

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ О. М. БЕКЕТОВА



## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять  
з дисципліни

### **«Основи метрології та електричних вимірювань»**

*(для студентів заочної форми навчання напрямів підготовки  
6.050701 – «Електротехніка та електротехнології»  
6.050702 – «Електромеханіка»)*

**Харків  
ХНУМГ  
2013**

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Основи метрології та електричних вимірювань» (для студентів заочної форми навчання напрямів підготовки 6.050701 – «Електротехніка та електротехнології», 6.050702 – «Електромеханіка») / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: Я. Б. Форкун, М. Л., Глебова, Д. В. Тугай. – Х. : ХНУМГ, 2013. – 44 с.

Укладачі: доц., к.т.н. Д. В. Тугай,  
доц., к.т.н., Я. Б. Форкун,  
доц., к.т.н. М. Л. Глебова

Рецензент: д.т.н., проф. А. Г. Сосков

Рекомендовано кафедрою теоретичної та загальної електротехніки,  
протокол № 10 від 14.05.2013 р.

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1.1 Основи метрології.	
Перетворювачі струму та напруги .....	5
1.1 Класифікація похибок і класи точності засобів вимірювань .....	5
1.2 Шунти і додаткові опори.....	14
1.3 Вимірювальні трансформатори.....	23
2. ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1.2. Аналогові електромеханічні і електронні прилади. Вимірювання параметрів електричних кіл та електричних величин.....	31
2.1 Вимірювання струму, напруги та потужності.....	31
2.2 Вимірювання активного опору.....	38
СПИСОК ДЖЕРЕЛ.....	43

## Вступ

Методичні вказівки підготовлені на основі робочої програми дисципліни «Основи метрології та електричних вимірювань» і призначені для студентів заочної форми, які навчаються за напрямами підготовки 6.050701 – «Електротехніка та електротехнології» і 6.050702 – «Електромеханіка».

Роль практичних занять при вивченні дисциплін електротехнічного спрямування полягає в здобутті навиків роботи зі спеціальним обладнанням з метою практичної перевірки теоретичних положень, а також закріплення лекційного матеріалу при вирішенні найбільш характерних для окремої дисципліни задач. Електровимірювальна техніка насичена спеціалізованим устаткуванням, необхідним для проведення електричних, магнітних і неелектричних вимірювань. Користування вимірювальним обладнанням засновано на використанні методологічної бази, яка складається з сукупності методів і підходів для правильного вибору засобів вимірювання, способів проведення експерименту і обробки його результатів. Сучасний інженер електротехнічного напрямку підготовки повинен не тільки вміти користуватися засобами вимірювань електричних і магнітних величин, а ще володіти методикою їх проведення.

Дисципліни «Основи метрології та електричних вимірювань» і «Основи метрології та електричних вимірів» складаються з одного модуля «Основи метрології та електричних вимірів», що в свою чергу розбитий на два змістових модуля ЗМ1.1 «Основи метрології. Перетворювачі струму та напруги»; ЗМ1.2 «Аналогові електромеханічні і електронні прилади. Вимірювання параметрів електричних кіл та електричних величин». У цих методичних вказівках розглянуто найбільш характерні задачі електровимірювальної техніки за темами розділів змістових модулів.

## 1. ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1.1

### Основи метрології. Перетворювачі струму та напруги

#### 1.1 Класифікація похибок і класи точності засобів вимірювань

Результати вимірювання фізичної величини дають лише наближене її значення. Відхилення результату вимірювань від істинного значення вимірюваної величини називають похибкою вимірювання. Розрізняють абсолютну та відносну похибки вимірювань.

Абсолютна похибка вимірювання  $\Delta A$  дорівнює різниці між результатом вимірювання  $A$  й істинним значенням вимірюваної величини  $A_0$ :

$$\Delta A = A - A_0. \quad (1.1)$$

Відносна похибка вимірювання  $\delta_A$  – це відношення абсолютної похибки вимірювання до істинного значення вимірюваної величини, виражене у відсотках:

$$\delta_A = \frac{\Delta A}{A_0} \cdot 100\%. \quad (1.2)$$

Оскільки істинне значення вимірюваної величини невідомо, замість нього використовують так зване *дійсне значення*, під яким розуміють значення вимірюваної величини, знайдене експериментальним шляхом і настільки наближене до істинного значення, що може бути використане замість нього. З цієї причини на практиці значення похибки вимірювання можна оцінити тільки приблизно. Похибки вважаються додатними, якщо результат вимірювання перевищує дійсне значення.

Похибки вимірювань мають *систематичну* й *випадкову* складові, які називають також систематичною та випадковою похибками.

Під *систематичними похибками* розуміють похибки, що залишаються постійними або закономірно змінюються при повторних вимірюваннях тієї ж величини. Систематичні похибки можуть бути визначені й усунуті шляхом введення відповідних поправок. Прикладом систематичних похибок може служити похибка градування приладу, тобто помилки в розміщенні розподілів, нанесених на шкалу приладу. Вплив зовнішніх факторів (наприклад, коливання температури, напруги живлення) на засоби вимірювання також викликає появу систематичних похибок.

*Випадковими* називаються похибки, що змінюються випадковим чином при повторних вимірах тієї ж величини. Випадкові похибки не можна виключити дослідним шляхом. Вони походять від впливу на результат вимірювання причин випадкового характеру, наприклад, похибка від тертя в опорах вимірювальних приладів.

Зменшення впливу випадкових похибок на результат вимірювання досягається шляхом багаторазових вимірювань величини в однакових умовах. Якщо припустити, що систематичні похибки близькі до нуля, то найбільш достовірне значення, яке можна приписати вимірюваній величині на підставі ряду вимірювань, є середнє арифметичне з отриманих значень, що визначається як

$$A_{cp} = (a_1 + a_2 + \dots + a_n) / n, \quad (1.3)$$

де  $a_1, a_2, \dots, a_n$  – це результати окремих вимірювань;  $n$  – число вимірювань.

Для оцінки точності результату вимірювань необхідно знати закон розподілу випадкових похибок.

У практиці електричних вимірювань одним з найпоширеніших законів розподілу випадкових похибок є нормальний закон (Гауса).

Математичне вираження нормального закону має вигляд:

$$\rho(\delta) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\delta^2 / 2\sigma^2}, \quad (1.4)$$

де  $\rho(\delta)$  – щільність ймовірності випадкової похибки  $\delta$ ;  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення.

Середнє квадратичне відхилення може бути виражене через випадкові відхилення результатів спостереження  $\rho$ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\rho_1^2 + \rho_2^2 + \dots + \rho_n^2}{n-1}}, \quad (1.5)$$

де  $\rho_1 = a_1 - A_{cp}$ ;  $\rho_2 = a_2 - A_{cp}$ ;  $\rho_n = a_n - A_{cp}$ .

Характер кривих, що описує рівняння (1.4) для двох значень  $\sigma$ , наданий на рис. 1.1. Із цих кривих видно, що чим менше  $\sigma$ , тим частіше зустрічаються малі випадкові похибки, тобто тим точніше виконані вимірювання.

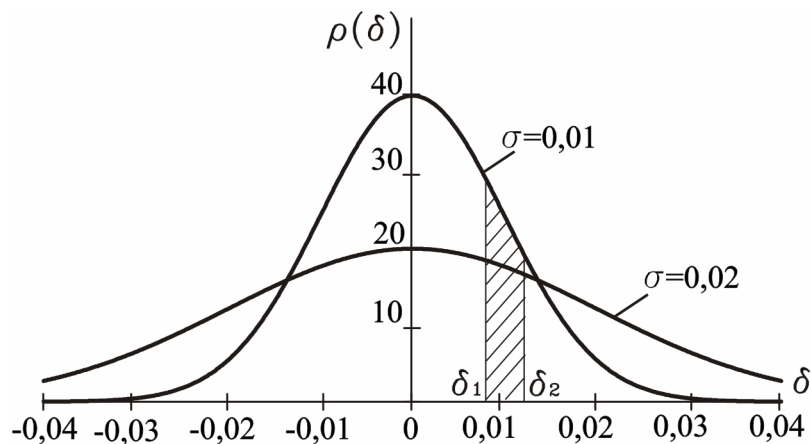


Рис. 1.1 – Нормальний закон розподілу випадкових похибок

Залежно від зміни в часі вимірюваної величини розрізняють наступні похибки засобів вимірювань:

*статичну похибку*, яка виникає при вимірюванні сталої в часі величини;

*динамічну похибку* – різницю між похибкою в динамічному режимі (тобто при зміні вимірюваної величини в часі) і статичною похибкою, що відповідає значенню вимірюваної величини в даний момент часу.

Залежно від умов виникнення похибок розрізняють:

*основну похибку* – похибку засобів вимірювань, що використовують у нормальних умовах, тобто при нормальному положенні, температурі навколишнього середовища  $20 \pm 5^\circ \text{C}$ , відсутності зовнішнього електричного і магнітного полів, крім земного, і т.п.;

*додаткову похибку* – похибку засобів вимірювань, що виникає в результаті відхилення значення однієї з впливаючих величин від нормального значення (іншими словами, це похибка, що виникає при відхиленні умов експлуатації від нормальних).

Кожна міра має номінальне значення, що майже завжди вказується спеціальним написом на самій мірі. При виготовленні міри практично неможливо забезпечити рівність номінального й істинного значень міри. Різниця між номінальним і істинним значеннями міри називається абсолютною *похибкою міри*.

За способами вираження *похибок вимірювальних приладів* розрізняють *абсолютну, відносну і приведену* похибки.

*Абсолютна похибка приладу*  $\Delta$  – це різниця між показником приладу  $x$  і дійсним значенням  $x_0$  вимірюваної величини, тобто

$$\Delta = x - x_0. \quad (1.6)$$

*Відносна похибка* приладу  $\delta$  являє собою відношення абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної величини. Відносна похибка звичайно виражається у відсотках і дорівнює:

$$\delta = \frac{x - x_0}{x_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta}{x_0} \cdot 100\%. \quad (1.7)$$

*Приведена похибка*  $\gamma$  виражена у відсотках відношення абсолютної похибки  $\Delta$  до значення величини, що нормується  $x_n$ :

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_n} \cdot 100\%. \quad (1.8)$$

У реальних приладів залежність абсолютної похибки від вимірюваної величини  $x$  може бути представлена деякою смугою невизначеності, обумовленою випадковою похибкою та зміною характеристик приладів у результаті дії впливаючих величин і внаслідок старіння (рис. 1.2). Тому значення абсолютної

похибки, як правило, обмежене двома прямими 1, симетричними щодо осі абсцис, відстань між якими збільшується із зростанням вимірюваної величини (рис. 1.2).

Граничні значення абсолютних похибок  $\Delta_{max}$  можуть бути як додатними, так і від'ємними, але однаковими за модулем. Їх залежність від вимірюваної величини  $x$  характеризується прямими 1. Рівняння прямої 1, що не проходить через початок координат, може бути виражене за допомогою двох постійних коефіцієнтів  $a$  й  $b$ . Таким чином,

$$|\Delta_{max}| = |a| + |b \cdot x|, \quad (1.9)$$

де  $a$  називають граничним значенням *адитивної похибки*,  $b \cdot x$  – граничним значенням *мультиплікативної похибки*.

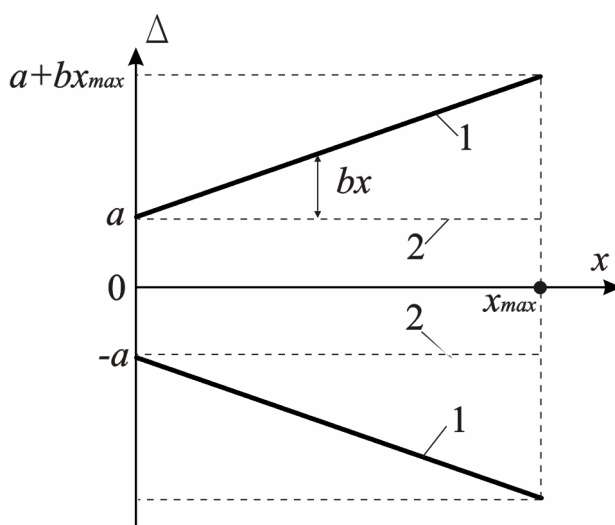


Рис. 1.2 – Залежність абсолютної похибки приладу від вимірюваної величини

Абсолютні адитивні похибки не залежать від вимірюваної величини  $x$ , а мультиплікативні – прямо пропорційні значенню  $x$ .

Джерела адитивної похибки – тертя в опорах, неточність відліку, шум, наводки й вібрації. Від цієї похибки залежить найменше значення величини, що може бути виміряне приладом. Причини мультиплікативної похибки – вплив зовнішніх факторів і старіння елементів і вузлів приладів.

*Клас точності* – це узагальнена характеристика приладу, обумовлена границями допустимих основних і додаткових похибок. Границя допустимих змін показань від впливу зовнішніх факторів для будь-якого приладу встановлюються залежно від класу його точності відповідно до стандартів на окремі види приладів. Клас точності може виражатися одним числом або дробом.

