієвого ізолюваного дроту такого ж діаметру. При вимірюванні напруги

кут повороту рухливої частини вольтметра визначають з рівності (26). У даному випадку струми нерухомої і рухомої котушок рівні.

Позначивши опори нерухомою і рухомої котушок відповідно  $r_n$  і  $r_p$  опір додаткового резистора  $r_d$  напругу, підведену до приладу  $U$ , замінюємо добуток струмів через напругу і опір вимірювального ланцюга

$$\alpha = K_2 I_n I_p = K_3 I^2 = K_2 \left( \frac{U}{r_n + r_p + r_d} \right)^2 = \frac{K_2}{(r_n + r_p + r_d)} U^2$$

Перший множник є постійним коефіцієнтом, що залежить від конструктивних даних приладу. Його позначимо  $K_4$ , тоді  $\alpha = K_4 U^2$ . З отриманого результату виходить, що шкала у прилада квадратична. Її наближають до рівномірної таким же способом, як і у амперметрів.

При вимірюванні потужності котушки прилада сполучають за схемою, показаною на рис. 32, в. Нерухома котушка ватметра така ж, як і у амперметра, а рухома - така ж, як у вольтметра.

При включенні приладу в ланцюг і вимірі потужності кут повороту рухливої котушки, а значить, і стрілки приладу визначають з рівності (26), підставляючи в нього наступні значення величин: струм нерухомої котушки  $I_n$  рівний струму навантаження  $I$ ; струм рухомої катушки  $I_p$ , виражений через напругу, підведену до ланцюга, і опір ланцюга рухомої катушки  $I_p = \frac{U}{r_p + r_d}$ ;

$$\alpha = K_2 I_n I_p = K_2 I \frac{U}{r_p + r_d} IU = K_3 IU.$$

З цього виразу виходить, що кут відхилення стрілки приладу пропорційний вимірюваній потужності. Якщо прилад включений в ланцюг змінного струму, то кут відхилення визначатиметься на підставі рівності (27) середньою потужністю

$$\alpha = K_3 IU \cos \varphi.$$

Електродинамічні вимірювальні прилади можуть застосовуватися для вимірювань в ланцюгах постійного і змінного струму, оскільки зміна

полярності призводить до одночасної зміни напрямку струму в обох котушках, а напрям обертаючого моменту, залишається незмінним.

На показання електродинамічних вимірювальних приладів здійснюють вплив зовнішні магнітні поля, оскільки власне поле приладу слабке. Для захисту від цих впливів використовують екранування приладів і застосовують астатичні вимірювальні механізми, схожі за принципом дії на аналогічні механізми електромагнітної системи.

Велика кількість ампер-витків нерухомої котушки приладів, потрібна для створення необхідного обертаючого моменту, призводить до значного споживання потужності приладом.

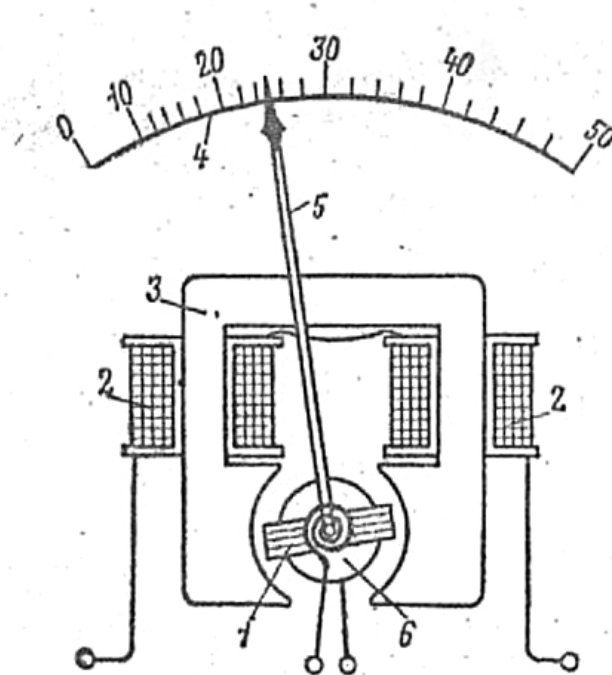
Відсутність в приладі феромагнітних сердечників і інших подібних елементів сприяє високій точності свідчень. Прилади електродинамічної системи мають високий клас точності - 0,05; 0,1 і 0,2 - і застосовуються в усіх випадках точних вимірів.

Достоїнства приладів наступні: висока міра точності; придатність для вимірів в ланцюгах постійного і змінного струму; можливість наближення шкали до рівномірної.

Недоліки: залежність свідчень від дії зовнішніх магнітних полів; чутливість до перевантажень; висока вартість.

Прилади електродинамічної системи використовуються головним чином як переносні лабораторні прилади. Вони застосовуються як зразкові при перевірці і градуванні технічних приладів в лабораторіях транспортних заводів.

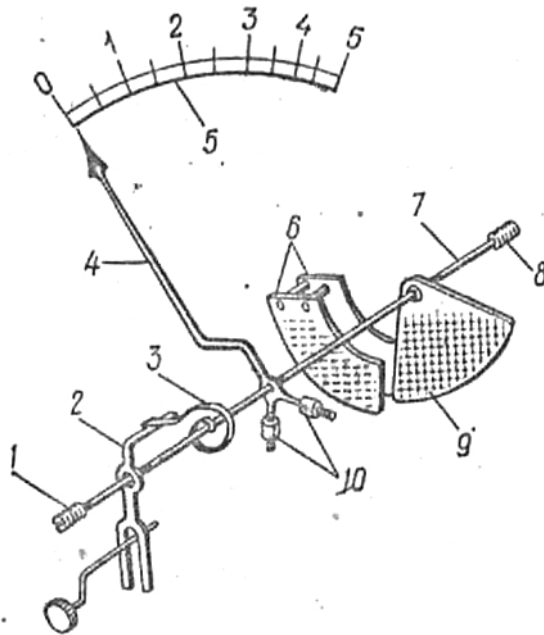
### Прилади феродинамічної системи



Вимірювальний механізм приладу складається з нерухомих, з'єднаних між собою котушок 2, насаджених на сердечника 3 з м'якого феромагнітного матеріалу. Між полюсами магнітопровода встановлений феромагнітний циліндр 6 подібно до будови прилада магнітоелектричної системи. Між циліндром і полюсами магнітопровода створено проміжок, в який поміщена рухома рамка 1, укріплена на півосях. До неї жорстко прикріплена вказівна стрілка 5. Рамка може вільно обертатися, не торкаючись циліндра і магнітопровода. У верхній частині розташована шкала 4. Одна з двох протидіючих пружин і деякі інші деталі механізму на малюнку не показані.

У приладах феродинамічної системи забезпечується значно більша магнітна індукція порівняно з електродинамічною системою, завдяки чому значно збільшується обертаючий момент, що призводить до підвищення чутливості.

### Прилади електростатичної системи



У будові вимірювальних приладів електростатичної системи використовується принцип взаємодії між двома електрично зарядженими металевими тілами, розділеними діелектриком. Як видно з отриманого результату, кут відхилення стрілки приладу пропорційний квадрату вимірюваної напруги. Отже, прилади електростатичної системи можуть вимірювати тільки напругу і шкала приладів нерівномірна - квадратична. Проте підбором відповідної форми розмірів нерухомих і рухомих пластин, а також їх взаємного розташування вдається досягти достатньої рівномірності шкали.

Заспокоєння у приладів електростатичної системи може бути повітря або магнітоіндукційне. Ці прилади можуть вимірювати напругу не лише в ланцюгах постійного, але також і в ланцюгах змінного струму. При включенні в ланцюг змінного струму знаки зарядів пластин змінюватимуться із зміною струму в ланцюзі. Напрямок обертаючого моменту, залишається при цьому без змін. Свідчення прилада залежатимуть від середнього значення обертаючого моменту, за період, пропорційного квадрату вимірюваної напруги.

Достоїнствами електростатичних вольтметрів є: нікчемна споживана потужність; придатність для вимірів в ланцюгах постійного і змінного струму;

незалежність свідчень від зовнішніх магнітних полів, частоти і форми кривої вимірюваного на-пряження.

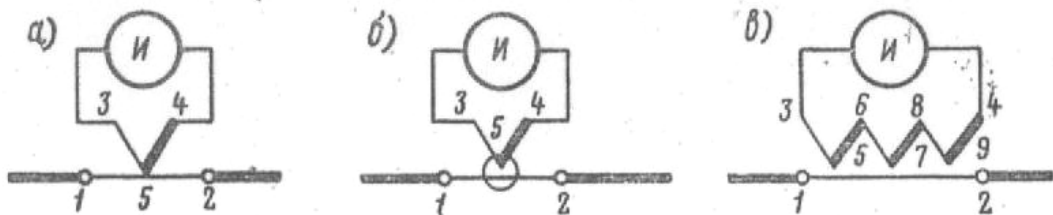
До недоліків відносяться: залежність свідчень від зовнішніх електричних полів і низька чутливість.

### Прилади термоелектричної системи

Термоелектричним вимірювальним приладом є термоелектричний перетворювач, сполучений з вимірювальним механізмом магнітоелектричної системи.

Принцип дії вимірювального приладу термоелектричної системи полягає в тому, що вимірюваний електричний струм, проційний вимірюваній електричній величині, проходячи по нагрівачу 1 - 2 (мал. 35, а), підігріває гарячий спай 5 термопар, внаслідок чого виникає термо- $\epsilon$ .р.с, що створює струм в ланцюзі вимірювача *И*.

Нагрівач 1 - 2 виготовляють з платиноіридієвого або константанового дроту. Для виготовлення термопари застосовують двох різнорідних провідника: найчастіше залізний 3 - 5 і константановий 4-5 дроти, кінці яких зварені в точці 5, а до протилежних кінців 3 і 4 приєднано вимірювальний механізм *И*.



Для виготовлення термопар використовують також і інші метали: манганин-константан, хромель-константан, хромель-копель, золото-паладій, платина-платиноіридій і деякі інші матеріали, що забезпечують величину термо- $\epsilon$ .р.с, 50 мкВ при нагріві місця спаю на 1°C.

Для отримання більшої термо- $\epsilon$ .р.с. в одному термоперетворювачі застосовують декілька послідовно сполучених термопар (мал. 35, в).

Термоперетворювачі з однією термопарою підрозділяються на контактні і безконтактні. У контактному перетворювачі (див. мал. 35, а) до середини нагрівача 1 - 2 приварено місце спаю термопари 5, зване гарячим спаєм. Протилежні кінці термопари 3 і 4, звані холодними спаями, сполучені з вимірювачем *I*. Контактний термоперетворювач володіє високою чутливістю, проте величина термо-э.р.с., що розвивається ним, невелика, тому вимірювальний механізм повинен володіти дуже високою чутливістю. Окрім цього, величина термо-э.р.с. таких термоперетворювачів залежить від напрямку струму в нагрівачі (це особливо проявляється при вимірах в ланцюгах постійного струму).

У безконтактному термоперетворювачі (мал. 35, б) гарячий спай 5 термопар відокремлений від нагрівача 1 - 2 ізоляційним матеріалом - склом. Такий термоперетворювач вільний від недоліків, властивих попередньому термоперетворювачу, але має нижчу чутливість. Для підвищення чутливості термоперетворювачів і усунення впливу навколишньої температури в приладах, призначених для виміру малої сили струму, термоперетворювачі поміщають в скляний балон, з якого відкачано повітря.

Термо-э.р.с.  $E$ , що розвивається термоперетворювачем, пропорційна тепловій потужності, що виділяється струмом в нагрівачі, тому  $E = k_1 R_n I^2$ , де  $k_1$  — коефіцієнт пропорційності між термо-э.р.с. і потужністю, що розсіюється нагрівачем. Він залежить від матеріалів термопари, температури навколишнього середовища і конструкції термоперетворювача.

Силу струму, що протікає через вимірювач *I*, можна визначити за законом Ома

$$I_n = E/R = k_1 R_n I^2 / R$$

де  $R$  - загальний опір ланцюга термопари і вимірника



Замінивши в цьому виразі усі величини, окрім  $I$ , коефіцієнтом  $k_T$  і підставивши результат в рівняння (22), визначимо кут відхилення стрілки приладу

$$\alpha = \frac{B s \omega}{D} k_T I^2, \text{ или } \alpha = S k_T I^2$$

З цього виразу виходить, що прилади термоелектричної системи можна застосовувати для вимірювань в ланцюгах постійного і змінного струму. Шкала у приладів нерівномірна.

