

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

Методичні вказівки

до виконання лабораторних робіт з курсу загальної фізики  
розділ

**"ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ"**

*(для студентів I курсу всіх форм навчання напрямку підготовки 6.050701  
"Електротехніка та електротехнології", 6.050702 "Електромеханіка")*



**Харків – ХНУМГ – 2014**

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу загальної фізики, розділ "Електрика і магнетизм" (для студентів 1 курсу всіх форм навчання за напрямками підготовки 6.050701, "Електротехніка та електротехнології", 6.050702 "Електромеханіка") / Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад: К. Ю. Аксьонова, Ю. Д. Оксюк, – Х. : ХНУМГ, 2014. – 60с.

Укладачі: К. Ю. Аксьонова, Ю. Д. Оксюк

Рецензент: к. фіз.-мат. н., доц. А. С. Сисоєв

Рекомендовано кафедрою фізики, протокол № 2 від 18 жовтня 2011 р.

## Зміст

Вступ .....	4
Електровимірвальні прилади і їхні характеристики.....	5
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 30 . Розширення меж вимірювання амперметра і вольтметра.....	9
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 31. Визначення електрорушійної сили джерела струму компенсаційним методом.....	16
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 32. Моделювання електричних полів за допомогою електролітичної ванни.....	20
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 33. Визначення діелектричної проникності діелектриків.....	24
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 34. Розрахунок розгалуженого електричного кола і його експериментальна перевірка .....	30
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 35. Дослідження роботи трьохелектродної електронної лампи.....	33
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 36. Дослідження електричного струму в напівпровідниках .....	38
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 37. Визначення індукції магнітного поля електромагніту .....	45
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 38. Визначення питомого заряду електрона за допомогою магнетрона .....	48
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 39. Вивчення магнітних властивостей феромагнетиків .....	54
Список джерел .....	60

## Вступ

Цей випуск є переробленим і доповненим виданням (у порівнянні з виданням 2004 року) методичних вказівок для виконання робіт фізичного практикуму з електрики і магнетизму для студентів 1 курсу денної і 1 і 2 курсу заочної форми навчання всіх спеціальностей.

Мета вказівок – допомогти студентам виконати лабораторні роботи, дотримуючись правил техніки безпеки; навчитися користуватися електровимірними приладами і визначати похибки вимірювань величин цими приладами; придбати елементарні навички експериментування і практичного освоєння найбільш важливих методів вимірів; перевірити на практиці дію фізичних законів і закономірностей.

Експеримент має вирішальне значення для пізнання навколишньої природи, по-перше, як первинне джерело пізнання і, по-друге, як критерій істинності гіпотез, теорій. Він відіграє також величезну роль при формуванні нових гіпотез та теоретичних уявлень. У свою чергу, без теорії та спрямовуючих ідей неможливий науковий експеримент. Отже, теоретичні й експериментальні методи дослідження перебувають у діалектичному взаємозв'язку та взаємодії. З розвитком науки і техніки сфера експериментальних досліджень увесь час розширюється, охоплюючи дедалі складніші явища природи.

Фізичний експеримент як метод дослідження набуває подальшого поширення в суміжних з фізикою дисциплінах, особливо в хімії, біології та технічних науках.

При підготовці, виконанні та оформленні результатів лабораторних робіт слід користуватися рекомендаціями, викладеними у вступній частині “Методичних вказівок до виконання лабораторних робіт з фізики”, розділ “Механіка”, а також викладеними нижче даними про електровимірні прилади.

## Електровимірювальні прилади і їхні характеристики

### Чутливість і ціна поділки електровимірювального приладу

Чутливістю  $S$  електровимірювального приладу називають відношення лінійного чи кутового переміщення покажчика  $\Delta\alpha$  до зміни вимірюваної величини, що викликає це переміщення  $\Delta x$ :

$$s = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x}.$$

Розмірність чутливості залежить від характеру вимірюваної величини (чутливість приладу до струму, напруги і т.і.).