У приладів, адитивна похибка яких різко переважає над мультиплікативною, всі значення похибок опиняються в границях прямих 2, паралельних осі ОХ (рис. 1.2). У результаті допустимі абсолютна й приведена похибки приладу



виявляються постійними в будь-якій точці його шкали. У таких приладів клас точності виражається одним числом, обраним з ряду наступних чисел:  $1 \cdot 10^n$ ;  $1,5 \cdot 10^n$ ;  $2 \cdot 10^n$ ;  $2,5 \cdot 10^n$ ;  $4 \cdot 10^n$ ;  $5 \cdot 10^n$ ;  $6 \cdot 10^n$ , де  $n=1; 0; -1; -2$  і т.д.

У приладів, клас точності яких виражається одним числом, основна приведена похибка у робочому діапазоні шкали, виражена у відсотках, не перевищує значення, що відповідає класу точності. До таких приладів відносяться більшість стрілкових і самописних приладів.

Клас точності приладів, у яких адитивна та мультиплікативна складові основної похибки співрозмірні, позначається у вигляді двох чисел, розділених косою рисою, наприклад, клас точності 0,1/0,05. Граничне значення основної відносної похибки приладів, виражене у відсотках, у цьому випадку може бути визначене шляхом розрахунку за формулою:

$$|\delta_{\max}| = [c + d(|x_k / x|) - 1], \quad (1.10)$$

де  $x_k$  – кінцеве значення діапазону вимірювань;  $c$  і  $d$  – постійні числа, причому відношення  $c/d$  позначає клас точності приладу.

До приладів, клас точності яких виражається дробом, відносяться цифрові прилади, а також мости і компенсатори як з ручним, так і з автоматичним зрівноваженням.

Загальними характеристиками електровимірювальних приладів є їх *похибки, варіація показників, чутливість до вимірюваної величини, споживана потужність, час встановлення показників і надійність*.

*Варіація показників приладу* – це найбільша різниця показників приладу при тому самому значенні вимірюваної величини. Вона визначається при плавному підході стрілки до випробуваної позначки шкали при русі одного разу від початкової, а другого разу від кінцевої позначки шкали. Варіація показників характеризує ступінь стійкості показників приладу при тих самих умовах виміру тієї ж величини.

Вона приблизно дорівнює подвоєній похибці від тертя, тому що причиною варіації в основному є тертя в опорах рухливої частини.

*Чутливістю* електровимірювального приладу до вимірюваної величини  $x$  називається похідна від переміщення покажчика  $a$  по вимірюваній величині  $x$ :

$$S = \frac{da}{dx} = F(x). \quad (1.11)$$

Переміщення покажчика  $a$ , що виражається в поділках або міліметрах шкали, для великої групи приладів визначається, у першу чергу, кутом відхилення рухливої частини  $a$  вимірювального механізму. Крім того, воно залежить від типу відлікового пристрою і його характеристик (стрілковий або світловий

показчик, довжина шкали, число поділок шкали та ін.).

У приладів зі сталою чутливістю переміщення показчика пропорційне вимірюваній величині, тобто шкала приладу рівномірна.

Чутливість приладу має розмірність, що залежить від характеру вимірюваної величини, тому, коли користуються терміном «чутливість», говорять «чутливість приладу до струму», «чутливість приладу до напруги» і т.д. Наприклад, чутливість вольтметра до напруги дорівнює 10 под/В.

Величина, зворотня чутливості,  $C=1/S$  називається *ціною поділки* (сталою) приладу. Вона дорівнює числу одиниць вимірюваної величини, що припадають на одну поділку шкали. Наприклад, якщо  $S=10$  под/В, то  $C=0,1$  В/под.

### ЗАДАЧА 1

#### Розрахунок похибок електровимірювального приладу і варіації показів

При переміщенні стрілкового вказівника вольтметра, що повіряється, від початку шкали до позначки 40 В зразковий вольтметр показав 40,1 В, а при переміщенні від кінцевої позначки шкали – 40,2 В. Розрахувати відносну похибку, зведену похибку і варіацію показань приладу, якщо він розрахований на номінальну напругу  $U_H=100$  В.

#### Вирішення

1. Спочатку розрахуємо абсолютні похибки при переміщенні стрілки вольтметра від початку та від кінця шкали, як різницю між відповідними показами приладу й дійсним значенням вимірюваної величини:

$$\Delta U \uparrow = U \uparrow - U = 40,1 - 40 = 0,1 \text{ В};$$

$$\Delta U \downarrow = U \downarrow - U = 40,2 - 40 = 0,2 \text{ В}.$$

2. Розрахуємо середню поправку:

$$\beta_{cp} = -\frac{\Delta U \uparrow + \Delta U \downarrow}{2} = -\frac{0,1 + 0,2}{2} = -0,15 \text{ В}.$$

3. Визначимо відносну похибку вольтметра, що повіряється:

$$\delta_U = \frac{|\beta_{cp}|}{U} \cdot 100\% = \frac{0,15}{40} \cdot 100\% = 0,375 \%.$$

4. Знайдемо зведену похибку вольтметра:

$$\gamma_U = \frac{|\beta_{cp}|}{U_H} \cdot 100\% = \frac{0,15}{100} \cdot 100\% = 0,15 \%.$$

5. Розрахуємо варіацію показань приладу:

$$B_U = \frac{|U \uparrow - U \downarrow|}{U_H} \cdot 100\% = \frac{|40,1 - 40,2|}{40} \cdot 100\% = 0,25 \%.$$

## ЗАДАЧА 2

### Розрахунок похибок магнітоелектричного приладу

Результат вимірювань постійного струму магнітоелектричним амперметром  $I_X = 0,19$  А. Зразкова напруга на опорі  $R = 100$  Ом, через який протікає струм  $U = 20$  В. Амперметр розрахований на струм  $I_H = 1$  А. Визначити відносну й зведену похибки приладу.

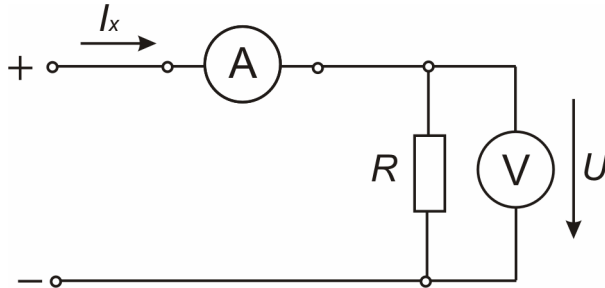


Рис. 1.3

### Вирішення

1. За законом Ома знайдемо дійсне значення вимірюваного струму:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{20}{100} = 0,2 \text{ А.}$$

2. Розрахуємо абсолютну похибку:

$$\Delta I = I_X - I = 0,19 - 0,2 = -0,01 \text{ А.}$$

3. Визначимо відносну похибку амперметра:

$$\delta_I = \frac{|\Delta I|}{I} \cdot 100\% = \frac{0,01}{0,2} \cdot 100\% = 5\%.$$

4. Знайдемо зведену похибку амперметра:

$$\gamma_I = \frac{|\Delta I|}{I_H} \cdot 100\% = \frac{0,01}{1} \cdot 100\% = 1\%.$$

## ЗАДАЧА 3

### Порівняння електровимірювальних приладів за точністю

Два амперметри включені послідовно до джерела постійного струму. Першим амперметром з  $I_{H1} = 1$  А і класом точності  $\gamma_{I1} = 1,0$  виміряли два значення струму  $I_{X1} = 0,2$  і  $I_{X2} = 0,8$  А. Визначити який з двох вимірів є точнішим.

Другим амперметром з  $I_{H2} = 5$  А виміряли ті ж самі струми і отримали відносні похибки вимірів  $\delta_{I21} = 12,5\%$  і  $\delta_{I22} = 3,125\%$ , відповідно.

Який з двох амперметрів більш точніший (має більш високий клас точності)?

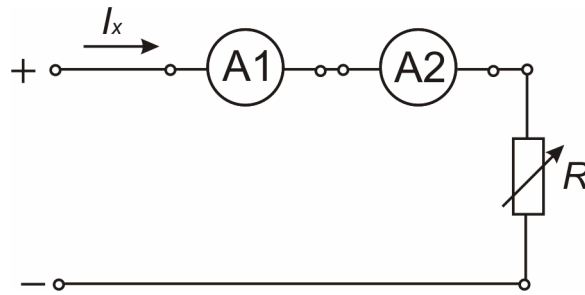


Рис. 1.4

### Вирішення

1. Визначимо відносну похибку першого і другого вимірів струму першим амперметром:

$$\delta_{I11} = \frac{I_{H1}}{I_{X1}} \cdot \gamma_{A1} = \frac{1}{0,2} \cdot 1 = 5\%;$$

$$\delta_{I12} = \frac{I_{H1}}{I_{X2}} \cdot \gamma_{A1} = \frac{1}{0,8} \cdot 1 = 1,25\%.$$

З отриманих результатів можна зробити висновок, що другий вимір першого амперметра є більш точним.

2. Розрахуємо зведену похибку другого амперметра:

$$\gamma_{I2} = \frac{I_{X1}}{I_{H2}} \cdot \delta_{I21} = \frac{I_{X2}}{I_{H2}} \cdot \delta_{I22} = \frac{0,2}{5} \cdot 12,5 = 0,5\%.$$

$$\gamma_{I1} < \gamma_{I2}.$$

Таким чином, другий амперметр має більш високий клас точності.

## ЗАДАЧА 4

### Обробка результатів вимірювань

У результаті багаторазових вимірів опору резистора отримані такі його значення, що наведені в табл.1.

Таблиця 1 – Результати вимірювань резистора

№ досліду	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R, Ом	20,50	20,38	20,40	20,38	20,61	20,45	20,40	20,60	20,30	20,55

Визначте ймовірну похибку вимірювання опору.

### Вирішення

1.  $R = \bar{R} \pm \Delta R$  - результат виміру.

2. Середнє арифметичне результатів  $\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^n R}{n} = 20,457 \approx 20,46$  Ом.

3. Обчислюємо середнє квадратичне відхилення результатів окремих ви-

$$\text{мірів: } \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2},$$

де  $n=10$  – число вимірів;

$R_i$  – окремий вимір.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{10-1} \cdot [(20,5-20,46)^2 + (20,38-20,46)^2 + \dots + (20,55-20,46)^2]} = \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,0975} = 0,104.$$

4. Визначаємо середнє квадратичне відхилення результатів вимірів:

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0,104}{\sqrt{10}} = 0,01041.$$

5. Визначаємо довірчий симетричний інтервал, в який із заданою ймовірністю  $P$  попадає дійсне значення вимірюваної величини за формулою:

$$\Delta X = \pm t_{p,n-1} \cdot \sigma_{\bar{X}},$$

де  $t_{p,n-1}$  – коефіцієнт Стюдента, який знаходять з відповідних таблиць залежно від довірчої ймовірності  $P$  і числа ступенів свободи ( $n-1=10-1=9$ ). Зазвичай приймають  $P=0,95$ , а якщо вимірювання не можна повторити –  $P=0,99$ . Знаходимо з табл. 1 –  $t_{p,n-1} = 2,26$ .

$$\Delta R = \pm 2,26 \cdot 0,01041 = 0,0235 \text{ Ом.}$$

6. Таким чином,  $R = 20,46 \pm 0,01041$  Ом.

Таблиця 2 – для визначення коефіцієнта Стюдента

<b>n – 1</b>	<b>p=0,95</b>	<b>p=0,99</b>	<b>n – 1</b>	<b>p=0,95</b>	<b>p=0,99</b>
<b>3</b>	3,18	5,84	<b>10</b>	2,23	3,17
<b>4</b>	2,78	4,60	<b>11</b>	2,20	3,11
<b>5</b>	2,57	4,03	<b>12</b>	2,18	3,05
<b>6</b>	2,45	3,71	<b>13</b>	2,16	3,01
<b>7</b>	2,36	3,50	<b>14</b>	2,14	2,98
<b>8</b>	2,306	3,25	<b>15</b>	2,13	2,95
<b>9</b>	2,26	3,25	<b>16</b>	2,12	2,92
<b>17</b>	2,11	2,90	<b>20</b>	2,08	2,84

## ЗАДАЧА 5

### Визначення похибки вимірювань потужності

Визначити найбільшу можливу відносну похибку трьох вимірювань потужності ватметром з границею вимірювань 750 Вт, класу точності 0,5 і шкалою на 150 поділок. Якщо покази ватметра дорівнюють:  $n_1 = 60$ ,  $n_2 = 62$ ,  $n_3 = 58$  поділок. Яке з трьох вимірювань є найбільш точним?

#### Вирішення

1.  $C = \frac{P_H}{N} = \frac{750}{150} = 5$  Вт/под. – ціна поділки.

2. Покази ватметрів

$$P_1 = n_1 \cdot C = 60 \cdot 5 = 300 \text{ В},$$

$$P_2 = n_2 \cdot C = 62 \cdot 5 = 310 \text{ В},$$

$$P_3 = n_3 \cdot C = 58 \cdot 5 = 290 \text{ В}.$$

3. Відносні похибки трьох вимірювань –  $\delta_P = \pm \gamma_W \cdot \frac{P_H}{P}$ .

$$\delta_{P_1} = \gamma_W \cdot \frac{P_H}{P_1} = 0,5 \cdot \frac{750}{300} = 1,25 \text{ \%},$$

$$\delta_{P_2} = \gamma_W \cdot \frac{P_H}{P_2} = 0,5 \cdot \frac{750}{310} = 1,209 \text{ \%},$$

$$\delta_{P_3} = \gamma_W \cdot \frac{P_H}{P_3} = 0,5 \cdot \frac{750}{290} = 1,293 \text{ \%}.$$

4. Найбільша відносна похибка у третьому вимірюванні –  $\delta_{P_3} = 1,293 \text{ \%}$ .