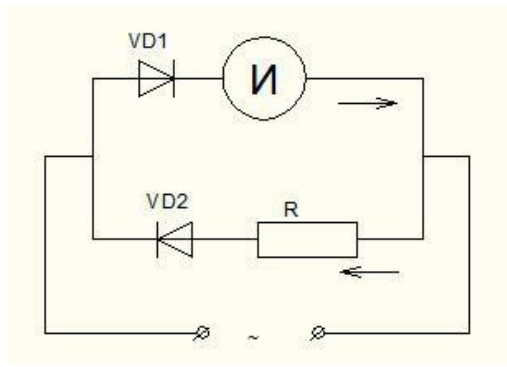
Достоїнства приладів термоелектричної системи наступні: показання приладів не залежать від частоти в широких межах, оскільки індуктивність і місткість термоперетворювачів нікчемно малі; можливість вимірювань в ланцюгах струмів високої частоти; незалежність свідчення від форми кривої вимірюваного струму, оскільки вони вимірюють, як правило, діюче значення змінного струму; висока чутливість.

Недоліки: чутливість до перевантажень, що призводить до виходу з ладу термоперетворювача; невисока точність - не вище за клас 1,0; залежність свідчень від зовнішньої температури.

Прилади термоелектричної системи найчастіше застосовуються для виміру струму, наприклад, амперметри Т12 або міліамперметри Т13, щитовий амперметр Т26А1 (мал. 36), в ланцюгах високої і звукової частоти. Їх використовують в пристроях залізничного радіозв'язку і телефонної телекомунікації. Також застосовуються термоелектричні амперметри в установках для високочастотного загартування і плавки металів.

Термоелектричні вимірювальні прилади знаходять широке застосування як вольтметри (термовольтметри Т131, Т132 і багатомежний мілівольтметр Т130 використовують для вимірів в ланцюгах високої і звукової частоти).

## Прилади випрямної (детекторної) системи



Складаються з випрямляча званого детектором, і вимірювального механізму магнітоелектричної системи. Струм через N проходить впродовж одного напівперіоду. При зміні полярності струм проходить у зворотному напрямі через R і VD2, які шунтують N і захищають VD1 від пробую

$\alpha = \frac{BSW}{D} \frac{I_{\text{ср}}}{2} I_{\text{ср}}$  - середнє значення випрямленого струму. При включенні за двонапівперіодною схемою підвищується чутливість.

При такому включенні струм через N проходить впродовж обох напівперіодів

→ I полуп.- II полуп.

Прилад використовується на змінному струмі

$\alpha = \frac{BSW}{D} I_{\text{ср}}$  Прилад використовується при змінному струмі

## ЛЕКЦІЯ 6

### Поняття про цифрові вимірювальні прилади

До складу ЦВП входять цифровий відліковий пристрій і аналого-цифровий перетворювач, в якому безперервна вимірювана величина перетвориться в пропорційний ряд імпульсів (код), тобто дискретну величину. По дискретних значеннях вимірюваної величини виробляється її кількісна оцінка, яку прилад видає на екрані у вигляді числа з певною кількістю значущих цифр.

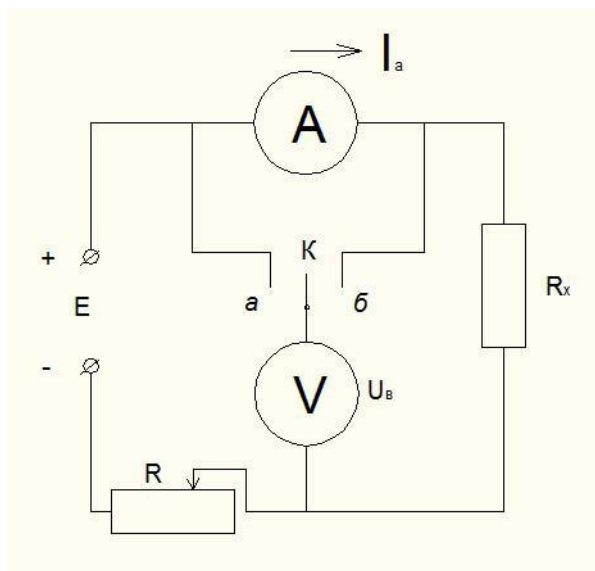
Розглянемо структурну схему цифрового вольтметра і часові діаграми, що пояснюють його роботу.

### Вимір електричних опорів

Залежно від значення електричні опори підрозділяють на три групи: малі 1 Ом і менше; середні від 1 до 100000 Ом; великі від 100 кОм і вище.

Стосовно значення вимірюваного опору і необхідної точності результату вибирають відповідні методи виміру. Найбільшого поширення набули: непрямий метод - амперметр і вольтметр; нульовий метод з використанням вимірювальних мостів і методів безпосередньої оцінки за допомогою показуючих приладів.

### Вимір середніх опорів непрямим методом (амперметром і вольтметром)



Вимірюваний опір  $R_x$  включають в ланцюг послідовно з амперметром. Змінний резистор  $R$  служить для регулювання струму в ланцюзі і на результат вимірювань не чинить ніякого впливу. Залежно від вимірюваного опору вольтметр підключається до ланцюга в точці  $a$  або  $b$  перемикачем  $K$ .

Опір  $R_x$  обчислюють приблизно за законом Ома  $R_x = \frac{U_b}{I_A}$ . Отриманий результат відрізнятиметься від дійсного значення за рахунок впливу опору амперметра і струму, що протікає через вольтметр.

При підключенні вольтметра до точки  $a$  він покаже суму падінь напруги на амперметрі і  $R_x$ .

$$R_x = \frac{U_E - I_A R_E}{I_A} = \frac{U_E}{I_A} - R_A$$

Таку схему включення застосовують у тому разі якщо опір амперметра менше 1% значення опору  $R_x$ , який обчислюють за свідченнями приладів, нехтуючи опором  $R_A$ .

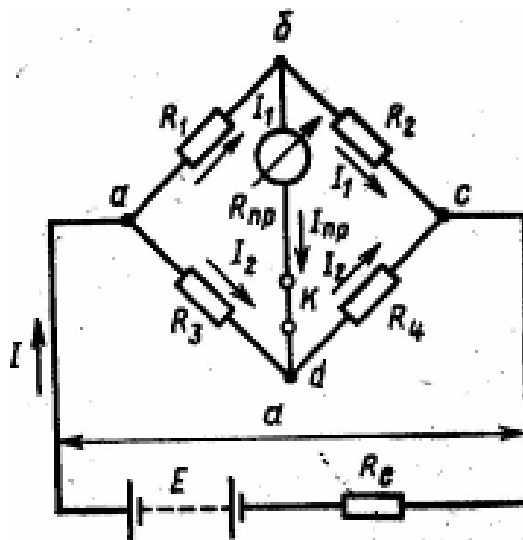
При підключенні вольтметра до точки б амперметр вимірюватиме струми, що протікають по  $R_x$  і через вольтметр.

$$R_x = \frac{U_E}{I_A - I_E} = \frac{U_E}{I_A - \frac{U_E}{R_E}}$$

Таке включення застосовують у тому випадку, коли внутрішній опір вольтметра значно перевищує  $R_x$ .

### Вимірювання середніх опорів одинарним вимірювальним мостом

Для вимірювання опорів середньої величини застосовують одинарний вимірювальний міст на постійному струмі. Погрішність виміру 0,05-0,1% досягається завдяки високій чутливості гальванометра, вживаного як нульовий індикатор, а також точній підгонці опорів резисторів, що використовуються в мостових схемах.



У одну з діагоналей моста включений гальванометр Гв, а в іншу кнопкою К включається джерело живлення Е постійного струму. Опори, що входять в

схему називаються плечима моста. Їх значення можна підібрати так, щоб при натиснутій кнопці К потенціали точок Б і В були рівні між собою. Тоді струм не відгалужуватиметься через гальванометр і стрілка приладу покаже 0. Такий стан схеми називається рівновагою моста.

В урівноваженій схемі падіння напруги на ділянках від точки А до точок Б і В рівні між собою. Також рівні падіння напруги на ділянках від точок Б і В до точки Д.

$$U_{AB} = U_{AB}; U_{BD} = U_{BD}$$

За законом Ома  $U_{AB} = I_1 R_a$ ;  $U_{AB} = I_2 R_b$ ;  $U_{BD} = I_3 R_x$ ;  $U_{BD} = I_4 R_0$

$$I_1 R_a = I_2 R_b(1) \quad =; I_3 R_x \quad I_4 R_0(2)$$

Якщо струм через гальванометр не відгалужується

$I_1 = I_3, I_2 = I_4$ . Поділимо (1) на (2)

$$\frac{R_a}{R_x} = \frac{R_b}{R_0}$$

Добутки величин опорів протилежних плечей урівноваженого моста рівні між собою і є початковими для різних обчислень при практичних зміннихмоста.

Це співвідношення зберігається при зміні місцями гальванометра і джерела

$$R_x = \frac{R_a}{R_b} R_0$$

живлення воно також не порушиться, якщо в діагональ моста будуть включені додаткові опори.

$R_a, R_b$  - плечі відношення  $R_0$ - плече порівняння;  $R_x$ - плече відомого або вимірюваного опору.

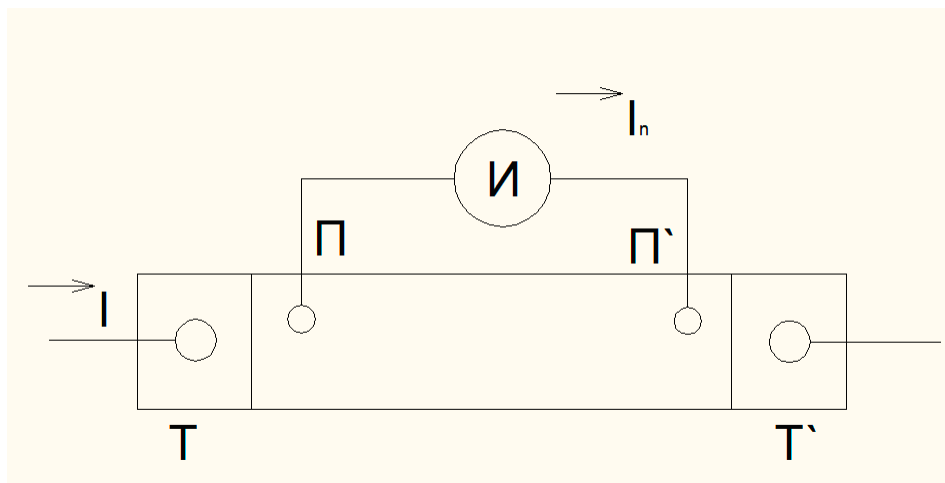
Плечі  $R_a, R_b$  і  $R_0$  є магазинами резисторів. Процес підбору опорів плечей носить назву урівноваження, або балансування моста.

Вимірювальні мости підрозділяються на мости з постійним відношенням плечей і мости із змінним відношенням плечей.

У мостах з постійним відношенням плечей після підключення до приладу вимірюваного опору  $R_x$  поворотом ручки важільного перемикача

встановлюють певне співвідношення плечей  $R_a$  і  $R_b$  і залежно від передбачуваного значення опору  $R_x$ . Потім включають Гв і джерело живлення. У магазині плеча порівняння підбирають таке значення  $R_0$ , при якому стрілка Гв встановиться на нулі. В процесі балансування моста відношення плечей  $R_a/R_b$  залишається постійним. Якщо міст не урівноважується, змінюють відношення  $R_a/R_b$  і повторюють процес балансування.

Також існують мости із змінним відношенням плечей, наприклад лінійний міст, у яких плече порівняння виконане у вигляді невеликого магазину резисторів, а плечі відношень представляють реохорд – тонкий калібрований манганиновий дріт з ковзаючим контактом, що утворює два плечі моста  $R_a$  і  $R_b$ .



Опір дроту, що має однаковий переріз по всій довжині і однорідний матеріал, пропорційний його довжині. Тому опір ділянок реохорда  $R_a$  і  $R_b$  можна замінити їх довжинами

$$\frac{R_a}{R_b} = \frac{\rho \frac{l_1}{S}}{\rho \frac{l_2}{S}} = \frac{l_1}{l_2}$$

Це відношення нанесене на шкалі моста і його легко визначити по положенню движка В.