Величину  $C=S^{-1}$ , обернену чутливості, називають ціною поділки приладу. Вона встановлює значення електричної величини, що викликає відхилення на одну поділку. Ціна поділки залежить від верхньої і нижньої межі вимірювання приладу і від числа поділок шкали. Наприклад, на рис.1 показана шкала приладу, розрахованого на вимірювання постійного струму (позначка "-") у межах від 0 до 250 мА, шкала якого має 50 поділок.

Ціна поділки такого приладу дорівнює  $\frac{250\text{мА}}{50\text{под}} = 5 \frac{\text{мА}}{\text{под}}$ .

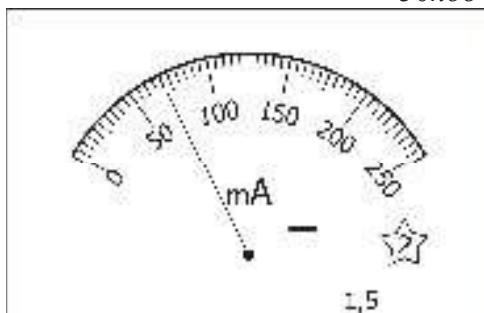


Рис. 1

### Похибки приладів

Найважливішою характеристикою кожного вимірювального приладу є його похибка. Точність електровимірювальних приладів лежить в основі розподілу приладів на класи. Електровимірювальні прилади відповідно до величини їх зведеної похибки поділяються на вісім класів точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Прилади класів точності 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 використовують головним чином для точних лабораторних вимірювань і називають прецизійними; прилади класів 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 мають назву технічних.

Абсолютною похибкою приладу  $\Delta X$  є модуль різниці між показаннями приладу  $X_{\text{пр}}$  і дійсним значенням вимірюваної величини  $X_0$ :

$$\Delta X = |X_{\text{пр}} - X_0|.$$

За дійсне значення вимірюваної величини  $X_0$  приймають її значення, що

вимірюється за допомогою зразкових приладів.

Зведена похибка  $\delta_{пр.} = \frac{\Delta x_{пр.}}{x_{max}} \cdot 100\%$  приладу виражається у відсотках (%).

Клас точності приладу дорівнює зведеній похибці.

**Приклад.** Нехай вимірне значення сили струму дорівнює 75мА. Вимірювання струму виконували міліамперметром із шкалою на 250 мА. Клас точності 1,5. Тоді абсолютна похибка приладу

$$\Delta I_{пр.} = \frac{\delta_{пр.}}{100} \cdot I_{max} = \frac{1.5}{100} \cdot 250mA = 3.75mA .$$

Відносна похибка вимірювання величини струму

$$\delta = \frac{\Delta I_{пр.}}{I} \cdot 100\% = \frac{3.75}{75} \cdot 100\% = 5\% .$$

З наведеного прикладу зрозуміло, що коли треба проводити вимірювання з високою точністю, то прилад треба підібрати такий, щоб вимірюваний струм викликав відхилення стрілки, найбільш близьке до максимального значення  $I_{max}$ .

### Класифікація приладів за принципом дії

*Магнітоелектрична система.* Електровимірювальні прилади цієї системи призначені для виміру сили струму і напруги в ланцюгах постійного струму. Робота приладів магнітоелектричної системи заснована на взаємодії магнітного поля постійного магніту і рухливої котушки, по якій протікає вимірюваний струм.

*Електромагнітна система.* Прилади електромагнітної системи застосовують для вимірювань постійного і змінного струмів. Принцип дії приладів електромагнітної системи заснований на взаємодії магнітного поля котушки, по якій протікає вимірюваний струм, і рухливого осердя, виготовленого з м'яких магнітних матеріалів. Ця система приладів дає змогу вимірювати силу як постійного, так і змінного струмів, має просту конструкцію, витримана у відношенні перевантажень.

Недоліки: нерівномірність шкали; менша точність порівняно з магнітоелектричними приладами.