Найбільш точними є друге вимірювання –  $\delta_{P_2} = 1,209 \text{ \%}$ .

#### 1.2 Шунти і додаткові опори

*Шунт* є найпростішим вимірювальним перетворювачем струму в напругу. Він являє собою резистор, що має чотири затискачі. Два вхідних затискачі, до яких підводять струм  $I$ , називаються *струмовими* (затискачі  $A, B$  на рис. 1.5), а два вихідних затискачі, з яких знімається напруга  $U$ , називаються *потенційними* (затискачі  $B, \Gamma$  на рис. 1.5). До потенційних затискачів приєднують вимірювальний механізм (ВМ) приладу.

Шунт характеризується номінальним значенням вхідного струму  $I_{ном}$  і

номінальним значенням вихідної напруги  $U_{ном}$ . Їх відношення визначає номінальний опір шунта  $R_{ш} = U_{ном} / I_{ном}$ .

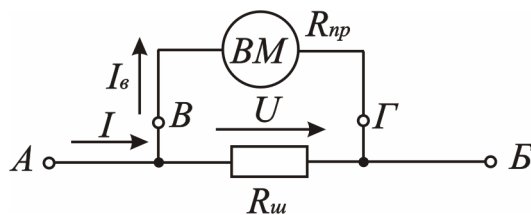


Рис. 1.5 – Схема з'єднання вимірювального механізму із шунтом

Шунти застосовуються для розширення границь вимірювань механізмів приладів за струмом, при цьому більшу частину вимірюваного струму пропускають через шунт, а меншу – через вимірювальний механізм. Шунти мають невеликий опір і застосовуються, головним чином, у колах постійного струму з магнітоелектричними вимірювальними механізмами.

На рис. 1.5 наведена схема включення магнітоелектричного механізму ВМ із шунтом. Струм  $I_\epsilon$ , що протікає через вимірювальний механізм, пов'язаний з вимірюваним струмом  $I$  залежністю:

$$I_\epsilon = \frac{I \cdot R_{ш}}{R_{ш} + R_{пр}}, \quad (1.12)$$

де  $R_{пр}$  – опір вимірювального механізму.

Якщо необхідно, щоб струм  $I_\epsilon$  був в  $p$  разів меншим за струм  $I$ , то опір шунта повинен бути:

$$R_{ш} = \frac{R_{пр}}{p - 1}, \quad (1.13)$$

де  $\rho = \frac{I}{I_\epsilon}$  – коефіцієнт шунтування.

Шунти виготовляють із манганіну. Якщо шунт розрахований на невеликий струм (до 30 А), то його, звичайно, вбудовують у корпус приладу (внутрішні шунти). Для виміру більших струмів використовують прилади із зовнішніми шунтами. У цьому випадку потужність, що розсіюється в шунті, не нагріває прилад.

На рис. 1.6 показаний зовнішній шунт на 2000 А. Він має масивні наконечники з міді, які служать для відводу тепла від манганінових пластин, що впаяні між ними. Затискачі шунта  $A$  і  $B$  — струмові,  $B$  і  $\Gamma$  – потенційні.

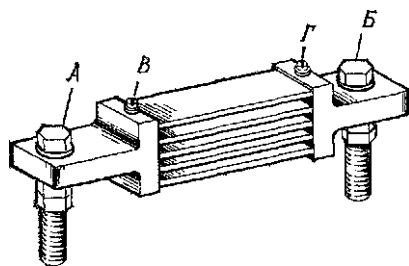


Рис. 1.6 – Зовнішній шунт

Вимірювальний механізм приєднують до потенційних затискачів  $B$  і  $Г$ , між якими зосереджений опір шунта. При такому включенні вимірювального механізму усуваються похибки від контактних опорів.

Зовнішні шунти зазвичай виготовляються каліброваними, тобто розраховуються на певні струми та падіння напруги. За ГОСТ 8042-78 калібровані шунти повинні мати номінальне падіння напруги 10, 15, 30, 50, 60, 75, 100, 150 і 300 мВ.

Для переносних магнітоелектричних приладів на струми до 30 А внутрішні шунти виготовляють на кілька границь виміру. На рис. 1.7 показані схеми багатограничних шунтів. Багатограничний шунт складається з декількох резисторів, які можна переключати залежно від границі вимірювання важільним перемикачем (рис. 1.7,а) або шляхом переносу дроту з одного затискача на інший (рис. 1.7,б).

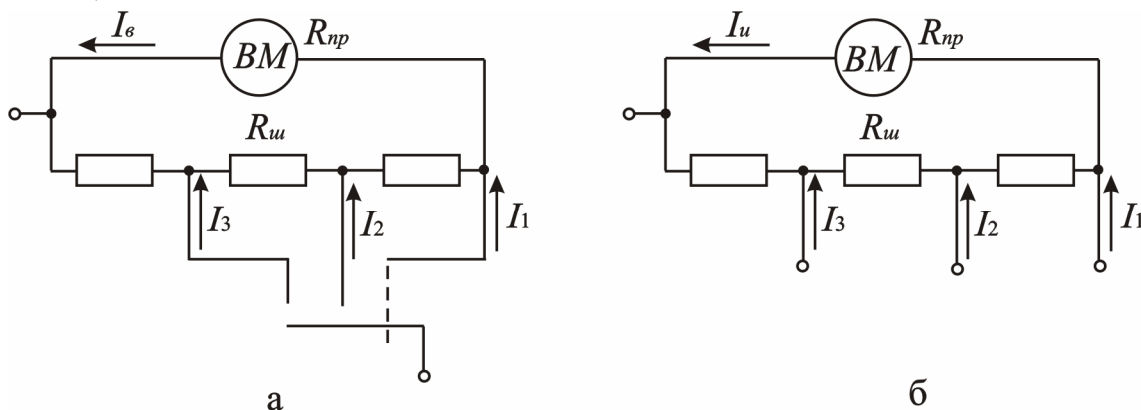


Рис. 1.7 – Схеми багатограничних шунтів

$a$  – шунт з важільним перемикачем;  $б$  – шунт з окремими виводами

Застосування шунтів з вимірювальними механізмами інших систем, крім магнітоелектричної, нераціональне, тому що інші вимірювальні механізми споживають більшу потужність, що призводить до істотного збільшення опору шунтів і, отже, до збільшення їхніх розмірів і споживаної потужності.

Під час роботи шунтів з вимірювальними механізмами на змінному струмі виникає додаткова похибка від зміни частоти, тому що опори шунта та вимірювального механізму по-різному залежать від частоти.



Шунти поділяються на класи точності 0,02; 0,05; 0,1; 0,2 і 0,5. Число, що показує клас точності, позначає допустиме відхилення опору шунта у відсотках його номінального значення.

Серійні шунти випускаються для струмів не більше 5000 А. Для вимірювання струмів понад 5000 А допускається паралельне з'єднання шунтів.

*Додаткові резистори* – це вимірювальні перетворювачі напруги в струм, а на значення струму безпосередньо реагують вимірювальні механізми стрілкових вольтметрів усіх систем, за винятком електростатичної та електронної. Додаткові резистори служать для розширення границь вимірювань за напругою вольтметрів різних систем та інших приладів, що мають паралельні кола, що підключаються до джерела напруги. Сюди відносяться, наприклад, ватметри, лічильники енергії, фазометри і т.д.

Додатковий резистор включають послідовно з вимірювальним механізмом (рис. 1.8). Струм  $I_\epsilon$  в колі, що складається з вимірювального механізму з опором  $R_{np}$  і додаткового резистора з опором  $R_\delta$ , складатиме:

$$I_\epsilon = \frac{U}{R_{np} + R_\delta}, \quad (1.14)$$

де  $U$  — вимірювана напруга.

Якщо вольтметр має границю виміру  $U_H$ , а опір вимірювального механізму  $R_{np}$ , то за допомогою додаткового резистора  $R_\delta$  треба розширити границю виміру в  $p$  разів, і з огляду на сталість струму  $I_\epsilon$ , що протікає через вимірювальний механізм вольтметра, можна записати:

$$\frac{U_H}{R_{np}} = \frac{p \cdot U_H}{R_{np} + R_\delta}, \quad (1.15)$$

звідси

$$R_\delta = R_{np} \cdot (p - 1). \quad (1.16)$$

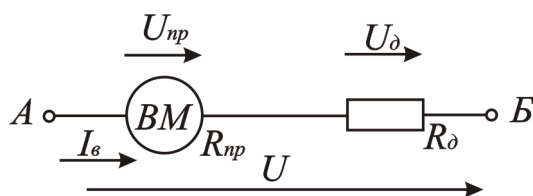


Рис. 1.8 – Схема включення вимірювального механізму з додатковим резистором

Додаткові резистори виготовляються зазвичай з ізольованого манганінового дроту, що намотується на пластини або каркаси з ізоляційного матеріалу. Вони застосовуються в колах постійного й змінного струму. Додаткові резисто-

ри, призначені для роботи на змінному струмі, мають біфілярну обмотку для одержання безреактивного опору.

При застосуванні додаткових резисторів не тільки розширюються границі вимірювань вольтметрів, але й зменшується їх температурна похибка. Якщо прийняти, що обмотка вимірювального механізму має температурний коефіцієнт опору  $\beta_{\epsilon}$ , а додатковий резистор – температурний коефіцієнт опору  $\beta_{\delta}$ , то температурний коефіцієнт усього вольтметра  $\beta$  дорівнює:

$$\beta = \frac{\beta_{\epsilon} \cdot R_{np} + \beta_{\delta} \cdot R_{\delta}}{R_{np} + R_{\delta}}. \quad (1.17)$$

Звичайно,  $\beta_{\delta} = 0$ , тоді

$$\beta = \beta_{\epsilon} \cdot \frac{R_{np}}{R_{np} + R_{\delta}}. \quad (1.18)$$

У переносних приладах додаткові резистори виготовляються секційними на кілька границь вимірювання (рис. 1.9).

Додаткові резистори бувають внутрішні та зовнішні. Останні виконуються у вигляді окремих блоків і поділяються на індивідуальні й калібровані. Індивідуальний резистор застосовується тільки з тим приладом, що з ним градуювався. Калібрований резистор може застосовуватися з будь-яким приладом, номінальний струм якого дорівнює номінальному струму додаткового резистора.

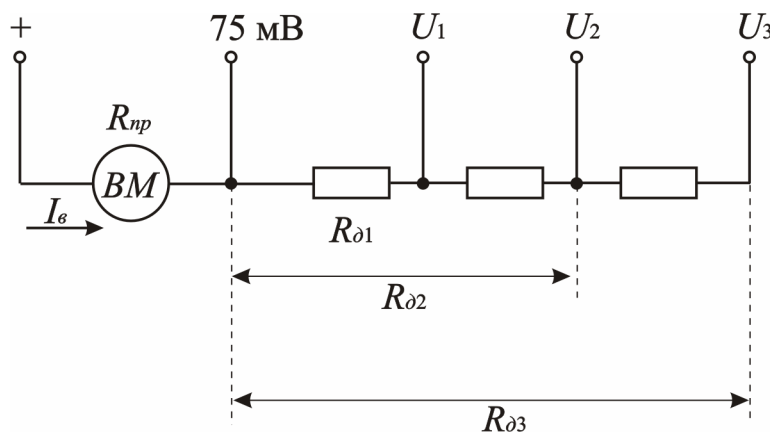


Рис. 1.9 – Схема багатограничного вольтметра

Калібровані додаткові резистори поділяються на класи точності 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 і 1,0. Вони виконуються на номінальні струми від 0,5 до 30 мА.

Додаткові резистори застосовуються для перетворення напруг до 30 кВ.

## ЗАДАЧА 1

### Розрахунок опору шунта

Амперметр зі шкалою на 5 А і вхідним опором  $R_A = 0,6$  Ом зашунтований для вимірювання струму  $I_{2H} = 90$  А. Визначити опір шунта і сталу вимірювань зашунтованого амперметра, якщо його шкала розрахована на 100 поділок.

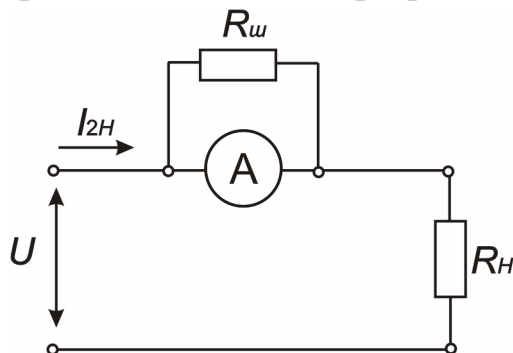


Рис. 1.10

### Вирішення

1. Розраховуємо коефіцієнт шунтування:  $p = \frac{I_{2H}}{I_{1H}} = \frac{90}{5} = 18$ .
2. Визначаємо опір шунта за формулою:  $R_{ш} = \frac{R_A}{p - 1} = \frac{0,6}{18 - 1} = 0,0353$  Ом.
3. Визначаємо нову ціну поділки амперметра:  $C_{I2} = \frac{I_{2H}}{N} = \frac{90}{100} = 0,9$  А/□од..