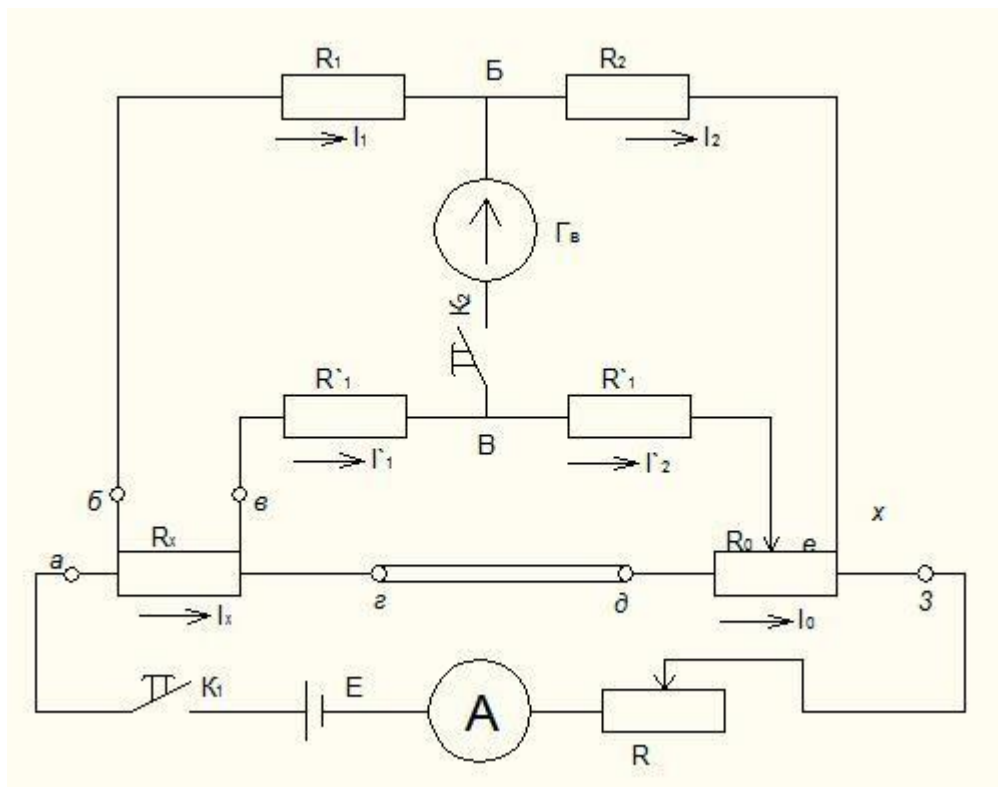
$$R_x = R_0 \frac{l_1}{l_2}$$

Лінійні мости мають меншу точність через нерівномірне спрацювання реохорда.

#### Вимір малих опорів подвійним вимірювальним мостом

Найбільш точні результати виміру малих опорів забезпечує подвійний вимірювальний міст на постійному струмі.

Вимірюване  $R_x$  сполучене послідовно із зразковим резистором за допомогою дроту 2д великого перерізу. До струмового затискача  $a$  опору  $R_x$  і затискача  $3$  - зразкового резистора приєднаний ланцюг живлення моста, що складається з джерела струму  $E$ , контрольного амперметра і регулювального реостата  $R$ .



Вимірювальна частина моста приєднана до потенційних затискачів  $б$  і  $в$ , сполучених з вимірюваним опором  $R_x$ , а контактами  $е$  і  $ж$  - до зразкового резистора  $R_0$

Опори резисторів плечей моста  $R_1$  і  $R'_1$  також як і опори резисторів плечей  $R_2$  і  $R'_2$ , конструктивно виконані так, що при будь-яких перемиканнях в процесі вимірювання мостом зберігаються умови

$$R_1 = R'_1 \geq 10 \text{ Ом}$$

$$R_2 = R'_2 \geq 10 \text{ Ом}$$

Рівновагу моста визначають по нульовому свідченню гальванометра, приєднаного в точках БВ. На початку вимірювання рухомий контакт  $\epsilon$  встановлюють в положення, при якому опір резистора  $R_0$  буде приблизно рівним  $R_x$ . Потім, встановивши необхідні відношення плечей  $R_1/R_2 = R'_1/R'_2$ , замикають вимикач К1 і за допомогою регульовального реостата встановлюють в струмовому ланцюзі силу струму, рівну декільком А, а при дуже малому  $R_x$  - декілька десятків А.

Кнопкою К2 включають гальванометр Гв на нуль. Якщо стрілка не встановлюється на нулі, то необхідно змінити відношення  $R_1/R_2$  и  $R'_1/R'_2$ , зберігаючи при цьому умови рівності.

При рівновазі моста потенціали точок Б і В рівні отже  $I_1 = I_2$ ;  $I'_1 = I'_2$ ;

$$I_x = I_0. (*)$$

Рівність потенціалів точок Б і В можливо при рівності падінь напруги на ділянках  $\sigma_B$  і  $\sigma_{BV}$ , а також на ділянках Бж і Веж.

$$I_1 R_1 = I_x R_x + I'_1 R'_1; \quad I_2 R_2 = I_0 R_0 + I'_2 R'_2; \quad I_x R_x = I_1 R_1 - I'_1 R'_1;$$

$$I_0 R_0 = I_2 R_2 + I'_2 R'_2;$$

Враховуючи рівність (\*)

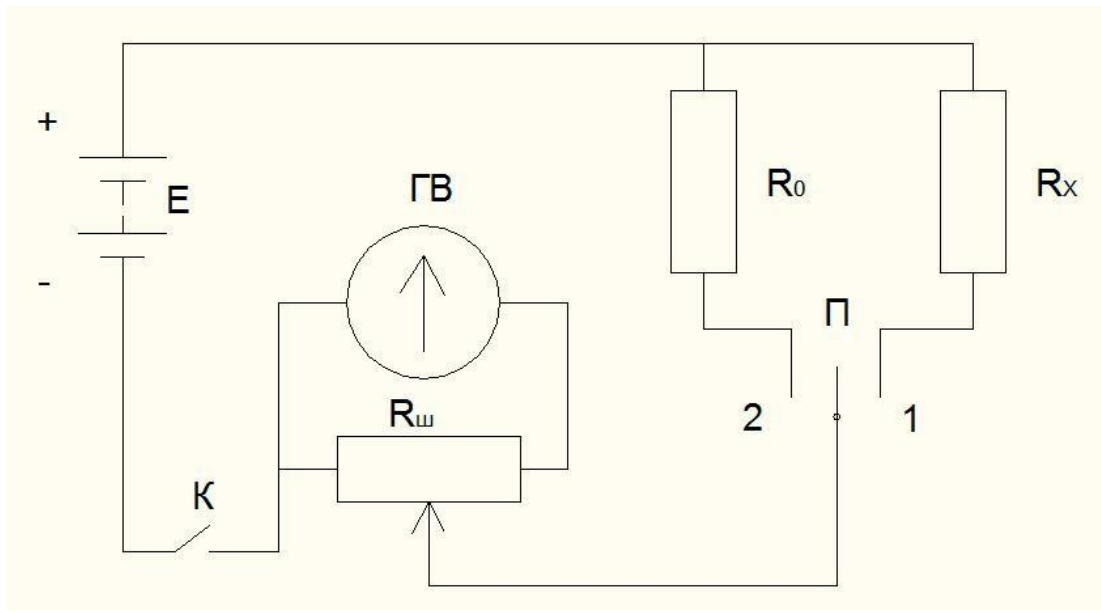
$$I_x R_x = (I_1 - I'_1) R_1 \quad I_0 R_0 = (I_2 - I'_2) R_2$$

Поділимо один вираз на інший

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{R_1}{R_2} \Rightarrow R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0.$$



## ЛЕКЦІЯ 7

Вимірювання великих опорів методом заміщення

Для вимірювання використовують гальванометр Гв, багатомезний шунт, зразковий резистор, джерело живлення Е з невеликим внутрішнім опором і напругою  $U$ .

Перед вимірюванням шунт встановлюють в положення найменшої чутливості і включивши живлення вимикачем К, встановлюють перемикач П в положення 1. При цьому спостерігають відхилення  $\alpha_x$  стрілки Гв. Якщо стрілка не відхиляється, підвищується опір шунта  $R_{ш}$ .

Струм в ланцюзі  $I_x = C_i \alpha_x = U/R_x$   $r_{вн\ E}$  и  $r_{вн\ Гв} \approx 0$  так як вони  $\ll R_x$

Потім П переводять в положення 2, спостерігаючи за відхиленням стрілки Гв  $\alpha_2$

$$I_2 = C_i \alpha_2 = U/R_0$$

Розділимо першу рівність на другу

$$\frac{I_2}{I_x} = \frac{\alpha_2}{\alpha_x} = \frac{R_x}{R_0}, \text{ отсюда } R_x = \frac{\alpha_2}{\alpha_x} R_0$$

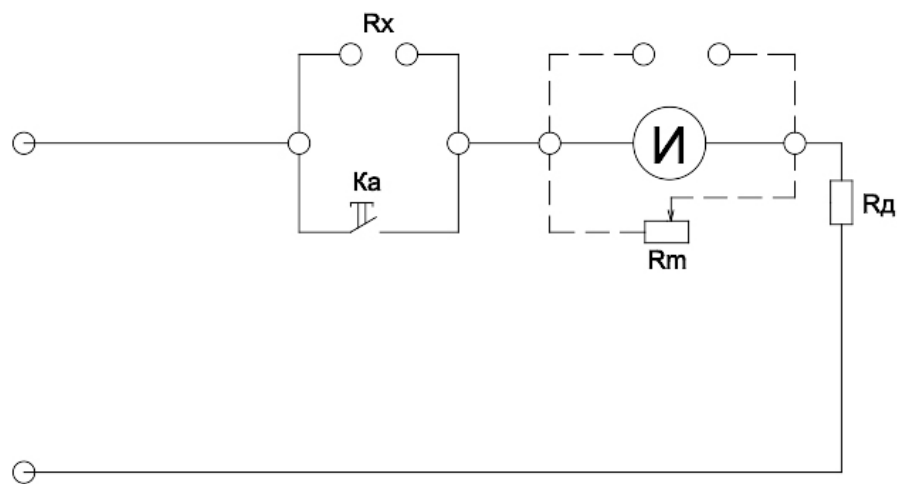
Якщо  $R_0$  змінний, то підбираючи його опір можна добитися  $I_2 = I_x$ . При цьому  $\alpha_2 = \alpha_x$  і  $R_x = R_0$ .

### Показуючі прилади для вимірювання опорів

Безпосереднє вимірювання опорів з відліком за шкалою здійснюється омметрами, мікроомметрами або мегомметрами.

По конструкції вимірювального механізму і принципу дії прилади підрозділяються на дві групи: з однорамковим ИМ (логометри).

У схемі омметра одинорамковий вимірювальний механізм магнітоелектричної системи і сполучений послідовно з додатковим резистором  $R_d$  і вимірним опором  $R_x$ .



$R_d$  вибирають таким чином, щоб стрілка N відхилилася до кінця шкали управо при натиснутій кнопці К ( $R_x = 0$ ). Якщо кнопку відпустити, стрілка встановиться у кінці шкали на відмітці  $\infty$  ( $R_x = \infty$ ). При підключенні вимірюваного опору і розімкненій Кн

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U}{R_d + R_u + R_x}$$

Цей же струм можна визначити по куту відхилення стрілки  $\alpha$  і постійною приладу  $C_i$ :  $I = C_i \alpha$ .

Визначимо кут відхилення стрілки

$$\alpha = \frac{U}{C_i} \cdot \frac{1}{R_d + R_u + R_x} = U S_i \frac{1}{R_d + R_u + R_x}, \text{ де } S_i = \frac{1}{C_i} - \text{чутливість по струму}$$

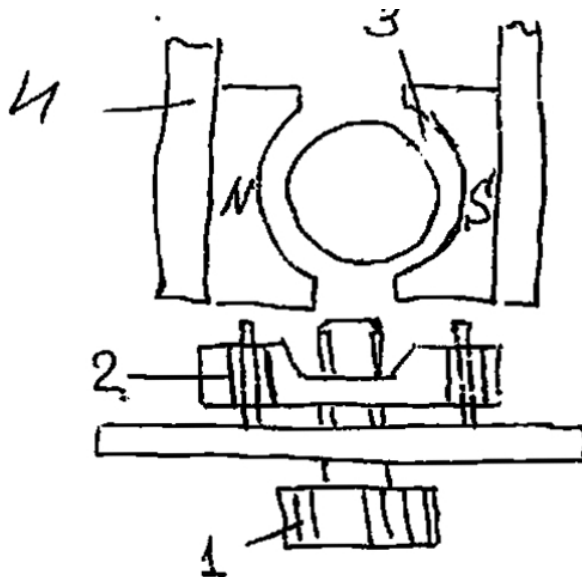
якщо  $US_i = const$ , то  $\alpha \sim R_x$ , так як  $R_d R_u = const$ . Тому шкалу N градуують в Омах.

Верхня межа виміру залежить від чутливості N і напруга U

Мом  $\sim 10 \div 100$  В; Ом  $\div 10$  В.

Батарея що живить прилад з часом міняє напругу, що викликає погрішність. Для її усунення необхідно забезпечити  $US_i = const$ , шляхом регулювання чутливості  $S_i$ , що досягається за допомогою магнітного шунта (на схемі показано пунктиром).

$R_d$  і  $R_{шунт}$  вибираються такими, щоб при натиснутій Кн стрілка встановлювалася на нуль. З витрачанням батареї енергії  $R_{шунт}$  збільшується.