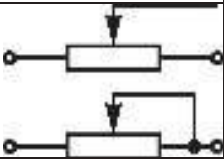

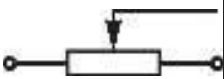


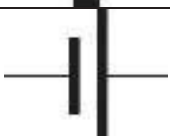










*Електродинамічна система.* Прилади призначені для виміру сили струму, напруги і потужності в колах постійного і змінного струмів. Принцип дії приладів електродинамічної системи заснований на взаємодії котушок, по яких протікає вимірюваний струм. Таким чином, прилади електродинамічної

системи відрізняються від приладів магнітоелектричної системи тим, що магнітне поле створюється не постійним магнітом, а котушкою, по якій протікає вимірюваний струм. Котушки в електродинамічному приладі, залежно від призначення, з'єднуються між собою послідовно або паралельно. Якщо обидві котушки приладу з'єднати паралельно, то його можна використовувати як амперметр, якщо послідовно і приєднати до них послідовно додатковий опір, то прилад може бути використаний як вольтметр. У ватметрах нерухома котушка вмикається в коло струму послідовно, а рухома котушка з додатковим опором – паралельно споживачам енергії.

Існують також прилади індукційної, теплової, вібраційної, електростатичної, термоелектричної та інших систем. Докладніше про ці системи можна дізнатися в книзі “ Загальна фізика. Лабораторний практикум ” за редакцією І.Т.Горбачука.





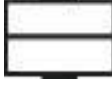

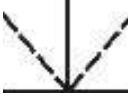

Позначення, що зустрічаються на шкалах приладів, наведені нижче.

### Умовні позначення деяких елементів електричних схем

	Резистор нерегульований		Конденсатор нерегульований
	Реостат з розривом і без розриву ланцюга		Конденсатор регульований
	Потенціометр		Заземлення
	Котушка індуктивності з осердям		Джерело постійного струму
	Котушка індуктивності без осердя		Діод, напівпровідник, випрямляч
	Амперметр		Вольтметр
	Мікроамперметр		Мілівольтметр
	Омметр		Цифровий мультиметр
	Осцилограф		Фотоелемент

## Умовні позначення на циферблатах електровимірювальних приладів

### Позначення принципу дії приладу

Магнітоелектричний з рухомою рамкою	
Магнітоелектричний з рухомим магнітом	
Логометр магнітоелектричний	
Електромагнітний	
Електродинамічний	
Індукційний	
Вібраційний	
Електростатичний	



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 30. Розширення меж вимірювання амперметра і вольтметра

Мета роботи – визначення коефіцієнтів шунтування, опорів шунтів і додаткових опорів для збільшення меж вимірів сили струму і напруги. Відповідно до зазначеної мети робота складається з двох частин.

### *I. Шунтування амперметра.*

Амперметр – прилад для виміру сили струму – включається в ланцюг послідовно з тією ділянкою ланцюга, на якому вимірюється сила струму. Тому опір обмотки амперметра повинен бути досить малим, щоб зміна сили струму при включенні амперметра не перевищувала його абсолютної похибки. При необхідності ввімкнути амперметр у коло, струм в якому перевищує значення, на яке розрахований даний прилад, паралельно опору обмотки амперметра включають резистор, названий шунтом.

Оцінку помилки у визначенні сили струму, яку вносить амперметр, можна зробити, склавши типову схему для виміру сили струму в колі. На рис. 30.1 зображено дві ділянки такого кола.

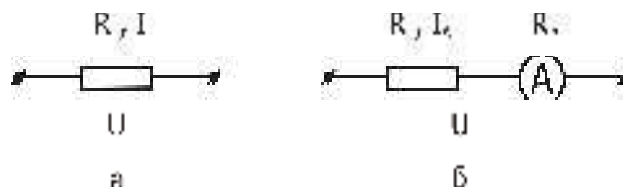


Рис. 30.1

На ділянці кола, зображеній на схемі **а**, треба визначити силу струму  $I$ . Включаючи в коло амперметр (схема **б**), вимірюють силу струму  $I_A$ , що відрізняється від дійсної сили струму  $I$  у схемі **а**;

$R$  – опір навантаження;  $R_A$  – опір амперметра;  $U$  – різниця потенціалів на кінцях ділянок кола.