## ЗАДАЧА 2

### Визначення чутливості зашунтованого приладу

До магнітоелектричного міліамперметра на 75 мВ з внутрішнім опором 10 Ом підключений шунт, опір якого дорівнює 0,53 Ом. Як зміниться чутливість приладу за струмом? Наведіть схему.

$$R_{BM} = 10 \text{ Ом},$$

$$U_{BM} = 75 \cdot 10^{-3} \text{ В},$$

$$R_{ш} = 0,53 \text{ Ом}.$$

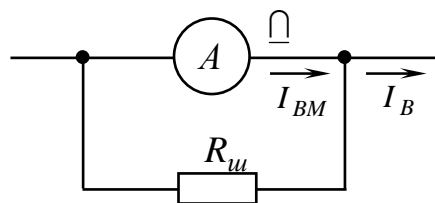


Рис. 1.11

### Вирішення

1. Струм приладу без шунта:  $I_{BM} = \frac{U_{BM}}{R_{BM}} = \frac{75 \cdot 10^{-3}}{10} = 0,0075 = 7,5$  мА.

2. Шунтуючий множник (коефіцієнт шунтування):

$$p = \frac{R_{IM}}{R_{III}} + 1 = \frac{10}{0,53} + 1 = 19,86.$$

3.  $I_B = p \cdot I_{BM}$  - струм вимірювання приладу з шунтом.

$$I_B = 19,86 \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} = 0,15 \text{ А.}$$

4. Чутливість приладу за струмом до і після введення шунта ( $N$  – кількість поділок,  $C$  – ціна поділки):

$$S_1 = \frac{1}{C_1} = \frac{1}{I_{BM}/N} = \frac{N}{0,0075} \frac{\text{под}}{\text{мА}}, S_2 = \frac{1}{C_2} = \frac{1}{I_B/N} = \frac{N}{0,15} \frac{\text{под}}{\text{мА}}.$$

5. Таким чином, чутливість зменшиться у двадцять разів після введення шунта, тобто  $\frac{S_1}{S_2} = \frac{0,15}{0,0075} = 20$ .

### ЗАДАЧА 3

Визначення постійної зашунтованого магнітоелектричного приладу

Магнітоелектричний вимірювач з опором 0,3 Ом має шкалу на 100 поділок і чутливість за струмом 0,05  $\frac{\text{под}}{\text{мА}}$ . Визначте постійну цього приладу й нову

границю вимірювань при підключенні шунта з опором 0,015 Ом. Наведіть схему.

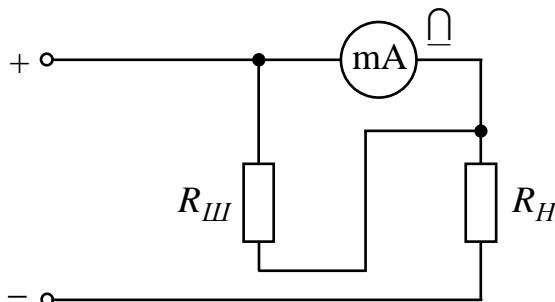


Рис.1.12

$$R_{np} = 0,3 \text{ Ом,}$$

$$R_{III} = 0,015 \text{ Ом,}$$

$$N = 100 \text{ под.,}$$

$$S = 0,05 \text{ под./мА.}$$

$$C_1, C_2, I_{H_2} - ?$$

Вирішення

$$1. \text{ Постійна приладу: } C_1 = \frac{1}{S} = \frac{1}{0,05} = 20 \text{ под./мА.}$$

2. Коефіцієнт шунтування:  $R_{III} = \frac{R_{np}}{P-1}$  – опір шунта,

$$p = \frac{R_{np}}{R_{III}} + 1 = \frac{0,3}{0,015} + 1 = 21 - \text{коефіцієнт шунтування.}$$

3. Нова границя вимірювань:

$$I_{H_2} = I_{H_1} \cdot p = N \cdot C_1 \cdot p = 100 \cdot 20 \cdot 21 = 42000 \text{ мА} = 42 \text{ А.}$$

4. Нова постійна приладу (ціна поділки):  $C_2 = \frac{I_{H_2}}{N} = \frac{42}{100} = 0,42 \text{ А/под.}$

### ЗАДАЧА 4

#### Розрахунок додаткового опору для мілівольтметра

Мілівольтметр зі шкалою на 100 поділок має чутливість за струмом  $S_I = 10$  под/мА і опір  $R_V = 10$  Ом. Визначити додатковий опір для вимірювання цим приладом напруги  $U_{2H} = 5$  В.

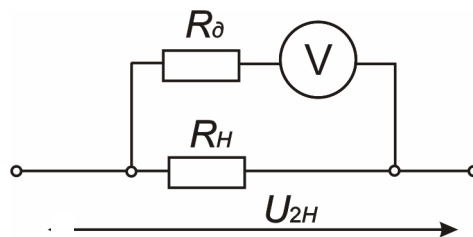


Рис. 1.13

#### Вирішення

1. Визначаємо чутливість мілівольтметра за напругою:

$$S_U = S_I \cdot R_V = 10 \cdot 10 = 100 \text{ под/мВ.}$$

2. Визначаємо границю виміру мілівольтметра:  $U_{1H} = \frac{N}{S_U} = \frac{100}{100} = 1 \text{ мВ.}$

3. Визначаємо коефіцієнт  $p$ :  $p = \frac{U_{2H}}{U_{1H}} = \frac{5}{1 \cdot 10^{-3}} = 5000.$

4. Розраховуємо додатковий опір:

$$R_d = R_V \cdot (p - 1) = 10 \cdot (5000 - 1) = 49990 \text{ Ом.}$$

## ЗАДАЧА 5

### Розширення границь вимірювання міліамперметра

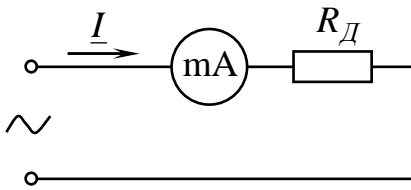


Рис. 1.14

Міліамперметр на 200 мА має опір 3 Ом, чутливість за струмом  $0,5 \text{ под./мА}$ . Визначте число поділок усієї шкали і струм в колі, якщо стрілка приладу відхилилась на 25 поділок. Як зробити границю виміру цього приладу рівною 30 В? Наведіть схему.

$$I_H = 200 \text{ мА}, \quad U_{2H} = 30 \text{ В},$$

$$R_{np} = 3 \text{ Ом}, \quad n = 25 \text{ под.},$$

$$S_I = 0,5 \text{ под./мА}.$$

$$N, I, R_D - ?$$

#### Вирішення

1. Кількість поділок всій шкали:  $N = S_I \cdot I_H = 0,5 \cdot 200 = 100 \text{ под.}$
2. Струм в колі:  $I = \frac{n}{S_I} = \frac{25}{0,5} = 50 \text{ мА}.$
3. Номінальна напруга приладу:  $U_H = I_H \cdot R_{np} = 200 \cdot 3 = 600 \text{ мВ} = 0,6 \text{ В}.$
4. Коефіцієнт кратності збільшення напруг:  $p = \frac{U_{2H}}{U_H} = \frac{30}{0,6} = 50.$
5. Додатковий опір:  $R_D = R_{np} \cdot (p - 1) = 3 \cdot (50 - 1) = 147 \text{ Ом}.$

## ЗАДАЧА 6

### Розширення границь вимірювання електростатичного вольтметра

Вольтметр електростатичної системи на 150 В має ємність 100 пФ. Розрахуйте ємність додаткового конденсатора для розширення границі виміру до 2 кВ. Наведіть схему.

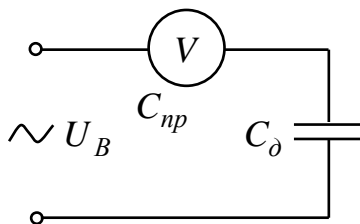


Рис. 1.15

$$U_H = 150 \text{ В},$$

$$C_{np} = 100 \text{ пФ},$$

$$U_B = 2 \text{ кВ} = 2000 \text{ В}.$$

$$C_d - ?$$

## Вирішення

1. Знайдемо коефіцієнт, що показує у скільки разів розширюються границі вимірювань вольтметра:  $p = \frac{U_B}{U_H} = \frac{2000}{150} = 13,33$ .

2. Необхідний додатковий ємнісний опір:  $X_\partial = X_{np} \cdot (p - 1)$ ,

$$\text{де } X_\partial = \frac{1}{\omega \cdot C_\partial} ; \quad X_{np} = \frac{1}{\omega \cdot C_{np}}.$$

3. Звідси  $C_\partial = \frac{C_{np}}{p - 1} = \frac{100}{13,33 - 1} = 7,5$  пФ.

### 1.3 Вимірювальні трансформатори

Вимірювальні трансформатори поділяються на трансформатори струму та напруги, призначаються відповідно для перетворення великих змінних струмів і напруг у відносно малі струми й напруги. Завдяки трансформаторам можна застосовувати прилади з невеликими стандартними номінальними значеннями струму й напруги (наприклад, 5 А і 100 В) у високовольтних колах, якими можуть протікати великі струми.

Вимірювальні трансформатори складаються із двох ізольованих одна від одної обмоток, розміщених на магнітопроводі: первинної із числом витків  $w_1$  і вторинної із числом витків  $w_2$  (рис. 1.16).

При вимірах у високовольтних колах трансформатори забезпечують безпеку обслуговування приладів, приєднаних до вторинних обмоток. Це досягається за рахунок електричної ізоляції (гальванічного розділення) первинної й вторинної обмоток трансформаторів і заземлення металевого корпусу та вторинної обмотки. При відсутності заземлення й ушкодженні ізоляції між обмотками вторинна обмотка й підключені до неї прилади опиняться під високим потенціалом, що неприпустимо.

У трансформаторах струму, як правило, первинний струм  $I_1$  більше вторинного  $I_2$ . Первинна обмотка виконується із дроту різного перерізу залежно від номінального первинного струму  $I_{1H}$ . Якщо  $I_{1H}$  перевищує 500 А, вона може складатися з одного витка у вигляді прямої мідної шини (або стрижня), що проходить крізь вікно осердя. Вторинна обмотка у всіх стандартних трансформаторах струму намотується із проводів невеликого перерізу. Відповідно до ГОСТ 7746-78Е вторинний номінальний струм  $I_{2H}$  може бути 1; 2; 2,5; 5 А при значеннях  $I_{1H}$  у границях від 0,8 до 40 000 А.

У трансформаторах напруги первинна напруга  $U_1$  більша вторинної  $U_2$ , тому в них  $w_1 > w_2$ . Обидві обмотки виконуються з відносно тонкого дроту (первинна – з більш тонкого, ніж вторинна). Вторинна номінальна напруга  $U_{2H}$ , в стаціонарних трансформаторах становить 100 і  $100/\sqrt{3}$  В при первинній номінальній напрузі  $U_{1H}$  до 1150 кВ.

За схемою включення у вимірювальне коло й умовою роботи трансформатори струму й напруги відрізняються один від одного. Первинна обмотка трансформаторів струму, виводи якої позначаються буквами  $L_1$  і  $L_2$  (лінія), вмикається у вимірювальне коло послідовно (рис. 1.16). До вторинної обмотки, виводи якої позначаються буквами  $B_1, B_2$  (вимірювання), послідовно підключають амперметри, послідовні обмотки ватметрів, лічильників та інших приладів. Первинна обмотка трансформатора напруги, виводи якої позначаються буквами  $A, X$  (початок – кінець), включається у вимірювальне коло паралельно, а до виводів вторинної обмотки, позначеної відповідно буквами  $a, x$ , підключають паралельно вольтметри, паралельні кола ватметрів, лічильників та інших приладів.

За показами приладів, включених у вторинні обмотки, можна знайти значення вимірюваних величин. Для цього їх покази треба помножити на дійсні коефіцієнти трансформації  $K_I$  і  $K_U$ . Для трансформатора струму  $K_I = I_1/I_2$ . Для трансформатора напруги  $K_U = U_1/U_2$ .

Дійсні коефіцієнти трансформації зазвичай невідомі, тому що вони залежать від режиму роботи трансформатора, тобто від значень струмів і напруг, характеру і значення опору навантаження вторинного кола та частоти струму; тому показники приладу множать не на дійсні, а на номінальні коефіцієнти трансформації. Вони зазначені на щитку трансформатора у вигляді дробу, чисельник якого є номінальним значенням первинної, а знаменник – вторинної величини. Номінальний коефіцієнт трансформації для даного трансформатора має постійне значення. Для трансформаторів струму позначимо його  $K_{IH}$ , для трансформаторів напруги –  $K_{UH}$ .

Відносна похибка через нерівність дійсного й номінального коефіцієнтів трансформації визначається за співвідношенням:

для трансформатора струму

$$\delta_I = \frac{I'_1 - I_1}{I_1} \cdot 100\% = \frac{K_{IH} - K_I}{K_I} \cdot 100\%, \quad (1.19)$$

де  $I'_1 = K_{IH} \cdot I_2$ ,  $I_1 = K_I \cdot I_2$ ;



для трансформатора напруги

$$\delta_U = \frac{U_1' - U_1}{U_1} \cdot 100\% = \frac{K_{UH} - K_U}{K_U} \cdot 100\%, \quad (1.20)$$

де  $U_1' = K_{UH} \cdot U_2$ ,  $U_1 = K_U \cdot U_2$ .