1 - голівка регулювального гвинта

2 - пластинка з феромагнітного матеріалу, розташована біля полюсів постійного магніта

3 - повітряний проміжок

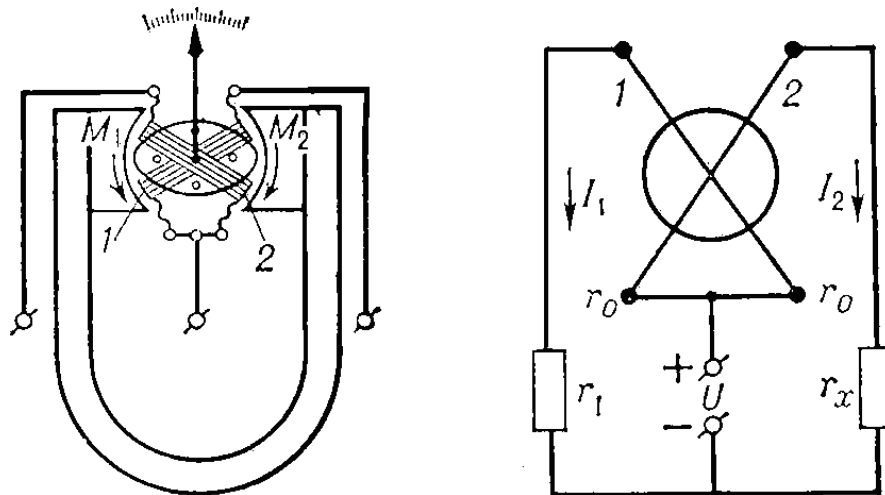
Положення пластинки відносно полюсів можна змінювати обертанням голівки гвинта. Залежно від положення пластинки частина магнітного потоку, що відгалужується через неї, а отже і індукція в повітряному проміжку змінюватиметься. Тому зміниться чутливість вимірювального механізму.

$R_x$  і N сполучені послідовно при вимірі великих опорів, т. до. малі опори при такому включенні не сильно впливають на силу струму.

Для виміру малих опорів застосовують паралельну схему включення  $R_x$  і N. В цьому випадку також  $\alpha \sim R_x$ .

У розглянутому омметрі перед вимірюванням обов'язково проводять перевірку нульового положення стрілки і регулюванням шунта досягають його.

Іншим різновидом систем омметрів використовуються логометри - свідчення яких не залежить від зміни напруги джерела.



Рухома частина приладу складається з двох рамок n1 і n2, розташованих в полі постійного магніта. Ці рамки жорстко закріплені на осі під кутом одна до одної. Обмотки рамки сполучені так, що струми, що проходять по них, створюють обертаючі моменти, спрямовані в протилежні сторони. У контур рамки n1 з опором  $R_1$ , а в контур рамки n2 з опором  $R_2$  послідовно включається вимірюваний опір  $R_x$ .

При натисненні Кн в обмотках рамок з'являються струми:

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R}; I_2 = \frac{E}{R_2 + R_x};$$

Ці струми створять два обертаючі моменти

$$M_1 = I_1 B_1 S_1 W_1 \quad ; \quad W - \text{число витків}$$

$$M_2 = I_2 B_2 S_2 W_2 \quad U - \text{індукція в проміжку}$$

$$S - \text{площа рамки}$$

Позначимо залежність індукції в проміжку від кута повороту рухомої частини з урахуванням параметрів рамок.

$$f_1(\alpha) \text{ і } f_2(\alpha)$$

$$M_1 = I_1 f_1(\alpha) \quad M_2 = I_2 f_2(\alpha)$$

Під дією різниці моментів рухома частина приладу обертається, займаючи положення, при якому

$$M_1 = M_2; \quad I_1 f_1(\alpha) = I_2 f_2(\alpha)$$

Тобто свідчення приладу залежать від відношення струмів  $I_1$  і  $I_2$ .  $I_1 I_2$  змінюються пропорційно отже показання приладу не залежить від  $E$ .

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{E/R_1 + R}{E/R_2 + R_x} = \frac{R_2 + R_x}{R_1 + R}$$

Шкала приладу градується в Омах.

Шляхом підбору різних значень опору додаткового резистора і шунтів до однієї з рамок, а також відповідного  $E$  можна отримати різні межі вимірювань Ом, кОм, МОм.

### Вимірювальні трансформатори

У сучасній техніці використовують високу напругу до 500 кВ і вище і струми до тисяч А.

Найбільший змінний струм, який можна виміряти, включивши прилад безпосередньо в ланцюг, близько 200 А. Розширити межу виміру за допомогою шунта не можна, так як прилади малочутливі, а на шунтах має бути створено відносно велике падіння напруги. Це призводить до збільшення опору шунта, його габаритів і споживаної потужності.

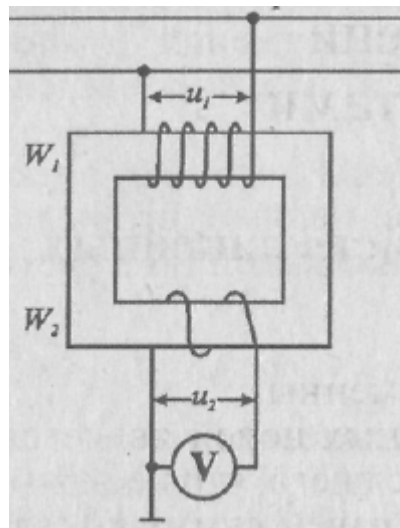
Найбільша напруга, яку можна виміряти 600 В. При вимірі  $U > 600$  В недоцільно застосовувати додаткові опори, так як на них втрачається велика потужність. Тому для розширення меж вимірювання в ланцюгах змінного струму і для відділення цих приладів від дротів високої напруги для забезпечення безпеки застосовують вимірювальні трансформатори.

Розрізняють трансформатори напруги, через які підключають вольтметри і обмотки напруги ватметрів, лічильників, частотоміри і трансформатори струму, через які підключаються амперметри, струмові обмотки ватметрів, лічильників.

Вимірювальні трансформатори споживають меншу, ніж шунти і додаткові опори, потужність і забезпечують велику точність виміру великих струмів і напруги.

### Вимірювальні трансформатори напруги

Будова трансформаторів напруги аналогічно пристрою силового трансформатора.



Первинна обмотка містить відносно велике число витків  $W_1$  і підключається до мережі вимірюваної напруги. До затискачів вторинної обмотки з меншим числом витків  $W_2$  приєднують прилади. Для забезпечення безпеки на випадок пробоя ізоляції один із затискачів вторинної обмотки, корпус і сердечник заземлюються.

Так як опори обмоток напруги вимірювальних приладів великі, то трансформатори напруги працюють в режимі близькому до х.х. і для них небезпечні К.З. Тому первинну обмотку включають через запобіжники.

Основним параметром трансформатора є номінальний коефіцієнт

трансформації. Його значення для кожного трансформатора постійне і

$$\text{вказується на щитку } K_{U_H} = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = \frac{W_1}{W_2}$$

Дійсний коефіцієнт трансформації

$$K_U = U_1 / U_2; U_1 = K_U U_2. \text{ СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ}$$

Дійсний коефіцієнт трансформації невідомий, так як він змінюється при зміні первинної напруги  $U_1$  залежить від частоти і характеру навантаження трансформатора.

Тому на практиці значення первинної напруги визначають, користуючись значенням номінального коефіцієнта трансформації. При цьому визначається наближене значення.

$$U'_1 = K_{U_H} U_2.$$

Таким чином виникає похибка по напрузі

$$\gamma_U = \frac{U'_1 - U_1}{U_1} \cdot 100\% = \frac{K_{U_H} U_2 - K_U U_2}{K_U U_2} \cdot 100\% = \frac{K_{U_H} - K_U}{K_U} \cdot 100\% = \gamma_K$$

$\gamma_K$  – похибка коефіцієнта трансформації.

Також трансформатори мають кутову похибка  $\delta$  (кут між  $U_1$  і  $U_2$ )  $\gamma_U$  впливає на точність свідчення приладів, а  $\delta$  - на прилади свідчення яких залежать від кута зрушення фаз, наприклад лічильників, фазометрів і так далі

Якщо падіння напруги на опорах обмоток = 0

$$\dot{I}(R + jx_L) = 0, \text{ то з В. Д видно, що } E_1 = U_1, E_2 = U_2$$

$$\frac{U_1}{U_2} = K_U = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = K_{U_H}$$

Отже і  $\delta$  при всіх режимах роботи дорівнюватимуть нулю. Таким чином, похибка трансформатора напруги залежить від величини активних і реактивних опорів обмоток і струмів, що протікають в них.

Для зменшення  $R$  обмотки виконують з дротів порівняно великого перерізу. Для

▼ х, що створюються магнітним потоком, повітряні проміжки в стиках роблять як можна меншими і сердечники виготовляють з ЕТС з великою магнітною проникністю, що зменшує ТХХ.

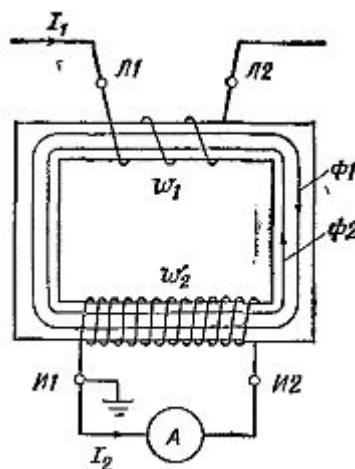
Найбільша потужність, яку має трансформатор при похибках не вище за допустимі, називається номінальною  $S_{H2} = U_{H2} I_{H2} = U_{H1} / Z_H$

До трансформатора можна підключити таку кількість приладів при якому їх сумарна потужність  $S_{\Sigma пр} \leq S_H$ , так як при збільшенні цієї кількості зростають струми і отже збільшуються похибки. На щитках вказується  $K_{U_H}$  у вигляді відношення номінальних напруг (наприклад  $6000/100$ ) номінальна частота або область частот,  $S_H [B \cdot A]$ ,  $\cos \alpha$  клас точності, тип, номер і рік випуску.

Трансформатори напруги бувають одинграничні і багатомежні, переносні і стаціонарні, однофазні і трифазні, з сухою ізоляцією (до 30 кВ) і масляною (понад 3 кВ).

### Вимірювальні трансформатори струму

Призначені для розширення меж виміру по струму ватметрів, лічильників, амперметрів і включення приладів захисту, а також використовуються для захисту вимірювальних приладів і персоналу від високої напруги.





Первинна обмотка містить невелике число витків  $W_1$  і включається послідовно в ланцюг вимірюваного струму.

До затискачів вторинної обмотки, що містить більше число витків  $W_2$ , підключають послідовно струмові обмотки вимірювальних приладів.

Так як опір струмових обмоток дуже незначний, то трансформатори струму працюють в режимі близькому до К.З.

Відношення номінального первинного струму до номінального вторинного струму трансформатора називають номінальним коефіцієнтом трансформації

$$K_{I_n} = I_{1_n} / I_{2_n} = W_2 / W_1.$$

$K_{I_n}$  є основним параметром трансформатора і вказується на його щитку.

Відношення дійсного значення струму первинної обмотки до струму у вторинній обмотці називається дійсним коефіцієнтом трансформації

$$K_I = I_1 / I_2; I_1 = I_2 K_I$$

$K_I$  невідомий. На практиці  $I_1$  визначають користуючись  $K_{I_n}$ . При цьому визначають не фактичний струм первинної обмотки, а його наближене значення  $K_{I_n} I_2$ . Таким чином виникає похибка по струму, яка дорівнює похибці коефіцієнта трансформації

$$\gamma_i = \frac{I_1' - I_1}{I_1} \cdot 100\% = \frac{K_{I_n} - K_I}{K_I} \cdot 100\% = \gamma_K$$

Трансформатори струму також мають кутову погрішність  $\delta$ , так як  $I_2$  зсунутий по фазі відносно  $I_1$  на кут, відмінний від  $180^\circ$ .

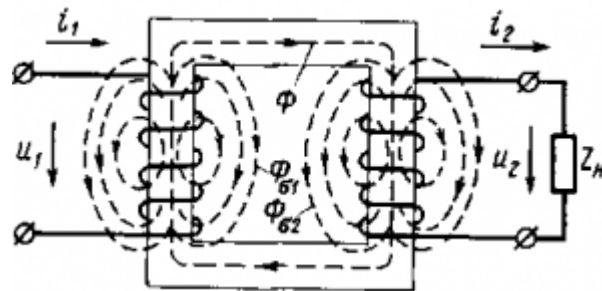
При роботі трансформатора під навантаженням  $I_1 W_1 + I_1' W_2 = I_0' W_1$

Величина похибки залежить від ТХХ.

Якщо,  $I_0 = 0$ , то  $I_1 W_1 = I_2 W_2 \Rightarrow K_I = \frac{I_1}{I_2} = \frac{W_2}{W_1} = K_{I_n}$  і  $\gamma_K = 0$

При  $I_0 = 0$   $\delta = 0$ , так як  $I_1$  і  $I_2$  будуть зрушені на  $180^\circ$ .