За законом Ома для ділянки кола

$$I = \frac{U}{R} \quad (\text{схема а}), \quad (1)$$

$$I_A = \frac{U}{R + R_A} \quad (\text{схема б}). \quad (2)$$

Виключивши  $R$  з рівнянь (1), (2), одержимо вираз для сили струму  $I$ :

$$I = I_A \left( 1 + \frac{I_A R_A}{U - I_A R_A} \right) . \quad (3)$$

Різниця ( $I - I_A$ ) не має перевищувати абсолютної похибки  $\Delta I_{np}$ :

$$I - I_A < \Delta I_{np} ; \quad (4)$$

$$\Delta I_{np} = \frac{\delta_{np} \cdot I_{\max}}{100} , \quad (5)$$

де  $\delta_{np}$  – зведена похибка приладу (клас точності приладу, що позначається на його шкалі);

$I_{\max}$  – максимальне значення сили струму, що вимірюється приладом.

Оскільки найчастіше абсолютна похибка приладів з пропорційною шкалою збігається з половиною поділки, то замість формули (5) для  $\Delta I_{np}$  можна використати вираз

$$\Delta I_{np} = \frac{I_{\max}}{2n} , \quad (6)$$

де  $n$  – кількість поділок шкали.

Тоді умову (4), за якої амперметр не вносить змін у виміри, з урахуванням рівняння (3) можна записати так:

$$I_A \frac{I_A R_A}{U - I_A R_A} < \frac{I_{\max}}{2n} . \quad (7)$$

З огляду на найбільш несприятливий випадок, коли  $I_A = I_{\max}$ , з умови (7) одержимо:

$$\frac{U}{I_{\max} R_A} > 2n + 1 . \quad (8)$$

Оскільки звичайно  $n \gg 1$ , останню нерівність можна записати так:

$$\frac{U}{I_{\max} R_A} > 2n . \quad (9)$$

З цієї умови завжди можна визначити, який прилад можна використовувати для даного значення  $U$  і при яких значеннях  $U$  можна використовувати цей прилад.

Для з'ясування того, як відбувається розширення меж виміру сили струму приладом при підключенні до нього шунта, розглянемо дві схеми (рис.30.2):

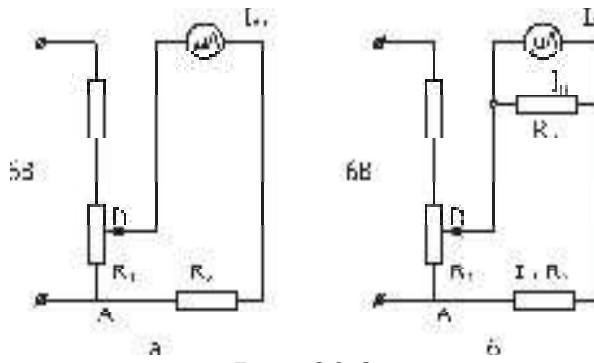


Рис. 30.2

На рис. 30.2:  $R_{ш}$  – опір шунта;  $I_{ш}$  – сила струму в шунті;  $I_{A0}$  – сила струму в колі без шунта;  $I_A$  – сила струму, що протікає крізь амперметр у схемі з шунтом;  $I = I_A + I_{ш}$ ;  $R_2$  – опір навантаження;  $R_1$  – опір дільника напруги  $D$ .

Коефіцієнтом шунтування називають число, на яке треба помножити показання приладу  $I_A$ , щоб одержати значення струму в колі  $I$ :

$$K = \frac{I}{I_A}, \quad (10)$$

З рівнянь  $I_A R_A = I_{ш} R_{ш}$  і  $I = I_A + I_{ш}$  легко одержати вираз для  $K$  через опори шунта  $R_{ш}$  і амперметра  $R_A$ :

$$K = 1 + \frac{R_A}{R_{ш}}, \quad (11)$$

і опір шунта  $R_{ш}$  через  $R_A$  і  $K$ :

$$R_{ш} = \frac{R_A}{K - 1}. \quad (12)$$

Коли необхідно, наприклад, збільшити ціну поділки амперметра в 10 разів, то опір шунта треба взяти в 9 разів меншим ніж опір амперметра. Розглянемо випадок, коли опір шунта невідомий, а треба визначити коефіцієнт  $K$ . Для цього слід виміряти силу струмів  $I_{A0}$  і  $I_A$  при тому самому опорі  $R_A$  і тій самій напрузі  $U$  на опорі  $R_1$  і визначити  $K$ .