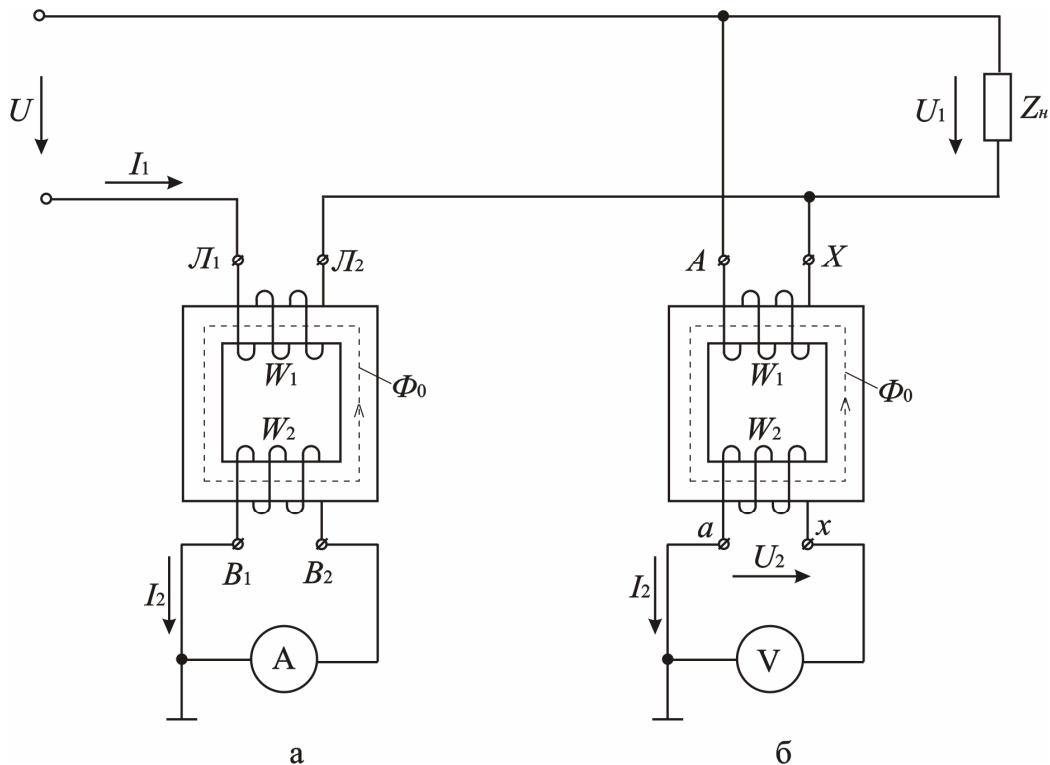


Рис. 1.16 – Схеми включення вимірювальних трансформаторів  
а – трансформатора струму; б – трансформатора напруги

Похибка  $\delta_I$  називається струмовою похибкою, а  $\delta_U$  – похибкою напруги. Крім цих похибок, у вимірювальних трансформаторів є ще так звана кутова похибка. Вона виникає внаслідок фазових зсувів між первинною й вторинною величиною, що їх вносить трансформатор.

В ідеальному трансформаторі струму вектор вторинного струму  $I_2$  зсунутий за фазою щодо вектора первинного струму  $I_1$  на  $180^\circ$ . Такий самий зсув за фазою повинен бути між векторами вторинної  $U_2$  й первинної  $U_1$  напруг у трансформаторі напруги. У реальному трансформаторі кут між оберненим на  $180^\circ$  вектором вторинної величини та відповідним вектором первинної величини не дорівнює нулю, а становить кут  $\delta$ , що називається кутовою похибкою трансформатора. Похибка вважається додатною, якщо обернений на  $180^\circ$  вектор вторинної величини випереджає вектор первинної величини.

Кутова похибка вимірювальних трансформаторів впливає тільки на показники приладів, відхилення рухомої частини яких залежить від зсуву фаз між

струмами в колах цих приладів. До них належать ватметри, лічильники енергії та фазометри.

*Трансформатор струму* працює в режимі, близькому до короткого замикання, тому що в його вторинну обмотку включаються прилади з малим опором. Повний сумарний опір  $\underline{Z} = R + j \cdot X$  приладів і дротів, що підводять струм, є навантаженням трансформатора струму. Магнітопроводи трансформаторів струму виготовляють з тонкої листової високосортної трансформаторної сталі, а для особливо точних трансформаторів – на залізонікелях типу пермалоя. Для зменшення втрат на вихрові струми листи ізолюються один від одного. Найчастіше застосовуються магнітопроводи стрижневого та круглого (кільцевого) типів.

Для зменшення (компенсації) похибок у трансформаторах струму використовують штучне підмагнічування магнітопроводу додатковими полями до значення, при якому матеріал магнітопроводу має найбільшу магнітну проникність. Це призводить до відносного зменшення намагнічуючого струму  $I_0$ .

Практично компенсація підмагнічуванням здійснюється вторинним струмом при проходженні його по додаткових обмотках або підмагнічуванням за рахунок потоків розсіювання. Такі трансформатори називаються *компенсованими*.

В установках з великими струмами короткого замикання при недостатньо надійній конструкції трансформатора можливі його механічні й термічні ушкодження. Механічні ушкодження відбуваються внаслідок електродинамічної взаємодії провідників зі струмами.

*Електродинамічною стійкістю* трансформатора струму називають відношення амплітуди струму, що він може витримати без зміни своїх механічних і електричних властивостей протягом одного напівперіоду, до амплітуди номінального струму трансформатора.

*Термічною стійкістю* трансформатора струму називається відношення діючого (середньоквадратичного) значення струму, що трансформатор може витримувати протягом однієї секунди без зміни своїх властивостей, до діючого значення номінального первинного струму трансформатора.

В установках з великими струмами короткого замикання застосовуються трансформатори струму з високою термічною й електродинамічною стійкістю.

Залежно від області застосування вимірювальні трансформатори виготовляються стаціонарними, призначеними для установки на відкритих майданчиках розподільчих пристроїв, станцій і підстанцій та в закритих приміщеннях, і переносними – для використання в лабораторіях. Стаціонарні трансформатори, як правило, мають одну границю вимірювання, а переносні – кілька границь. Наприклад, переносний трансформатор струму типу І-54 класу точності 0,2 має

номінальні первинні струми 0,5; 1,0; 2,0; 5,0; 10,0; 20,0 і 50,0 А, вторинний струм дорівнює 5А і номінальне навантаження 0,4 Ом.

За точністю трансформатори струму поділяються на десять класів: 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 3; 5 і 10.

*Вимірювальні трансформатори напруги* працюють у режимі, близькому до холостого ходу, тому що до вторинної обмотки трансформатора підключають прилади з відносно великим внутрішнім опором.

Магнітопроводи трансформаторів зазвичай виготовляють із кращих сортів кременистої сталі. Завдяки цьому зменшуються реактивні опори  $X_1$  і  $X_2$ , що обумовлені відповідно потоками розсіювання первинної й вторинної обмоток трансформаторів, і, крім того, зменшуються струм холостого ходу і втрати в магнітопроводі.

Відповідно до ГОСТ 1983-77Е та ГОСТ 23625-79 стаціонарні трансформатори напруги поділяються на класи точності 0,2; 0,5; 1 і 3, а лабораторні – на класи 0,05; 0,1 і 0,2. Стаціонарні трансформатори напруги виготовляють на номінальні первинні напруги до сотень кіловольтів при вторинній напрузі 150, 100 і  $100/\sqrt{3}$  В. Номінальні потужності становлять від 5 до 1200 ВА.

За зовнішнім виглядом і конструкцією трансформатори напруги мало відрізняються від силових трансформаторів на невеликі потужності. Лабораторні трансформатори найчастіше бувають переносними на кілька границь вимірювань.

Для трифазних кіл виготовляються трифазні трансформатори напруги. На трьох стрижнях магнітопроводу розташовуються три первинні й три вторинні обмотки. Первинні обмотки під'єднуються до трифазного кола, до виводів вторинних обмоток під'єднуються вимірювальні прилади.

За типом охолодження трансформатори напруги діляться на сухі (для напруг до 3 кВ) та трансформатори із заливкою маслом або ізолюючою масою (для напруг 3 кВ і вище).

### ЗАДАЧА 1

#### Визначення первинної напруги трансформатора напруги

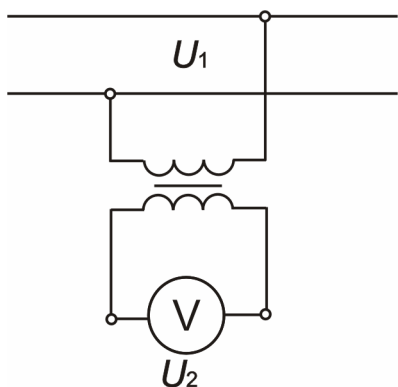


Рис. 1.17

Вольтметр з постійною  $C_U = 3$  В/под ввімкнений паралельно до вторинної обмотки вимірювального трансформатора напруги з коефіцієнтом трансформації  $K_U = 6000/100$ . Визначити первинну напругу, якщо вольтметр показав 75 поділок.

### Вирішення

1. Визначаємо покази вольтметра:

$$U_2 = C_U \cdot n = 3 \cdot 75 = 225 \text{ В.}$$

2. Визначаємо первинну напругу трансформатора напруги:

$$U_1 = U_2 \cdot K = 225 \cdot 60 = 13500 \text{ В.}$$

## ЗАДАЧА 2

### Використання трансформаторів струму й напруги

До мережі однофазного струму через трансформатори струму 200/5 й напруги 6000/100 ввімкнені амперметр, вольтметр і ватметр. Визначте покази всіх приладів, якщо відомо, що струм у колі 168 А, напруга – 3300 В і  $\cos \varphi = 0,74$ .

Наведіть схему.

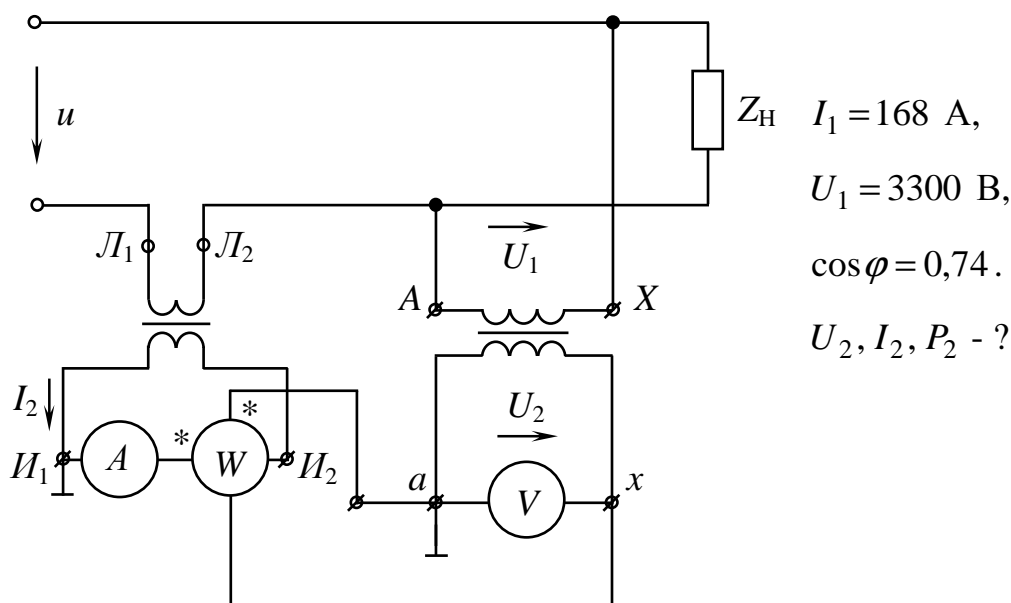


Рис. 1.18

### Вирішення

1. Визначимо коефіцієнти трансформації:

$$K_I = \frac{200}{5} = 40 - \text{за струмом, } K_U = \frac{6000}{100} = 60 - \text{за напругою.}$$

$$2. \text{ Покази вольтметра: } U_2 = \frac{U_1}{K_U} = \frac{3300}{60} = 55 \text{ В.}$$

3. Покази амперметра:  $I_2 = \frac{I_1}{K_I} = \frac{168}{40} = 4,2 \text{ А}$ .

4. Покази ватметра:

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi = 55 \cdot 4,2 \cdot 0,74 = 170,94 \text{ Вт.}$$

### ЗАДАЧА 3

Вимірювання в трифазних колах з використанням трансформатору струму

Ватметр на напругу 220 В і струм 5 А ввімкнений через трансформатор струму 300/5 до трифазного кола з рівномірним навантаженням. Наведіть схему й визначте потужність трифазного кола, якщо ватметр показує 250 Вт, а  $\cos \varphi = 0,8$ . Нейтральна точка доступна.