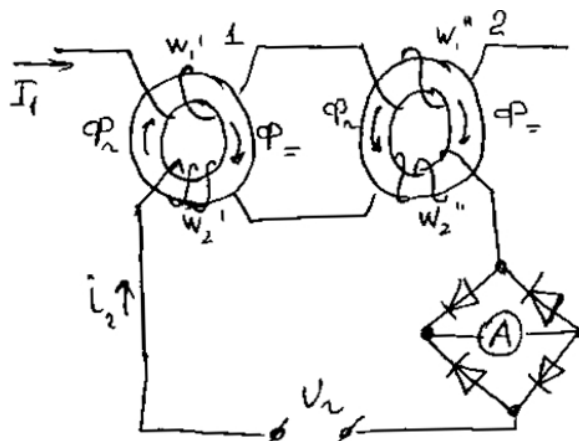
Для зменшення ТХХ трансформатори виготовляють з тонкої листової сталі. У ряді випадків застосовують спеціальні конструкції (компенсовані трансформатори струму) з магнітним шунтом.



Магнітний шунт 1 збільшує потоки розсіювання  $\Phi_p$ , які додатково підмагнічують сердечник до стану найбільшої проникності. Це зменшує ТХХ, а отже і похибки вимірювання.

#### Вимірювальні трансформатори постійного струму

Застосовуються для вимірювання постійних струмів великої величини.



ТПС складається з двох однакових феромагнітних сердечників, на яких надіті обмотки з однаковим числом витків  $w_1'$  і  $w_1''$  намотані зустрічно, сполучені послідовно з випрямним мостом і підключені до джерела змінної напруги. Вимірюваний струм  $I_1$  створює в сердечниках однакові за величиною і напрямом магнітні потоки  $\Phi_n$ , які намагнічують сердечників до насичення.

По вторинних обмоткам  $w_2'$  і  $w_2''$  протікає змінний струм  $i_2$ , який створює в сердечниках потік  $\Phi_n$ . Допустимо в I напівперіод  $i_2$  створює в першому сердечнику потік  $\Phi_n$ , що співпадає по напрямку з  $\Phi_n$  але так як сердечник був вже насичений, то практично загальний магнітний потік не

збільшиться. В той же час в II сердечнику потоки  $\Phi_{=}$  і  $\Phi_{\sim}$  спрямовані зустрічно. Але так як і II сердечник був насичений потоком  $\Phi_{=}$ , то в перші миті

$$\frac{d\Phi}{dt} = 0 \text{ і } i_2 = W_2'' \frac{d\Phi}{dt} = 0$$

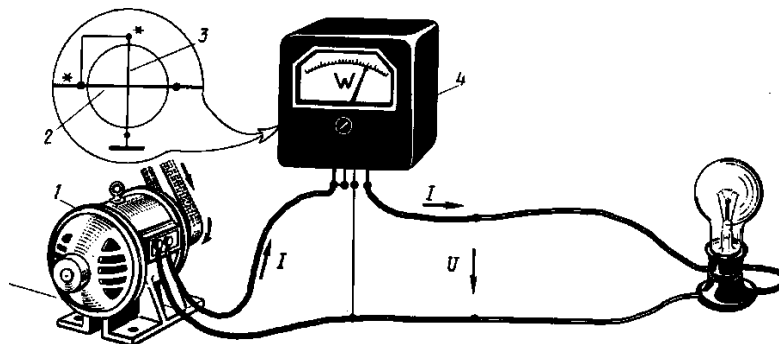
Так як  $i_2 = \frac{U_2 - i_2 R_{2(\text{сопр. втор. обм.})}}{R_{2(\text{сопр. втор. обм.})}}$ , то в перші миті  $i_2$  стрімко наростає, що збільшує  $\Phi_{\sim}$  і зменшує загальний потік  $\Phi$ . Сердечник 2 починає розмагнічуватися, але тоді  $\frac{d\Phi}{dt} \neq 0$ ,  $i_2 \neq 0$ , і струм  $i_2$  уповільнює своє зростання. Коли  $i_2$  компенсуватиме  $U_{\sim}$ , зростання струму повністю припиниться. Це означає, що МДС первинної і вторинної обмоток другого сердечника будуть рівні  $I_1 W_1' = i_2 W_2''$ ,  $i_2 = I_1 \frac{W_1'}{W_2''}$ . Сердечник 1 не чинить впливу на струм  $i_2$ , так як він насичений. У другий напівперіод сердечники 1 і 2 поміняються ролями. Таким чином, хоча по первинних обмотках протікає змінний струм амперметр, включений через випрямляч, покаже середнє значення випрямленого струму

$$I_{\text{ср}} \approx i_2 = I_1 \frac{W_1'}{W_2''} K_n = \frac{W_1'}{W_2''} \Rightarrow I_1 = I_{\text{ср}} \cdot K_n$$

## ЛЕКЦІЯ 8

### Вимірювання потужності

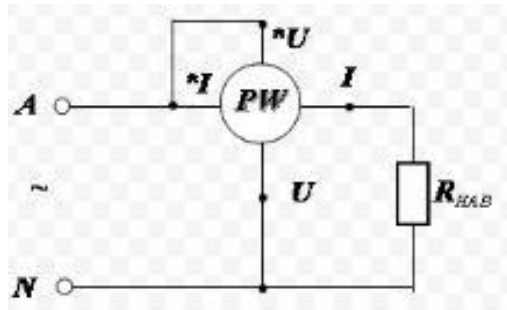
Вимірювання потужності в ланцюгах постійного струму і однофазних ланцюгах змінного струму  $P = IU$ .



Потужність можна виміряти непрямим методом за допомогою амперметра і вольтметра, а також за допомогою ваттметра.

У ланцюгах змінного струму  $P = IU \cos \varphi$ .

Потужність може бути виміряна непрямим методом за свідченнями амперметра, вольтметра і фазометра (вимір.  $\cos \varphi$ ) або за допомогою ваттметра. При включенні ваттметра в ланцюг з активно-індуктивним навантаженням.



$$\alpha = KI I_u \cos \psi = KI I_u \cos(\varphi - \varphi_U) = KI U / Z_U \cdot \cos(\varphi - \varphi_U)$$

$$Z_U = \sqrt{(R_U + R_d)^2 + (2\pi f L_U)^2} \quad \text{- повний опір паралельного ланцюга}$$

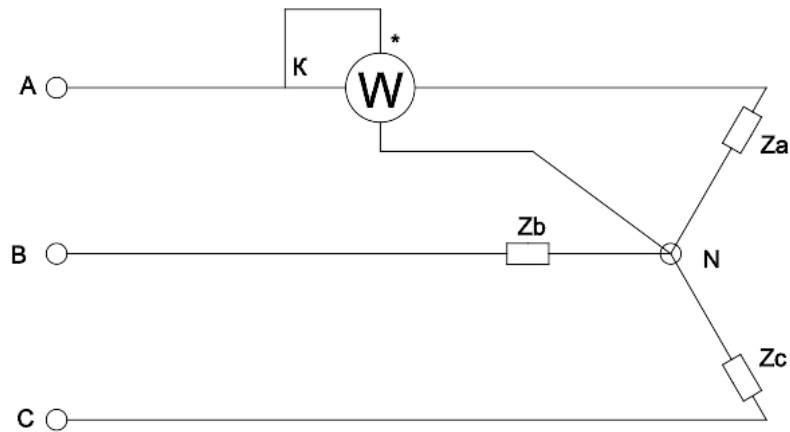
ваттметра

Якщо  $\pi f L_U$  і  $\varphi_U$  дорівнюють нулю, то  $\alpha = KI \frac{U}{R_U + R_d} \cos \varphi = K_1 I U \cdot \cos \varphi = K_2 P_i$  ваттметр вимірюватиме активну потужність споживача. Практично це здійснюється включенням  $R_d \gg x_{LU}$ , або шунтують  $R_d$  ємністю, яка компенсує  $x_{LU}$ . Ціна поділки (постійна) ваттметра  $C_p = \frac{I_k U_n}{\alpha_n}$ .

### Вимірювання активної потужності в ланцюгах трифазного струму

Активна потужність в ланцюзі трифазного струму залежно від навантаження (рівного або нерівного) і системи живлення (трьох- або чотирипровідної) може бути виміряна одним або декількома однофазними ваттметрами.

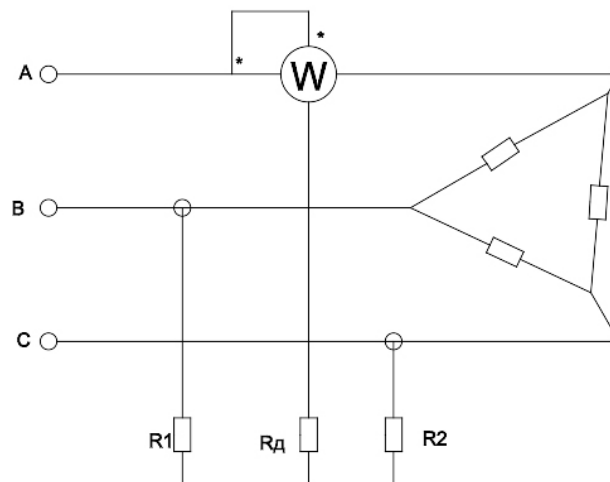
Метод одного ваттметра застосовується при рівномірному навантаженні фаз і симетричних напругах.



$$P = 3P_{\text{вт}}$$

$$P_{\text{вт}} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi$$

Якщо приймачі сполучені трикутником або зіркою з недоступною нульовою точкою то застосовується схема з штучною нульовою точкою, яка створюється паралельним ланцюгом ватметра і двома додатковими резисторами



$$R_1 = R_2 = R_3, \text{ де } R_3 = R_1 + R_2$$

На опорі  $R_1, R_2$  і  $R_3$ , з'єднання зірка буде інша напруга, яка менше прикладеної до навантаження кожної фази в  $\sqrt{3}$  раз.

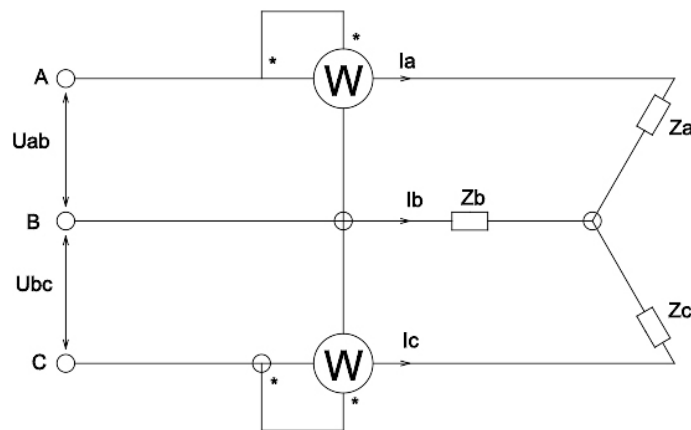
Через струмову обмотку ватметра протікає лінійний струм  $I_L = \sqrt{3} \cdot I_{\text{ср}}$

$$P_{\text{Вт}} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3}} I_L \cos \varphi = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi$$

$$P = 3P_{\text{Вт}} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi$$

Метод двох ватметрів застосовується в трипровідних ланцюгах при нерівномірному навантаженні або несиметричній напрузі.

Миттєві значення потужностей, виміряні ватметром



$$P_1 = i_A U_{AB} \quad P_2 = i_C U_{CB}$$

$$U_{AB} = U_A - U_B; \quad U_{CB} = U_C - U_B$$

$$P_1 = i_A (U_A - U_B);$$

$$P_2 = i_C (U_C - U_B);$$

$$P_1 + P_2 = i_A U_A - i_A U_B + i_C U_C - i_C U_B = i_A U_A - U_B (i_A + i_C) + i_C U_C$$

$$i_A + i_B + i_C = 0$$

$$i_B = -(i_A + i_C) \Rightarrow P_1 + P_2 = i_A U_A + i_B U_B + i_C U_C$$

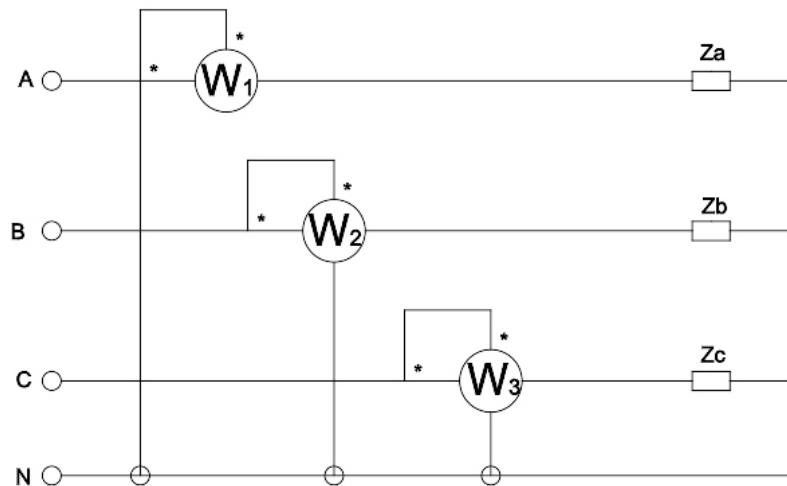
Активна потужність споживачів трифазного ланцюга за будь-який проміжок часу дорівнює активній потужності, виміряній двома ваттметрами.

$$P_{1\phi} + P_{2\phi} + P_{3\phi} = P_{\text{Вт.1}} + P_{\text{Вт.2}}$$

Це співвідношення справедливе також і при включенні споживачів трикутником.

Метод трьох ватметрів використовується у разі нерівномірного навантаження фаз, коли приймачі сполучені зіркою з нульовим дротом.

Вимірювання реактивної потужності в трифазних ланцюгах



$$P = P_{Вт.1} + P_{Вт.2} + P_{Вт.3}$$

Реактивна потужність трифазного ланцюга

$$Q = U_{\phi_1} I_{\phi_1} \sin \varphi_1 + U_{\phi_2} I_{\phi_2} \sin \varphi_2 + U_{\phi_3} I_{\phi_3} \sin \varphi_3$$

Метод одного ваттметра. У разі рівномірного навантаження фаз і симетрії напруги  $Q$  можна виміряти одним однофазним ваттметром.

Кут зсуву фаз між струмом  $I_A$  і напругою  $U_{BC}$  рівний  $90^\circ - \varphi$ . Тому ваттметр показуватиме

$$P_{Вт} = U_{BC} I_A \cos(90^\circ - \varphi) = U_{л} I_{л} \sin \varphi$$

При повній симетрії системи реактивна потужність рівна

$$Q = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \sin \varphi$$

Свідчення ваттметра необхідно помножити на  $\sqrt{3}$ .

При рівномірному навантаженні фаз реактивну потужність можна виміряти двома ваттметрами, включеними за схемою виміру активної потужності.

Свідчення двох ваттметрів

$$P_{Вт_1} = U_{л} I_{л} \cos(30^\circ + \varphi); P_{Вт_2} = U_{л} I_{л} \cos(30^\circ - \varphi)$$

а їх різниця

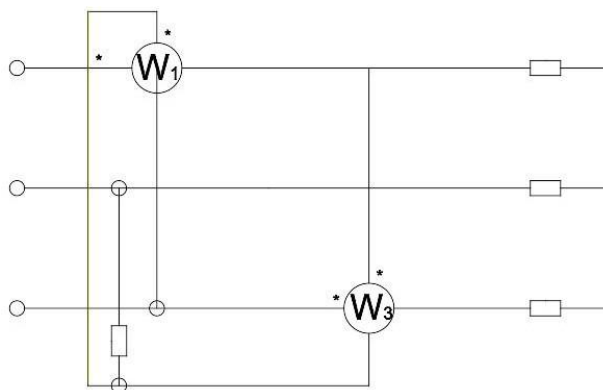
$$P_{Вт1} - P_{Вт2} = U_{л.л.} [\cos(30^\circ + \varphi) - \cos(30^\circ - \varphi)] = U_{л.л.} \sin \varphi$$

Таким чином

$$Q = \sqrt{3}(P_{Вт1} - P_{Вт2})$$

## ЛЕКЦІЯ 9

### Метод двох ватметрів з штучною нульовою точкою

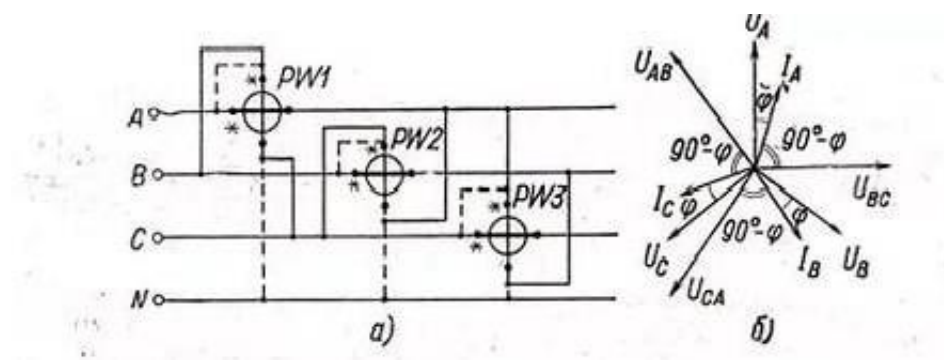


$$P_{Вт1} + P_{Вт2} = U_A I_C \cos(60^\circ - \varphi) + U_A I_C \cos(120^\circ - \varphi) = I_\phi U_\phi \left( \frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi - \frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right) = \sqrt{3} I_\phi U_\phi \sin \varphi$$

$$Q = \sqrt{3}(P_{Вт1} + P_{Вт2}) = \sqrt{3} I_\phi U_\phi \sin \varphi$$

Метод застосовується при рівномірній і нерівномірній навантаженнях фаз і симетричній напрузі.

### Метод трьох ватметрів





Застосовується для вимірів в трипровідній і чотирипровідній мережі при нерівномірному навантаженні фаз

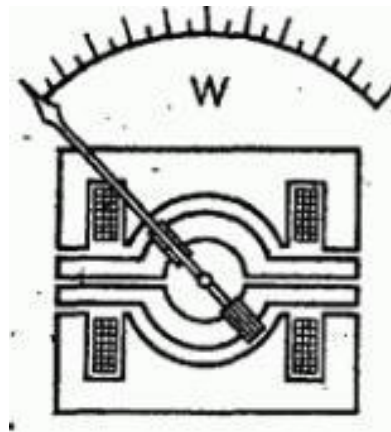
$$P_{Вт1} + P_{Вт2} + P_{Вт3} = I_A U_{BC} \sin \varphi_1 + I_B U_{CA} \sin \varphi_2 + I_C U_{AB} \sin \varphi_3 = \sqrt{3}Q$$

$$Q = \frac{P_{Вт1} + P_{Вт2} + P_{Вт3}}{\sqrt{3}}$$

## ЛЕКЦІЯ 10

### Трифазні ватметри

У трифазних ватметрах в одному корпусі об'єднані два або три однофазні ватметри, обертаючі моменти яких діють на загальну вісь.



Вимірювальний механізм складається з двох нерухомих, незалежних одна від одної котушок 1, магнітні потоки яких змикаються через магнітопроводи 2 і 3. Рухлома частина складається з двох котушок 4, які жорстко скріплені між собою і обертаються навколо осі 0.

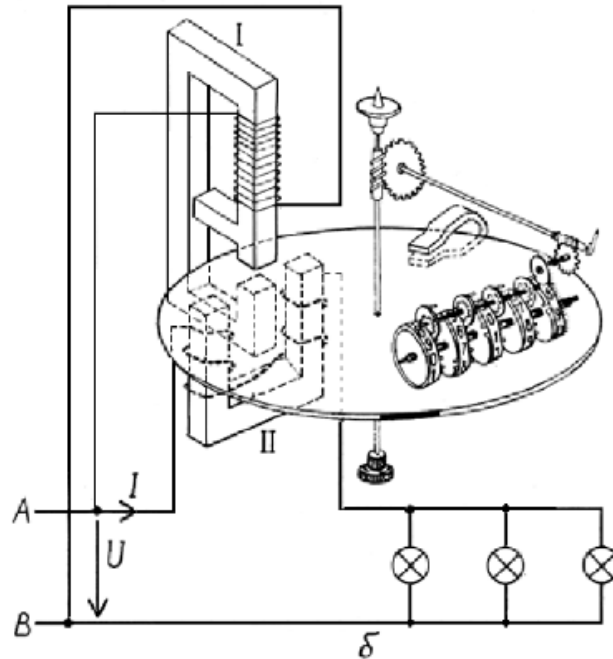
У такому ватметрі рухома частина знаходиться під дією алгебраїчної двох моментів, отже кут відхилення стрілки буде пропорційний потужності.

Додатковий резистор  $R'_d$  служить для компенсації взаємного впливу одного елемента ватметра на інший.

### Вимірювання електричної енергії

#### Однофазний магнітоіндукційний лічильник

Будова приладів заснований на взаємодії змінних магнітних потоків із струмами, які індуковані цими потоками в рухомій частині приладу.



Вимірювальний механізм однофазного лічильника має магнітну систему з двома електромагнітами змінного струму з магнітопроводами I і II, які складені з тонких ізольованих один від одного листів електричної сталі. На цих магнітопроводах знаходяться відповідно паралельна обмотка з великим числом витків тонкого проводу і послідовна обмотка з малим числом витків товстого проводу. Першу з них вмикають на напругу мережі  $U$ , а другу з'єднують послідовно з приймачами електричної енергії, які встановлюють певний струм навантаження  $I$ . Оскільки магнітопровід електромагніта з паралельною обмоткою майже замкнений, а магнітопровід електромагніта з послідовною обмоткою має велику повітряну ділянку в магнітному колі, змінні струми у цих обмотках збуджують магнітні потоки, пропорційні відповідно напрузі  $U$  і струму  $I$ , які зсунуті за фазою і не збігаються у просторі. Внаслідок цього збуджується бігуче магнітне поле, яке наводить у рухомому алюмінієвому диску відповідні ЕРС і вихрові струми. Ці струми взаємодіють з бігучим магнітним полем і диск починає безперервно обертатися.

Момент,  $M_{вр} = C\Phi$  де  $C = \text{const}$  залежна від конструкції магнітів і диска.

Роль протидіючого моменту виконує гальмівний момент  $M_T$  створюваний постійним магнітом  $M$ .

Так як величина вихрових струмів пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, тобто швидкості обертання диска, то гальмівний момент пропорційний числу оборотів диска в одиницю часу  $N/t$

$$M_T = K_T N/t, K_T - \text{коефіцієнт пропорційності}$$

Під дією  $M_{\text{вп}}$  диск починає обертатися з прискоренням що призводить до зростання  $M_T$ . Обертання стає рівномірним при  $M_{\text{вп}} = M_T$   $K_T N/t = CP$

$$K_T N = CPt, Pt = W - \delta w.$$

$$N = C/K_T W = KW$$

Число оборотів диска лічильника електричної енергії  $K = \frac{N}{W}$  - передавальне число лічильника показується на щитку. Нар. 1кВт ч - 2500 оборотів диска.

Величина, зворотна передавальному числу називається номінальною постійною лічильника

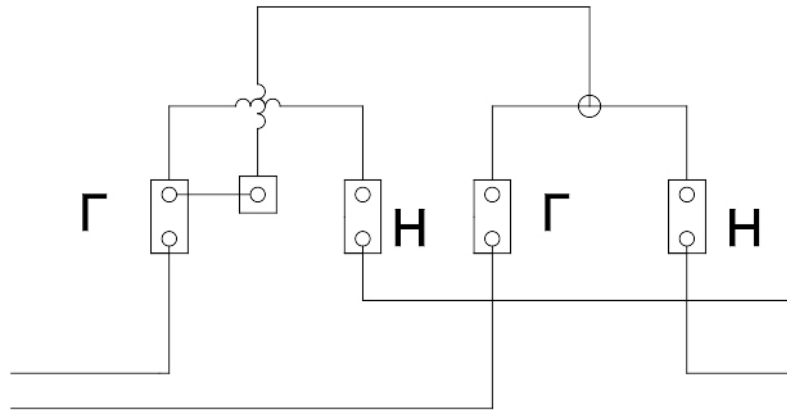
$$C_H = \frac{W_1}{N} = \frac{1}{K}$$

$$\gamma = \frac{W_H - W_D}{W_D} \cdot 100\% = \frac{NC_H - NC_D}{NC_D} \cdot 100\% = \frac{C_H - C_D}{C_D} \cdot 100\%$$

$W_1$  – енергія врахована лічильником

$W_D$  – енергія, дійсно витрачена в ланцюзі.

Початки і кінці обмоток лічильника позначені відповідно буквами Г(генератор) і Н (напр.)

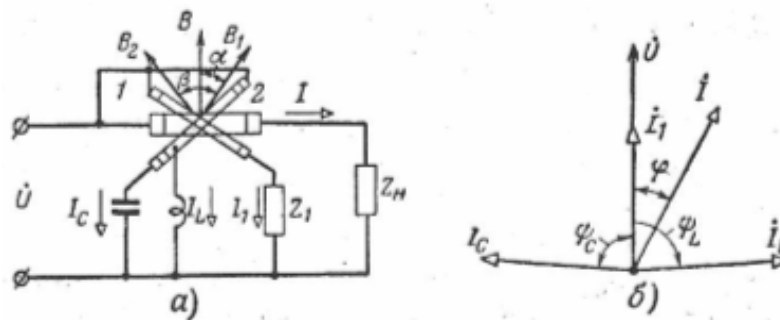


### Вимірювання $\cos \varphi$

У однофазних і трифазних ланцюгах при рівномірному навантаженні  $\cos \varphi$  можна виміряти непрямым методом за допомогою амперметра, вольтметра, ватметра (однофазний  $\cos \varphi = \frac{P}{IU}$ ; трифазний  $\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}I_{\text{л}}U_{\text{л}}}$ ). Або прямим методом за допомогою фазометрів. Розрізняють фазометри електродинамічної, феродинамічної і електромагнітної системи.