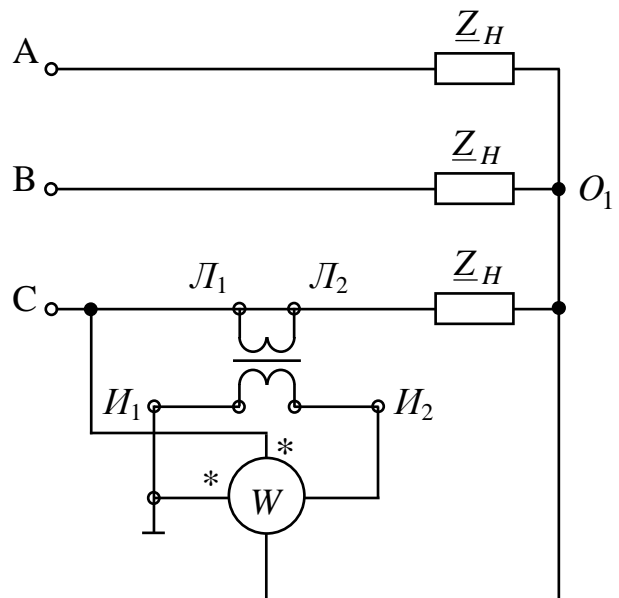


Рис.1.19

Вирішення

1. Коефіцієнт трансформації:  $K_I = \frac{300}{5} = 60$ .

2. Активна потужність однієї фази:  $P_1 = P_2 \cdot K_I = 250 \cdot 60 = 15000 \text{ Вт}$ .

3. Активна потужність трифазного кола:  $P_{\Sigma} = 3 \cdot P_1 = 3 \cdot 15000 = 45000 \text{ Вт}$ .

4. Повна потужність трифазного кола:  $S_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{\cos \varphi} = \frac{45000}{0,8} = 56250 \text{ ВА}$ .

### ЗАДАЧА 4

Вимірювання електричних величин в трифазних колах з використанням трансформаторів струму й напруги

Прилади, які ввімкнені до трифазного кола з рівномірним навантаженням через трансформатори струму 200/5 й напруги 6000/100, дають такі покази: вольтметр – 100 В; амперметр – 3,6 А; ватметри  $P_{12} = 42 \text{ Вт}$ ,  $P_{22} = 350 \text{ Вт}$ . Визначте значення струму, напруги, потужності і  $\cos \varphi$  кола.

$$U_2 = 100 \text{ В}, \quad I_2 = 3,6 \text{ А}, \quad P_{12} = 42 \text{ Вт}, \quad P_{22} = 350 \text{ Вт}.$$

$$I_1, U_1, P_1, \cos \varphi - ?$$

### Вирішення

1. Коефіцієнти трансформації за напругою та струмом:

$$K_U = \frac{6000}{100} = 60, \quad K_I = \frac{200}{5} = 40.$$

2. Показ амперметра:  $I_1 = I_2 \cdot K_I = 3,6 \cdot 40 = 144 \text{ А.}$

3. Показ вольтметра:  $U_1 = U_2 \cdot K_U = 100 \cdot 60 = 6000 \text{ В.}$

4. Активна потужність кола:

$$P_1 = (P_{12} + P_{22}) \cdot K_I \cdot K_U = (42 + 350) \cdot 40 \cdot 60 = 940800 \text{ Вт.}$$

5. Повна потужність кола:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 = \sqrt{3} \cdot 6000 \cdot 144 = 1494720 \text{ ВА.}$$

6. Коефіцієнт потужності:  $\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{940800}{1494720} = 0,63.$

## 2. ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1. 2

### Аналогові електромеханічні й електронні прилади.

#### Вимірювання параметрів електричних кіл та електричних величин

##### 2.1 Вимірювання струму, напруги та потужності

Аналоговими вимірювальними приладами називають прилади, показання яких є неперервною функцією змін вимірюваної величини. Аналоговий електровимірювальний прилад – це, в першу чергу, показуючий прилад, тобто прилад, що допускає відлік показників. Для цього у всіх аналогових електровимірювальних приладах є *відліковий пристрій*, що складається зі *шкали*, розташованої на циферблаті приладу, і *показчика*.

В електромеханічних приладах енергія вимірюваної величини перетворюється в механічну.

Електромеханічний прилад містить у собі (рис. 2.1):



Рис. 2.1 – Загальна структурна схема електромеханічного приладу

ВП – вхідний перетворювач (подільник напруги, шунти, діоди і т.д.);

ВМ – вимірювальний механізм, що складається з рухомої і нерухомої частини;

ПВ – відліковий пристрій (шкала із числовими позначками).

$X$  – вхідна (вимірювана) величина;

$Y_1$  – перетворена величина;

$Y_2$  – величина, перетворена в механічну (кутове переміщення рухомої частини).

Залежно від принципу отримання обертаючого моменту розрізняють шість систем електромеханічних приладів: магнітоелектричну, електромагнітну, електродинамічну, феродинамічну, електростатичну та індукційну.

Електронні аналогові вимірювальні прилади являють собою засоби вимірювань, в яких перетворення сигналів вимірювальної інформації здійснюється за допомогою аналогових електронних пристроїв. Показники цих приладів є безперервною функцією зміни вимірюваної величини.

Електронні вимірювальні перетворювачі та пристрої в якості вихідних пристроїв використовують магнітоелектричні механізми або електронно-променеві трубки.

Найбільш широко серед аналогових електронних вимірювальних прила-

дів використовують електронні вольтметри, осцилографи, частотоміри, фазометри, аналізатори спектру, прилади для вимірювань параметрів електричних і електронних схем (опорів, ємностей, індуктивностей).

Цифровий вимірювальний прилад (ЦВП) – це прилад, в якому вхідний сигнал перетворюється в дискретний вихідний сигнал і представляється в цифровому вигляді. Під дискретним сигналом розуміється переривчастий сигнал, в якому інформація міститься не в інтенсивності носія сигналу (наприклад, у значенні напруги, струму), а в числі елементів сигналу (наприклад, у числі імпульсів напруги) та їх взаємному розташуванні в часі і просторі. Систему таких сигналів для подання інформації називають кодом. Вимірювана величина, що подається на вхід ЦВП, є величиною безперервною, тобто на кінцевому інтервалі вона має незліченну безліч значень. Безперервну величину часто називають аналоговою величиною. Процес перетворення аналогової величини в цифрову називається аналогово-цифровим перетворенням, а перетворювач, що здійснює це перетворення – аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП).

### ЗАДАЧА 1

#### Визначення показань двох вольтметрів

Визначити покази вольтметра при вимірах напруги на опорах  $R_1$  і  $R_2$ . Внутрішній опір вольтметра  $R_V = 2$  кОм. Напруга на послідовному з'єднанні опорів  $U = 120$  В.

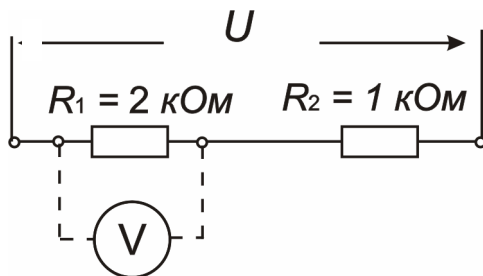


Рис. 2.2

#### Вирішення

1. Опір вольтметра сумірний з опорами на яких вимірюється напруга, тому його потрібно врахувати. Розраховуємо повний опір кола при вимірі напруги на резисторі  $R_1$ :

$$R_{\Sigma} = R_2 + \frac{R_1 \cdot R_V}{R_1 + R_V} = 1 + \frac{2 \cdot 2}{2 + 2} = 2 \text{ кОм.}$$

2. Знаходимо повний струм кола: 
$$I = \frac{U}{R_{\Sigma}} = \frac{120}{2} = 60 \text{ мА.}$$

3. Визначаємо напругу на опорі: 
$$U_{R_2} = I \cdot R_2 = 60 \cdot 1 = 60 \text{ В.}$$



4. Визначаємо покази вольтметра, який ввімкнений паралельно резистору  $R_1$ :  $U_{R1} = U - U_{R2} = 120 - 60 = 60$  В.

5. За такою самою методикою визначаємо покази вольтметра, при вимірюванні напруги резисторі  $R_2$ :  $R_{\Sigma} = R_1 + \frac{R_2 \cdot R_V}{R_2 + R_V} = 2 + \frac{1 \cdot 2}{1 + 2} = 2,66$  кОм.

$$I = \frac{U}{R_{\Sigma}} = \frac{120}{2,66} = 45,11 \text{ А. } U_{R1} = I \cdot R_1 = 45,11 \cdot 2 = 90,22 \text{ В.}$$

$$U_{R2} = U - U_{R1} = 120 - 90,22 = 29,8 \text{ В.}$$

## ЗАДАЧА 2

### Вимірювання електричних величин в однофазному колі

На розподільному щитку однофазного струму установлений вольтметр на 150 В зі шкалою на 150 поділок, амперметр на 5 А зі шкалою на 100 поділок і ватметр на 150 В і 5 А зі шкалою на 150 поділок. Амперметр і ватметр включені через трансформатор струму 50/5. Накресліть схему і визначте первинний струм, потужність і  $\cos \varphi$ , якщо стрілка амперметра показує 80 поділок, вольтметра – 100 поділок, ватметра – 50 поділок.

$$U_H = 150 \text{ В,}$$

$$I_H = 5 \text{ А,}$$

$$N_A = 100; N_V = 150,$$

$$N_W = 150 \text{ под.,}$$

$$n_A = 80; n_V = 120; n_W = 50 \text{ под.,}$$

$$K_I = \frac{50}{5} = 10.$$

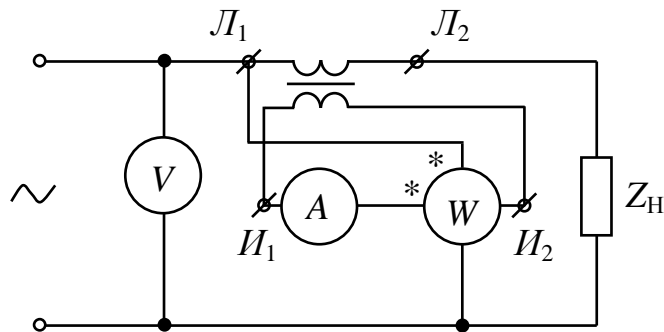


Рис. 2.3

### Вирішення

1. Визначаємо ціну поділки кожного приладу:

$$C_A = \frac{I_H}{N_A} = \frac{5}{100} = 0,05 \text{ А/под.,}$$

$$C_V = \frac{U_H}{N_V} = \frac{150}{150} = 1 \text{ В/под.,}$$

$$C_W = \frac{P_H}{N_W} = \frac{U_H \cdot I_H}{N_W} = \frac{150 \cdot 5}{150} = 5 \text{ Вт/под.}$$

2. Визначаємо покази приладів:

$$I_2 = n_A \cdot C_A = 80 \cdot 0,05 = 4 \text{ А},$$

$$U = n_V \cdot C_V = 100 \cdot 1 = 100 \text{ В},$$

$$P_2 = n_W \cdot C_W = 50 \cdot 5 = 250 \text{ Вт}.$$

3. Розраховуємо первинний струм і активну потужність навантаження

$$I_1 = K_I \cdot I_2 = 10 \cdot 4 = 40 \text{ А},$$

$$P_H = K_I \cdot P_2 = 10 \cdot 250 = 2500 \text{ Вт}.$$

4. Розраховуємо коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi = \frac{P_H}{S} = \frac{P_H}{U \cdot I_1} = \frac{2500}{100 \cdot 40} = \frac{2500}{4000} = 0,625.$$

### ЗАДАЧА 3

#### Вимірювання потужності в трифазному симетричному колі

У трифазному колі з рівномірним навантаженням реактивна потужність вимірюється за схемою одного ватметра. Показ ватметра – 85 поділок. Номінальний струм ватметра 10 А, напруга – 300 В, шкала – на 150 поділок. Фазна напруга кола 220 В, лінійний струм – 8,5 А. Визначте реактивну, активну потужності і  $\cos \varphi$  трифазного кола. Наведіть схему.

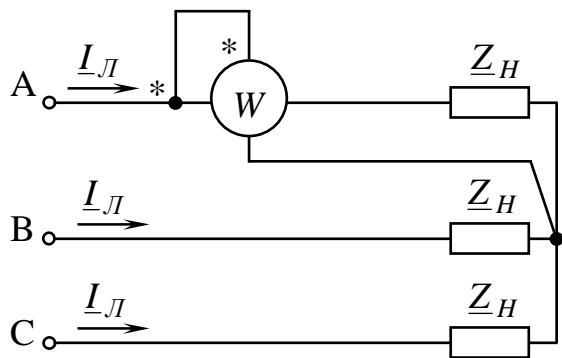


Рис. 2.4

$$\begin{aligned} n &= 85 \text{ под.}, I_H = 10 \text{ А}, \\ U_H &= 300 \text{ В}, N = 150 \text{ под.}, \\ U_\phi &= 220 \text{ В}, I_L = 8,5 \text{ А}. \\ P, Q, \cos \varphi &- ? \end{aligned}$$

#### Вирішення

1. Номінальна потужність ватметра:  $P_H = I_H \cdot U_H = 10 \cdot 300 = 3000 \text{ Вт}.$

2. Ціна поділки ватметра:  $C = \frac{P_H}{N} = \frac{3000}{150} = 20 \text{ Вт/под.}$

3. Покази ватметра (активна потужність):  $P = n \cdot C = 85 \cdot 20 = 1700 \text{ Вт}.$

4. Повна потужність кола:  $S = 3 \cdot I_L \cdot U_\phi = 3 \cdot 8,5 \cdot 220 = 5610 \text{ ВА}.$

5. Активна потужність кола:  $P_{\Sigma} = 3 \cdot P = 3 \cdot 1700 = 5100$  Вт.