### Електродинамічний однофазний фазометр

є логометром.



Нерухома котушка А складається з двох секцій, розташованих так, щоб забезпечити всередині котушки практично рівномірне поле. По ній тече струм  $I_{\text{н}}$ . В полі котушки А розташовано дві котушки  $B_1, B_2$ , укріплені на загальній осі і жорстко пов'язані між собою під кутом  $\gamma$ . Вони включені паралельно навантаженню на напругу мережі  $U$ . Послідовно включень резистор  $R$  тому

$I_1$  і  $U$  співпадають по фазі. У ланцюг  $B_2$  включена індуктивність  $L$  тому  $I_2$  відстає від  $U$  на кут  $\beta$ .

Взаємодія струму нерухомої котушки із струмами  $I_1$  і  $I_2$  рухомої котушки створює у фазометрі два обертаючі моменти  $M_{B_1} = C_1 I_H I_1 \frac{\cos \varphi}{\cos(\gamma - \alpha)}$ ;

$M_{B_2} = C_2 I_H I_2 \cos(\beta - \varphi) \cos \alpha$  де  $\alpha$  – просторовий кут між віссю нерухомої котушки і площиною рухомої котушки  $B_1$ . Напрями витків в  $B_1$  і  $B_2$  протилежні, тому один обертаючий момент спрямований за годинниковою стрілкою, а інший проти. При рівновазі рухомої частини

$$M_{B_1} = M_{B_2}$$

$$C_1 I_H I_1 \cos(\gamma - \alpha) = C_2 I_H I_2 \cos(\beta - \varphi) \cos \alpha$$

Конструктивні складові котушок рівні  $C_2 =$

$$\frac{\cos(\gamma - \alpha)}{\cos \varphi} = \frac{I_1}{I_2} \cdot \frac{\cos(\beta - \varphi)}{\cos \varphi}$$

Параметри паралельних ланцюгів фазометрів підбрані так, що  $I_1 = I_2$ ;  $\beta = \alpha$ . Тому  $\alpha = \varphi$ . Таким чином, кут повороту рухомої частини залежить від  $\varphi$ . Отже, шкалу фазометра можна проградувати в значеннях кута  $\varphi$  або коефіцієнта потужності  $\cos \varphi$ . Недоліком цього фазометра є залежність свідчень від частоти, так як зі зміною частоти змінюється індуктивний опір  $x_L \Rightarrow I_2$  і  $\beta$  що викликає похибку.

Для зменшення похибки котушка  $B_2$  ділиться на дві частини в одну з яких включається індуктивність, а в іншу конденсатор.

Послідовно з  $B_2'$  вкл.  $L$ , а з  $B_2''$  -  $C$ , що забезпечує зсув фаз між струмами секцій на  $180^\circ$ . Але оскільки секції включені зустрічно, їх обертаючі моменти спрямовані в один бік і додаються. Значення  $L$  і  $C$  підбрані так, що при номінальній частоті  $20f$  і  $L = \frac{1}{20f_{\text{н}} C}$  струми в секціях  $B_2'$  і  $B_2''$  рівні.

При зміні частоти збільшення струму в одній секції котушки  $B_2$  практично дорівнює зменшенню струму в іншій секції, а сумарний обертаючий

момент залишається незмінним. Таким чином, свідчення фазометра не залежать від частоти.

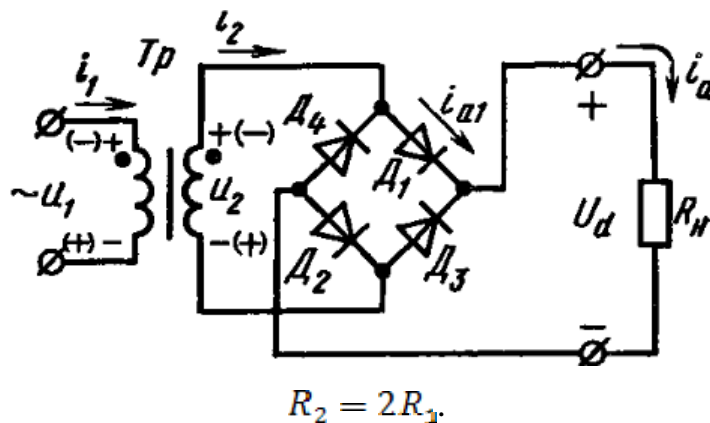
### Методи вимірювання частоти

Вимірювання частоти здійснюється за допомогою частотомірів, які залежно від умов роботи, призначення і діапазону вимірюваних величин часто бувають електродинамічними, феродинамічної, електромагнітної, вібраційної систем.

Залежно від вимірюваної частоти і необхідної точності вимірів вибирається метод виміру.

### Вимір частоти за схемою моста

Для виміру частот до 15 кГц використовують мостову схему, умова рівноваги якої залежить від частоти підведеної до неї напруги змінного струму.



При постійних значеннях  $R_1, R_2$  вимірювана частота залежить тільки від опору резисторів  $R$ , якими балансують міст, і визначається рівністю.

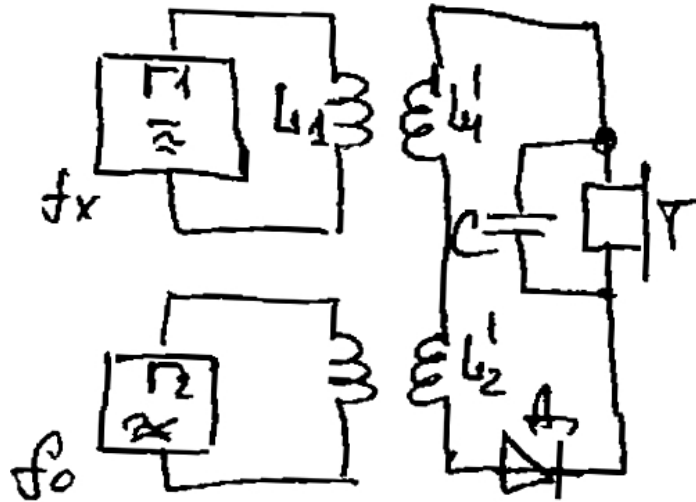
$f_x = \frac{1}{2\pi RC}$ . Опори  $R$  рівні між собою і регулюються одночасно загальною ручкою. Це дає можливість відградувати міст у величинах вимірюваної частоти.

### Вимірювання частоти резонансним методом

Для цієї мети застосовують коливальний контур LC, з яким індуктивно пов'язаний (через  $L'$  ланцюг індикатора, що складається з гальванометра Гв і детектора Д.

При вимірюванні досліджуваній генератор  $\Gamma$  індуктивно зв'язують з контуром LC і змінюючи місткість конденсатора домагаються резонансу по максимальному відхиленню стрілки Гв.  $\omega L = 1/\omega C$  З умов резонансу визначають частоту  $f_x = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  Шкала змінного конденсатора градуйована в одиницях частоти.

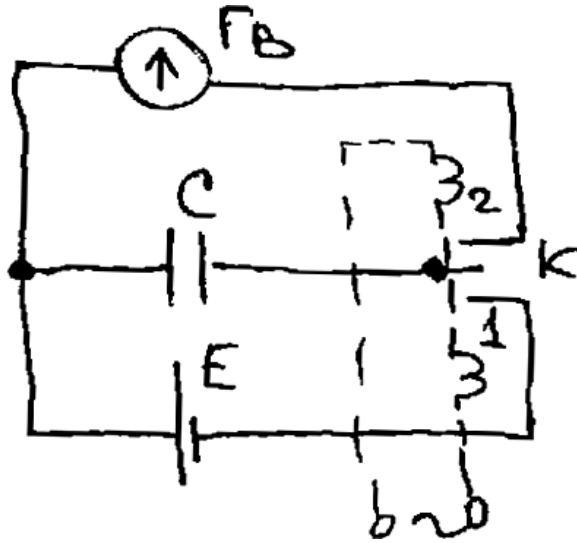
Вимірювання частоти методом порівняння з частотою зразкового генератора



Використовується зразковий генератор  $\Gamma_2$ , частоти  $f_0$ , яку можна змінювати в процесі вимірювань. Генератор зв'язують детекторним ланцюгом, складається з діода і індикатора - телефону Т, зашунтованого конденсатором С. З цим же ланцюгом зв'язують генератор  $\Gamma_1$  невідомої частоти  $f_x$ .

Припустимо що генератори з  $f_x$  і  $f_0$  виробляють  $\sin$  сигнали. В результаті детектування цих коливань, виникає ряд гармонік і комбінаційних частот, серед яких з'являється частота,  $f_x - f_0$  що називається частотою биття. При цьому в індикаторі телефону чутний звуковий сигнал, який пропадає за умови  $f_x = f_0$ .

## ЛЕКЦІЯ 11

Вимір частоти методом перезаряду конденсатора

Коли  $C$  за допомогою перемикача  $K$  підключають на заряд до батареї  $E$ , а потім на розряд через  $G_v$ . Якщо  $C$  заряджається і розряджається повністю за час одного перемикачання  $K$ , то заряд накопичується і віддається  $G_v$  його значення  $q = CE$ .

Якщо перемикачання проводити з частотою  $f_x$  в 1с, через  $G_v$  пройде струм  $I = qf_x$   $I = CEf_x$  звідси  $f_x = \frac{1}{CE}$ . Якщо замість перемикача  $K$  застосувати поляризоване реле, до контакту якого буде підключений конденсатор, а до обмотки підвести змінну напругу (показано пунктиром), то можна виміряти частоту підведеної напруги.

Для перемикачання конденсатора на заряд і розряд можна використовувати транзистор.

Вимірювання магнітних величин

Основними параметрами магнітного поля є індукція  $B$ , напруженість  $H$ .  
 $B = \mu_0 H$

Потоком вектору магнітної індукції  $B$  через площу  $S$  є магнітний потік  $\Phi$ .



До основних характеристик, що відбивають магнітні властивості матеріалів, відносяться крива намагніченості і петля гістерезису. При дослідженні характеристик їх розділяють на динамічні і статичні.

Статичні х-ки використовують для аналізу постійних магнітних полів і для порівняння магнітних властивостей матеріалів. Динамічні х-ки використовують для дослідження змінних магнітних полів. Вони залежать не лише від магнітних властивостей матеріалів, але і від частоти зміни магнітного поля, його форми і розмірів магнітопровода.

При вимірюванні магнітних величин використовують їх міри, до яких відноситься міра магнітного потоку, напруженості поля і індукції.

Міри магнітного потоку - котушка взаємної індуктивності, виконується з мінімально можливим активним опором, індуктивністю і міжвитковою місткістю. Відповідно до ГОСТ значення міри встановлене 0,01 Вб.

Мірами напруженості магнітного поля є індуктивні котушки із струмом. Відповідно до ГОСТ номінальне значення таких мір визначене в діапазоні від  $2 \cdot 10^{-3}$  до  $0,05 \cdot 10^{-5} \text{ A/m}$  в діапазоні частот від 0,01 до 30 МГц.

Мірами магнітної індукції є намотані на кварцевому каркасі індуктивні котушки, по яких протікає струм силою 1 А; використовуються для відтворення магнітної індукції в діапазоні від  $1 \cdot 10^{-10}$  до  $5 \cdot 10^{-2}$  Тл з похибкою не більше 0,0005%.

## ЛЕКЦІЯ 12

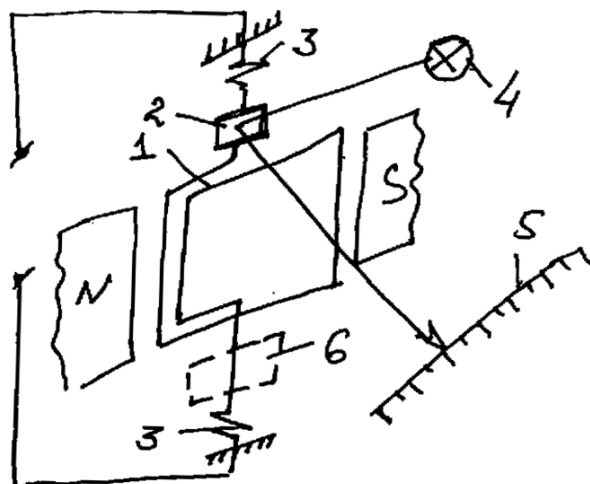
### Вимірювання магнітного потоку в постійному магнітному полі

Дія приладів заснована на явищі електромагнітної індукції. Якщо  $W$  витків індуктивної котушки зчеплене з магнітним потоком  $\Phi_x$ , який потрібно виміряти, то у витках цієї котушки індукується ЕРС.

$$e = -W \frac{d\Phi_x}{dt}$$

$$\Phi_x = \frac{1}{W} \int e dt$$

Прилад для вимірювання магнітного потоку має бути інтегруючим. Цій вимозі відповідає конструкція балістичного приладу високої чутливості. З рухливою рамкою і світловим показчиком.



- 1 – рамка
- 2 – дзеркало
- 3 – підвіски
- 4 – освітлювач
- 5 – шкала
- 6 – балістична маса

По рамці протікає струм, внаслідок чого вона обертається на деякий кут разом з дзеркалом.

Рухоме дзеркало освітлюється лампою, а відбитий від дзеркала світловий промінь потрапляє на шкалу. При збільшенні моменту інерції шляхом збільшення маси рухливої частини 6. В цьому випадку гальванометр використовується як інтегратор струму.

Імпульс струму, що протікає по рамці, взаємодіє з магнітним полем постійного магніта і випускає короткочасний імпульс обертаючого моменту, дія якого викликає балістичний кидок, а потім повернення в початковий стан під дією  $M_{пр}$ . Під дією ЕРС у вимірювальному ланцюзі з'являється струм

$$i = e/r = -\frac{W}{R} \frac{d\Phi_x}{dt}, \text{ де } R - \text{ загальний опір ланцюга.}$$

Якщо потік  $\Phi_x$  змінюється від 0 до  $\Phi_x$ , а потім від  $\Phi_x$  до 0 та к-ть електрики  $Q_3$  що проходить через вимірювальний прилад за час  $t$ , рівна

$$dQ_3 = i dt = -\frac{W}{R} d\Phi_x$$

$$\Phi_x = \frac{R}{W} Q_3$$

Заряд  $Q_3$ , що проходить по контуру прилада, викликає переміщення рухомої частини, яке пропорційно  $Q_3$ .

$$Q_3 = C_Q \alpha_\delta$$

$\alpha_\delta$  - переміщення рухомої частини

$C_Q$ - балістична постійна приладу.

$$\Phi_x = \frac{R}{W} C_Q \alpha_\delta = \frac{C_\Phi}{W} \alpha_\delta,$$

$$C_\Phi = RC_Q \text{ - постійна.}$$

На основі конструкції балістичного гальванометра випускаються магнітоелектричні прилади, звані веберметрами.

#### Вимірювання змінного магнітного потоку

Зазвичай вимірюють за допомогою вольтметрів з великим входним опором, які підключаються до вимірювальної котушки. Якщо котушка поміщена в змінне магнітне поле, то в ній індукується ЕРС.

$$E = 4,44 f W \Phi_m k_f$$

$k_f$  – коефіцієнт форми кривої магнітного потоку.

По виміряному значенню ЕРС і відомій частоті можна розрахувати амплітудне значення тяги потоку.

$$\Phi_m = \frac{E}{4,44 k_f f W}$$

#### Вимірювання індукції і напруженості

Можна виміряти за допомогою веберметра на підставі залежності

$$B = \Phi / S.$$

Найбільшого поширення набули прилади з перетворювачами Холла. Ефект Холла полягає в тому, що ЕРС, що виникає на торцях металевої або напівпровідникової пластинки, поміщеної в поле з індукцією  $B$  і включеною в

ланцюг з силою струму  $I$ , пропорційна магнітній індукції або напруженості поля і силі струму, що проходить через пластинку

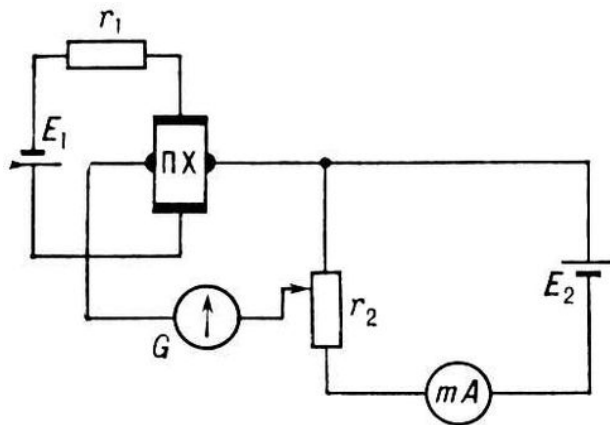
$$E_x = S_B IB_x = S_H IH_x,$$

Де  $S_B$  і  $S_H$  - чутливості перетворювача відповідно до магнітної індукції і напруженості

$$B_x = \frac{E_x}{S_B I}; H_x = \frac{E_x}{S_H I}.$$

Прилади з перетворювачами Холла називаються тесламетрами.

Принципова схема тесламетра



$\Gamma$  - генератор служить для живлення перетворювача і як джерело зразкової ЕРС.

Сигнал отриманий з перетворювача  $\Pi_x$ , поступає на компенсатор змінного струму  $K$  і через підсилювач  $У$  на вимірювальний прилад  $\Pi$ .

Чутливий елемент перетворювача Холла кріплять на кінці виносного зонду. Для захисту від механічних ушкоджень його вкривають шаром пластмаси.

## Питання до іспиту з дисципліни КВП з основами метрології

1. Класифікація методів вимірювань.
2. Вимірювання середніх опорів косвеним методом.
3. Конструкція та робота однофазного фазометра.
4. Основні визначення (вимірювання, результат вимірювання, єдність вимірювань, технічні засоби вимірювань).
5. Вимірювання середніх опорів одинарним вимірювальним мостом.
6. Конструкція та схема вмикання трифазного ваттметра.
7. Похибки вимірювань.
8. Вимірювання середніх опорів лінійним мостом.
9. Зменшення похибки вимірювання фазометра, яка обумовлена зміною частоти.
10. Похибки вимірювальних приладів.
11. Вимірювання малих опорів подвійним вимірювальним мостом.
12. Конструкція та робота однофазного лічильника.
13. Визначення найбільших можливих похибок при косвеному методі вимірювань.
14. Вимірювання великих опорів методом заміщення.
15. Конструкція та робота приладів електромагнітної системи.
16. Міжнародна система одиниць.
17. Вимірювання опорів одно рамочним омметром. Конструкція магнітного шунта.
18. Конструкція та робота приладів магнітоелектричної системи.
19. Класифікація електровимірювальних приладів за системами.
20. Будова і робота логометра.
21. Вимірювання частоти за схемою моста.
22. Умовні позначення на шкалах вимірювальних приладів.
23. Конструкція вимірювальних трансформаторів напруги.

24. Вимірювання частоти за резонансним методом.
25. Узагальнена схема будови електровимірювального приладу безпосередньої оцінки.
26. Способи зменшення похибок вимірювальних трансформаторів напруги.
27. Вимірювання частоти методом перезаряда конденсатора.
28. Охарактеризувати обертовий момент, момент протидії та встановлюючий момент вимірювальних приладів. Чуттєвість і постійна електровимірювального приладу.
29. Конструкції вимірювальних трансформаторів струму.
30. Конструкція та робота приладів електродинамічної системи.
31. Розширення межі вимірювання приладів магнітоелектричної системи. Шунти.
32. Похибки вимірювальних трансформаторів струму. Від чого вони залежать?
33. Конструкція та робота приладів електростатичної системи.
34. Розширення межі вимірювання приладів магнітоелектричної системи. Додаткові резистори.
35. Вимірювальні трансформатори постійного струму.
36. Робота приладів детекторної системи.
37. Конструкція та принцип дії приладів електромагнітної системи.
38. Вимірювання потужності в колах постійного струму і однофазних колах змінного струму.
39. Вимірювання опорів за допомогою одинарних вимірювальних мостів.
40. Конструкція і принцип дії приладів електродинамічної системи.
41. Вимірювання активної потужності в трифазних колах методами одного ватметра (дві схеми).
42. Похибки електричних приладів.
43. Схеми вмикання приладу електромагнітної системи для вимірювання струму, напруги та потужності.
44. Вимірювання активної потужності в трифазних колах методом двох

- ватметрів.
45. Система міжнародних одиниць.
  46. Конструкція та робота приладів феродинамічної системи.
  47. Вимірювання активної потужності в трифазних колах методом трьох ватметрів.
  48. Вимірювання опорів за допомогою лінійного моста.
  49. Конструкція та робота приладів електростатичної системи.
  50. Вимірювання реактивної потужності в трифазних колах методом одного ватметра.
  51. Вказуючи прилади для вимірювання опорів. Однорамочний омметр.
  52. Прилади термоелектричної системи.
  53. Вимірювання реактивної потужності в трифазних колах методом двох ватметрів.
  54. Конструкція та будова логометра.
  55. Прилади випрямної системи.
  56. Вимірювання реактивної потужності в трифазних колах методом двох ватметрів зі штучною нульовою точкою.
  57. Розрахунок шунтів.
  58. За допомогою структурної схеми пояснить роботу цифрового вольтметра.
  59. Вимірювання реактивної потужності в трифазних колах методом трьох ватметрів.
  60. Розрахунок додаткових опорів.
  61. Класифікація методів вимірювань.
  62. Вимірювання середніх опорів косвеним методом.
  63. Конструкція та робота однофазного фазометра.
  64. Основні визначення (вимірювання, результат вимірювання, єдність вимірювань, технічні засоби вимірювань).
  65. Вимірювання середніх опорів одинарним вимірювальним мостом.
  66. Конструкція та схема вмикання трифазного ваттметра.
  67. Похибки вимірювань.

68. Вимірювання середніх опорів лінійним мостом.
69. Зменшення похибки вимірювання фазометра, яка обумовлена зміною частоти.
70. Похибки вимірювальних приладів.
71. Вимірювання малих опорів подвійним вимірювальним мостом.
72. Конструкція та робота однофазного лічильника.
73. Визначення найбільших можливих похибок при косвеному методі вимірювань.
74. Вимірювання великих опорів методом заміщення.
75. Конструкція та робота приладів електромагнітної системи.



## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кухарчук В. В. Основи метрології та електричних вимірювань. Частина I : конспект лекцій. Вінниця : ВНТУ, 2020. 148 с.
2. Лавренова Д. Л., Хлистов В. М. Основи метрології та електричних вимірювань : навчальний посібник / Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 123 с.
3. Crowder S., Delker C., Forrest E., Martin N. Introduction to Statistics in Metrology. Springer, 2021. 351 p.
4. Єрмілова Н. В., Кислиця С. Г. Основи метрології і електричних вимірювань : навч. посібник до самостійного вивчення курсу для студентів спеціальності 141 „Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” денної та заочної форм навчання. Полтава : ПолтНТУ, 2017. 141 с.
5. Електричні вимірювання : підручник для студентів вищих навчальних закладів / за редакцією професора Д. І. Блецкана. Ужгород : ВАТ “Видавництво “Закарпаття”, 2008. 400 с.
6. Connie L. Dotson. Fundament of Dimentional Metrology. 5nd ed. Delmar Cengage Learning, 2006. 656 p.
7. Метрологія та вимірювальна техніка : підручник / Є. С. Поліщук та ін. ; за ред. проф. Є. С. Поліщука. 2-е вид., переробл. і доповн. Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2012. 534 с.
8. Основи метрології та вимірювальної техніки : підручник : У 2 т. / Дорожовець М. та ін. ; за ред. Б. Стадника. Львів : Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2005. Т. 2. Вимірювальна техніка. 656 с.

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| Передмова.....   | 4  |
| Лекція №1: «Основні поняття і визначення»... ..                                    | 5  |
| Лекція №2: «Похибки вимірів»... ..   | 7  |
| Лекція №3: «Класифікація електровимірювальних приладів»... ..                      | 15 |
| Лекція №4: «Прилади для вимірювання сили струму і напруги»... ..                   | 21 |
| Лекція №5: «Прилади електромагнітної системи».....                                 | 30 |
| Лекція №6: «Поняття про цифрові вимірювальні прилади».....                         | 42 |
| Лекція №7: «Вимірювання великих опорів методом заміщення»... ..                    | 49 |
| Лекція №8: «Вимірювання потужності»... ..  | 59 |
| Лекція №9: «Метод двох ваттметрів з штучною нульовою точкою .....                  | 64 |
| Лекція №10: «Трифазні ваттметри». .....  | 65 |
| Лекція №11: «Вимір частоти методом перезаряду конденсатора».....                   | 72 |
| Лекція №12: «Вимірювання магнітного потоку в постійному магніт-<br>ному полі»..... | 73 |
| Питання до іспиту з дисципліни КВП з основами метрології .....                     | 80 |
| Список рекомендованої літератури .....   | 82 |

Навчально-методичне видання

КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ З ОСНОВАМИ МЕТРОЛОГІЇ

курс лекцій

Укладачі: **Садовий** Олексій Степанович

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 5,25.

Тираж 50 прим. Зам № \_\_\_\_\_

Надруковано у видавничому відділі  
Миколаївського національного аграрного університету  
54029, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р.