6. Коефіцієнт потужності:  $\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{5100}{5610} = 0,909$ .

7. Реактивна потужність:

$$Q = S \cdot \sin \varphi = S \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = 5610 \cdot \sqrt{1 - 0,909^2} = 2333,76 \text{ ВАр.}$$

## ЗАДАЧА 4

### Вимірювання потужності в трифазному колі

У трифазному колі з рівномірним навантаженням потужність вимірюють за схемою двох ватметрів, лінійний струм складає 5 А, лінійна напруга – 120 В, повна потужність, вимірювана ватметрами, складає 807 Вт. Визначте покази кожного ватметра,  $\cos \varphi$  кола. Наведіть схему.

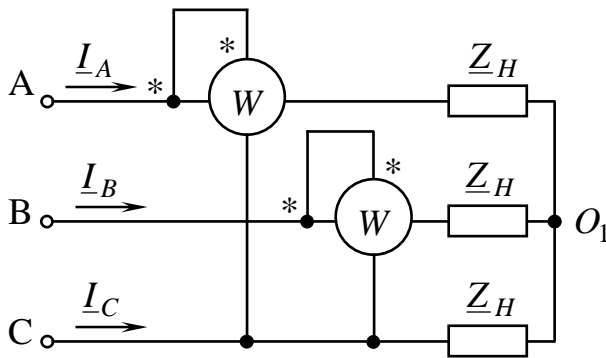


Рис. 2.5

$$I_L = 5 \text{ А,}$$

$$U_L = 120 \text{ В,}$$

$$P_{\Sigma} = 807 \text{ Вт,}$$

$$P_1, P_2, \cos \varphi - ?$$

### Вирішення

1. Коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi = \frac{P_{\Sigma}}{U_L \cdot I_L \cdot \sqrt{3}} = \frac{807}{\sqrt{3} \cdot 120 \cdot 5} = 0,7765 \Rightarrow \varphi = 39^\circ.$$

2. Кути зсуву між відповідними напругами і струмами:

$\psi_1$  - кут зсуву між лінійною напругою  $u_{AC}$  та струмом  $i_A$ ,

$\psi_2$  - кут зсуву між лінійною напругою  $u_{BC}$  та струмом  $i_B$ .

$$\psi_1 = 150^\circ + \varphi - 180^\circ = \varphi - 30^\circ = 39^\circ - 30^\circ = 9^\circ,$$

$$\psi_2 = 120^\circ + \varphi - 90^\circ = \varphi + 30^\circ = 39^\circ + 30^\circ = 69^\circ.$$

3. Покази ватметрів:

$$P_1 = I_L \cdot U_L \cdot \cos \psi_1 = 5 \cdot 120 \cdot \cos 9^\circ = 592,6 \text{ Вт,}$$

$$P_2 = I_L \cdot U_L \cdot \cos \psi_2 = 5 \cdot 120 \cdot \cos 69^\circ = 215 \text{ Вт.}$$

### ЗАДАЧА 5

Вимірювання потужності в трифазному колі методом двох ватметрів

У трифазному колі з рівномірним навантаженням включені два ватметри. Напруга мережі 220 В. Покази ватметрів:  $P_1 = 675$  Вт,  $P_2 = 325$  Вт. Наведіть схему, визначте коефіцієнт потужності і струм в колі.

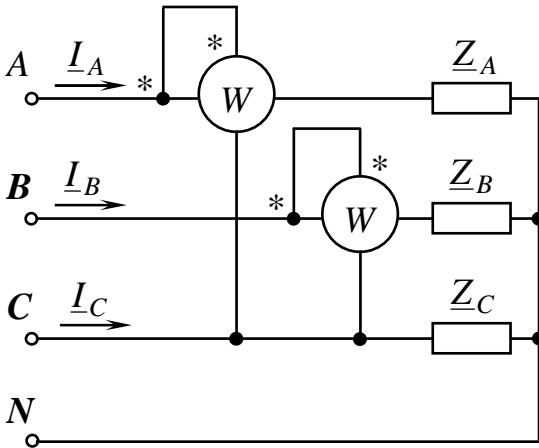


Рис. 2.6

$U_\phi = 220$  В;  $P_1 = 675$  Вт;  $P_2 = 325$  Вт.  
 $\cos \varphi$  - ?

Вирішення

1.  $\psi_1$  - кут зсуву між лінійною напругою  $u_{AC}$  та струмом  $i_A$ ,  
 $\psi_2$  - кут зсуву між лінійною напругою  $u_{BC}$  та струмом  $i_B$ .

Між кутами  $\psi_1$ ,  $\psi_2$  і  $\varphi$  існує залежність:

$$\psi_1 = \varphi - 30^\circ; \quad \psi_2 = \varphi + 30^\circ \Rightarrow \psi_2 = \psi_1 + 60^\circ.$$

2. Проведемо перетворення:

$$P_1 = U_L \cdot I_\phi \cdot \cos \psi_1; \quad P_2 = U_L \cdot I_\phi \cdot \cos \psi_2;$$

$$U_L \cdot I_\phi = \frac{P_1}{\cos \psi_1} = \frac{P_2}{\cos \psi_2} \Rightarrow \frac{\cos \psi_1}{\cos \psi_2} = \frac{P_1}{P_2}.$$

3. Підставимо в останнє рівняння  $\psi_2 = \psi_1 + 60^\circ$ :

$$\begin{aligned} \frac{\cos \psi_1}{\cos(\psi_1 + 60^\circ)} &= \frac{P_1}{P_2} \Rightarrow \frac{\cos \psi_1 \cdot \cos 60^\circ - \sin \psi_1 \cdot \sin 60^\circ}{\cos \psi_1} = \frac{P_2}{P_1} \Rightarrow 0,5 - 0,866 \cdot \operatorname{tg} \psi_1 = \\ &= \frac{P_2}{P_1} \Rightarrow \psi_1 = \operatorname{arctg} \left( \frac{0,5 - \frac{P_2}{P_1}}{0,866} \right). \end{aligned}$$

$$4. \text{ Знайдемо } \psi_1, \psi_2, \varphi: \psi_1 = \operatorname{arctg} \left( \left( 0,5 - \frac{325}{675} \right) / 0,866 \right) = 1,225^\circ;$$

$$\psi_2 = 1,225^\circ + 60^\circ = 61,225^\circ; \quad \varphi = 1,225^\circ + 30^\circ = 31,225^\circ.$$

5. Розрахуємо струм в колі:

$$I_\phi = \frac{P_1 + P_2}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot \cos \varphi} = \frac{675 + 325}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot \cos 31,225^\circ} = 1,777 \text{ А.}$$

## ЗАДАЧА 6

### Вимірювання потужності в трифазному колі методом двох ватметрів

У трифазному колі потужність вимірюється за схемою двох ватметрів. Навантаження фаз рівномірне. Фазний струм 0,5 А, лінійна напруга 380 В. Сумарна потужність, вимірювана ватметрами, складає 206 Вт. Визначте покази ватметра і  $\cos \varphi$  кола. Наведіть схему.

$$I_{\phi} = 0,5 \text{ А},$$

$$U_{\text{Л}} = 380 \text{ В},$$

$$P_{\Sigma} = 206 \text{ Вт}.$$

Знайти  $P_1, P_2, \cos \varphi$ .

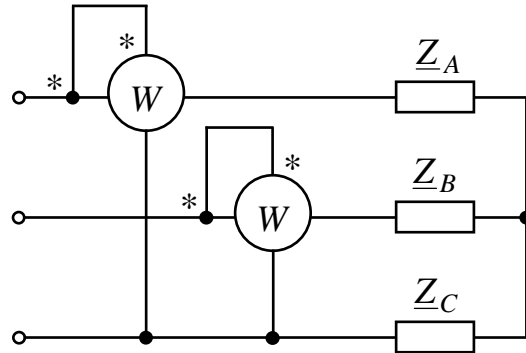


Рис. 2.7

### Вирішення

1. Коефіцієнт потужності:

$$\cos \varphi = \frac{P_{\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{Л}} \cdot I_{\phi}} = \frac{206}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,5} = 0,625 \Rightarrow \varphi = 51^{\circ}.$$

2. Кути зсуву між відповідними напругами і струмами можна визначити з векторної діаграми:

$\psi_1$  - кут зсуву між лінійною напругою  $u_{AC}$  та струмом  $i_A$ ,

$\psi_2$  - кут зсуву між лінійною напругою  $u_{BC}$  та струмом  $i_B$ .

$$\psi_1 = 150^{\circ} + \varphi - 180^{\circ} = \varphi - 30^{\circ} =$$

$$51^{\circ} - 30^{\circ} = 21^{\circ},$$

$$\psi_2 = 120^{\circ} + \varphi - 90^{\circ} = \varphi + 30^{\circ} =$$

$$51^{\circ} + 30^{\circ} = 81^{\circ}.$$

3. Покази ватметрів:

$$P_1 = I_{\phi} \cdot U_{\text{Л}} \cdot \cos \psi_1 =$$

$$= 0,5 \cdot 380 \cdot \cos 21^{\circ} = 177,4 \text{ Вт},$$

$$P_2 = I_{\phi} \cdot U_{\text{Л}} \cdot \cos \psi_2 =$$

$$= 0,5 \cdot 380 \cdot \cos 81^{\circ} = 29,7 \text{ Вт}.$$

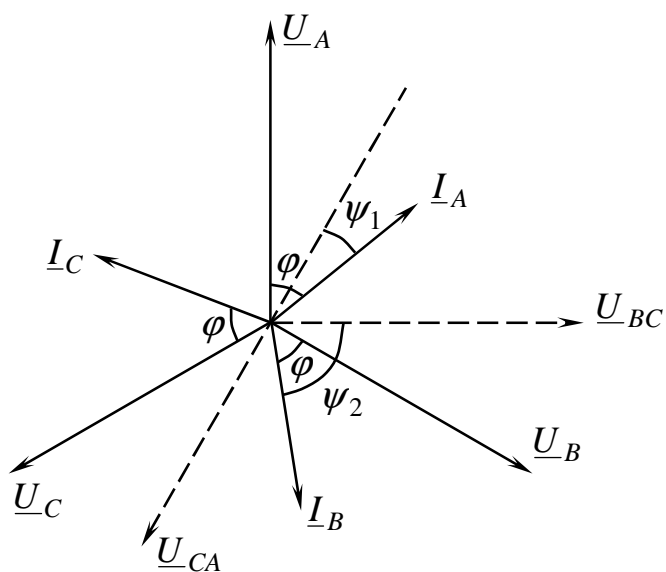


Рис. 2.8

## 2.2 Вимірювання опору

За величиною опору діляться на 3 групи:

- 1) малі опори ( $\leq 1 \text{ Ом}$ ),
- 2) середні (від  $1 \text{ Ом}$  до  $0,1 \text{ МОм}$ ),
- 3) великі (від  $0,1 \text{ МОм}$  і більше).

Активні опори твердих провідників, звичайно, вимірюють на постійному струмі, а опори провідників, що мають велику вологість (рідини, заземлення), – на змінному.

Для вимірювань середніх опорів до  $1 \text{ МОм}$  дуже часто використовують одинарні мости постійного струму (рис. 2.9). Перш ніж вибрати вимірювальний міст і режим його роботи, встановлюють приблизне значення вимірюваного опору. На заводській табличці та на передній панелі вимірювального мосту зазвичай зазначені схема й рекомендації до вибору доцільного режиму залежно від діапазону вимірюваного опору.

Одинарний міст постійного струму складається із трьох зразкових резисторів  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  (зазвичай регульованих), які включають із вимірюваним опором  $R_x$  у мостову схему, тобто в плечі мосту (рис. 2.9). До однієї з діагоналей цієї схеми подають живлення від джерела ЕРС  $E$ . А в іншу діагональ через вимикач  $SA1$  і обмежувачий опір  $R_0$  включають високочутливий гальванометр  $\Gamma$ .

Схема працює в такий спосіб. При подачі напруги через резистори  $R_x$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  проходять струми  $I_1$  і  $I_2$ . Ці струми викликають у резисторах падіння напруг  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{AD}$  і  $U_{DC}$ . Якщо ці падіння напруги будуть різними, то потенціали точок  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$ ,  $\varphi_C$  і  $\varphi_D$  будуть неоднакові. Тому якщо вимикачем  $SA1$  підключити гальванометр, то через нього буде проходити струм

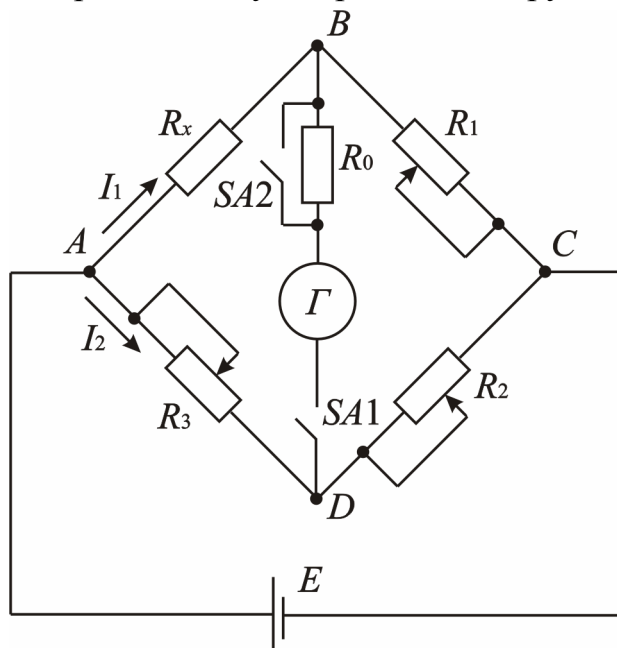


Рис. 2.9 – Схема одинарного мосту постійного струму

$$I_G = \frac{\varphi_B - \varphi_D}{R_0}. \quad (2.1)$$

Завдання вимірювань полягає в тому, щоб врівноважити міст, тобто зробити потенціали точок  $\varphi_B$  і  $\varphi_D$  однаковими, інакше кажучи, зменшити струм гальванометра до нуля. Для цього починають змінювати опори резисторів  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  доти, доки струм гальванометра не буде дорівнювати нулю. При  $I_G = 0$   $\varphi_B = \varphi_D$ , а напруги  $U_{AB} = U_{AD}$  і  $U_{BC} = U_{DC}$ . Виразивши ці напруги через струми та опори  $U_{AD} = I_2 \cdot R_3$ ,  $U_{BC} = I_1 \cdot R_1$ ,  $U_{DC} = I_2 \cdot R_2$ ,  $U_{AD} = I_1 \cdot R_x$ , одержимо дві рівності:

$$\begin{aligned} I_1 \cdot R_x &= I_2 \cdot R_3 \\ I_1 \cdot R_1 &= I_2 \cdot R_2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

Розділивши першу рівність на другу, одержимо

$$R_x \cdot R_2 = R_1 \cdot R_3. \quad (2.3)$$

Ця рівність називається *умовою балансування одинарного мосту*, або *умовою рівноваги мосту*. З неї випливає, що міст стабілізується тоді, коли добутки опорів протилежних плечей будуть однаковими. Звідси вимірюваний опір визначають за формулою:

$$R_x = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}. \quad (2.4)$$

У реальних одинарних мостах змінюють або опір резистора  $R_1$  (його називають плечем порівняння), або відношення опорів  $R_3 / R_2$ . Найбільше поширення набули мости, в яких плавно змінюється опір  $R_1$ , і стрибками, звичайно, кратними 10, змінюється відношення  $R_3 / R_2$ .

*Омметр* – це прилад магнітоелектричної системи, послідовно або паралельно з яким включається вимірюваний опір.

Зазвичай прилади, призначені для вимірювань опорів до 100 Ом, мають паралельну схему включення і пряму шкалу (рис. 2.10, б). Прилади для вимірювань опорів порядку декількох тисяч Ом виконуються за послідовною схемою й мають зворотну шкалу (рис. 2.10, а).

Розглянемо послідовне включення омметра з вимірюваним опором  $R_x$  (для  $R_x > 100$  Ом) – рис. 2.10, а.

Струм, що протікає через прилад (рис. 2.10, а):

$$I = \frac{E}{R_x + R_0 + R_n}, \quad (7.9)$$

де  $E$  – ЕРС джерела живлення;  $R_0$  – опір, що обмежує силу струму;  $R_n$  – внутрішній опір приладу.

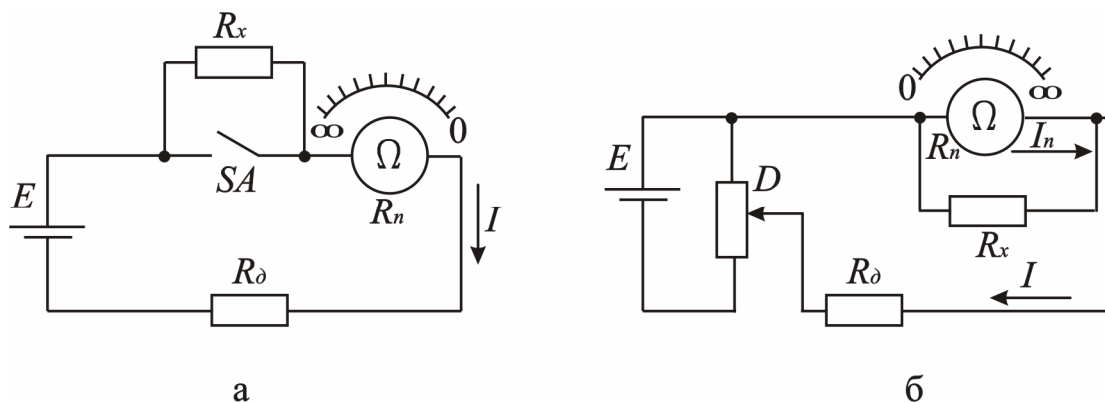


Рис. 2.10 – Схеми включення омметра

- а – послідовне включення (при вимірюванні опорів більше 100 Ом;)  
 б – паралельне включення (при вимірюванні опорів до 100 Ом)

Оскільки  $R_d$  і  $R_n$  постійні, то значення струму в колі буде залежати від вимірюваного опору  $R_x$ , отже, шкалу приладу можна градуювати в одиницях вимірюваного опору.

Рівняння шкали при послідовному включенні:

$$\alpha = \frac{E}{(R_x + R_d + R_n) \cdot C_I} = F(R_x), \quad (7.10)$$

де  $C_I$  – ціна поділки приладу за струмом.

Працюють омметри в такий спосіб:

- перед вимірюванням натискають кнопку  $SA$  (рис. 2.10, а), що шунтує вимірюваний опір, і за допомогою магнітного шунта встановлюють стрілку на контрольну позначку.
- відпускають кнопку, включаючи в коло вимірюваний опір  $R_x$ , при цьому стрілка приладу покаже значення вимірюваного опору.

Особливість омметра з послідовною рамкою в тому, що в цьому приладі зворотна шкала, тобто нульова позначка знаходиться праворуч від шкали, а позначка максимального значення опору – ліворуч. Це пояснюється тим, що при вимірюванні великих опорів через рамку приладу протікає незначний струм.

*Розглянемо паралельне включення омметра з вимірюваним опором  $R_x$  (для вимірювання  $R_x < 100$  Ом)*

Струм, що протікає через зовнішнє (щодо вимірювального механізму) коло – рис. 2.10, б:

$$I = \frac{E}{R_d + \frac{R_n \cdot R_x}{R_n + R_x}}. \quad (7.11)$$



Струм, що протікає через прилад:

$$I_n = I \cdot \frac{R_x}{R_p + R_x} = \frac{E}{\frac{R_\partial(R_n + R_x)}{R_x} + \frac{R_n \cdot R_x}{R_x}} = \frac{E}{\frac{R_\partial \cdot R_n}{R_x} + R_\partial + R_n}. \quad (7.12)$$

Рівняння шкали при паралельному включенні:

$$\alpha = \frac{E \cdot C_I}{\frac{R_\partial \cdot R_n}{R_x} + R_\partial + R_n} = f(R_x). \quad (7.13)$$

Звичайно, омметри виготовляють у вигляді переносних приладів порівняно невеликої точності (класів 1,5 або 2,5) і як джерела живлення мають суху батарею. Із часом напруга батареї падає, тому підтримується постійним добуток  $B \cdot U = \text{const}$ . Для цього в магнітну систему приладу вбудовується магнітний шунт – феромагнітна пластина, яка замикає полюси так, що частина магнітного потоку проходить через корисний повітряний проміжок, а частина – через магнітний шунт. Регулювання положення феромагнітної пластини відносно полюсних наконечників шунта здійснюється за допомогою регулюючого гвинта, що розташований на корпусі приладу.

Мегомметр призначений для вимірювань великих опорів (кіло- та мега- Ом) і являє собою магнітоелектричний логометр. У ньому є джерело живлення – генератор постійного струму з паралельним збудженням і ручним приводом.

Кут відхилення стрілки приладу залежить від відношення струмів, що протікають через рамки, і практично не залежить від поданої напруги.

Послідовно з однією із рамок включається зразковий опір, а послідовно з іншою – вимірюваний опір. Рівняння шкали мегомметра:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right), \quad (7.14)$$

де  $I_1, I_2$  – струми відповідно до першої й другої рамок.

Шкала мегомметра охоплює діапазон вимірювань від 0 до  $\infty$ . Перехід від вимірювань кОм до МОм здійснюється за допомогою перемикача на два положення. Перевірку справності приладу здійснюють перед вимірюваннями до включення в коло: при обертанні ручки генератора стрілка повинна бути встановлена на «0» – при перемикачі в положенні «кОм», і на  $\infty$  – в положенні «МОм».

Перед вимірюванням опору необхідно переконатися, що електричні кола не перебувають під напругою.

### ЗАДАЧА 1

#### Вимірювання опору омметром

Омметр з внутрішнім опором  $R_{np} = 2$  Ом ввімкнений для вимірювання опору. Визначити опір резистора, що обмежує струм у вимірювальному колі, якщо стрілка прибору показала  $n = 60$  под, чутливість приладу  $S = 0,1$  под/Ом, напруга батареї  $E = 5$  В, струм батареї  $I = 1$  мА.

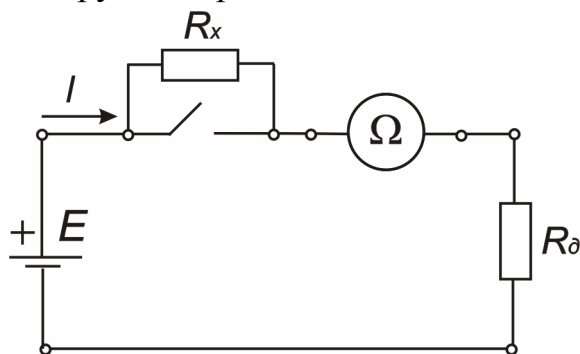


Рис. 2.11

#### Вирішення

1. Визначаємо вимірюваний опір:

$$R_x = \frac{n}{S} = \frac{60}{0,1} = 600 \text{ Ом.}$$

2. Вимірюваний опір більше 100 Ом, отже омметр вмикається з ним послідовно (див. рис. 2.11). Для кола на рис. 2.11, використовуючи закон Ома, запишемо формулу для розрахунку опору резистора, що обмежує струм у вимірювальному колі:

$$R_0 = \frac{E}{I} - R_{np} - R_x = \frac{1,5}{1 \cdot 10^{-3}} - 2 - 600 = 898 \text{ Ом.}$$

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Фремке А. В. Электрические измерения [Текст]: учебник А. В. Фремке, А. Е. Душина; Л. : Энергия, 1980. – 382 с.
2. Поліщук Є. С. Метрологія та вимірювальна техніка [Текст]: підручник Є. С. Поліщук; Львів : Новий світ, 2003. – 460 с.
3. Котур В. І. Електричні виміри і електровимірювальні прилади [Текст]: підручник В. І. Котур, М. Н. Скомська, Н. Н. Храмова; К. : Энергоіздат, 1996. – 324 с.
4. Молиновский В. Н. Электрические измерения [Текст]: ученик В.Н. Молиновский; М. : Энергоиздат, 1982. – 392 с.
5. Полищук Е. С. Электрические измерения электрических и неэлектрических величин [Текст]: учебник Е. С. Полищук; К. : Вища школа, 1984. – 386 с.
6. Панев Б. И. Электрические измерения. Справочник в вопросах и ответах [Текст]: учебник Б. И. Панев; М. : Агропромиздат, 1987. – 224 с.
7. Дворяшин Б. В. Основы метрологии и радиоизмерения [Текст]: ученик Б. В. Дворяшин; М. : Радио и связь, 1993. – 320 с.
8. Карев В. Н. Задачи для лабораторных работ по курсу «Основы метрологии» для контроля знаний [Текст]: пособие В. Н.Карев, Е. П.Волкова; Х. : ХИИГХ, 1990. – 78 с.
9. Гуревич М. М. Фотометрия (теория, методы и приборы) [Текст]: учебник М. М. Гуревич; Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.

*Навчальне видання*

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до практичних занять  
з дисципліни

**«ОСНОВИ МЕТРОЛОГІЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ»**

(для студентів заочної форми навчання напрямів підготовки  
6.050701 – «Електротехніка та електротехнології»  
6.050702 – «Електромеханіка»)

Укладачі: **ТУГАЙ** Дмитро Васильович,  
**ФОРКУН** Яна Борисівна,  
**ГЛЄБОВА** Марина Леонідівна

Відповідальний за випуск: *Д. В. Тугай*

Редактор: *З. І. Зайцева*

Комп'ютерне верстання: *І. В. Волосожарова*

План 2013, поз. 230М

---

Підп. до друку 18. 06. 2013

Формат 60 x 84/16

Друк на ризографі.

Ум. друк. арк. 2,6

Зам. №

Тираж 50 пр.

---

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 4064 від 12.05.2011 р.