За законом Ома одержимо:

$$I_{A0} = \frac{U}{R_2 + R_A} \quad (\text{для схеми а на рис. 2}), \quad (13)$$

$$I = \frac{U}{R_2 + \frac{R_A \cdot R_{ш}}{R_A + R_{ш}}} \quad (\text{для схеми б на рис. 2}). \quad (14)$$

Враховавши, що  $I = KI_A$  (з формули (10)),  $\frac{R_A \cdot R_{ш}}{R_A + R_{ш}} = \frac{R_A}{K}$  (з формули (11)) і виключивши  $R_2$  з рівнянь (13) і (14), одержимо:

$$K = \frac{U - I_A \cdot R_A}{U \cdot \frac{I_A}{I_{AO}} - I_A \cdot R_A} = \frac{I_{AO}}{I_A} \left( 1 + \frac{I_{AO} - I_A}{U - I_{AO} \cdot R_A} R_A \right) \quad (15)$$

Якщо виконується нерівність (9), то другим доданком у дужках виразу (15) можна знехтувати (він має порядок менше, ніж величина  $\frac{1}{2n}$ ), і вираз (15) набуває вигляду

$$K = \frac{I_{AO}}{I_A} . \quad (16)$$

Таким чином, вимірявши  $I_A$  і  $I_{AO}$ , знайдемо коефіцієнт шунтування  $K$ , а за формулою (12) – опір шунта  $R_{Ш}$ .

## 2. Розширення меж вимірювання вольтметра

Вольтметр – прилад для вимірювання напруги – вмикається в коло паралельно тій ділянці кола, між кінцями якого вимірюється напруга. Тому опір вольтметра повинен бути досить великим, щоб зміна напруги при вмиканні вольтметра не перевищувала його похибки. При необхідності включити вольтметр у коло з напругою, що перевищує ту, на яку розрахований даний вольтметр, послідовно з його обмоткою включається додатковий резистор.

Оцінку помилки у визначенні напруги, що вносить вольтметр, можна зробити аналогічно тому, як це було зроблено у випадку амперметра. Щоб прилад не вносив помилок, досить виконати умову

$$\frac{R_B}{R_X} > 2n , \quad (17)$$

де  $n$  - кількість поділок пропорційної шкали вольтметра;

$R_B$  - опір вольтметра;  $R_X$  - опір тієї ділянки, де вимірюється напруга.

Для з'ясування того, як відбувається розширення меж виміру напруги приладом, розглянемо дві схеми (рис. 30.3):

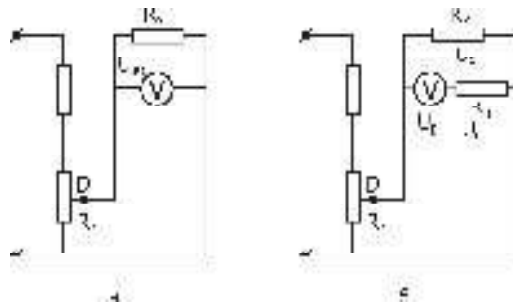


Рис. 30.3

На рис.3:  $U_{B0}$  і  $U_B$  – показання вольтметра без додаткового резистора і з ним відповідно;  $U_X$  – напруга на резисторі  $R_X$ ;  $U_D$  – напруга на додатковому

резисторі  $R_d$ .

Додатковими резисторами є резистори, що застосовуються для збільшення меж виміру вольтметрів. Якщо ціну поділки шкали вольтметра треба збільшити в  $N$  разів, то очевидною є рівність

$$N = \frac{U_X}{U_B}. \quad (18)$$

При виконанні умови (17) напруги  $U_{B0}$  і  $U_X$  на опорі  $R_X$  у схемах **а** і **б** рис.30.3 практично однакові:  $U_{B0} = U_X$ . Тому з рівняння (18) одержимо:

$$N = \frac{U_{B0}}{U_B}. \quad (19)$$

Звичайно коефіцієнт  $N$  знаходять з формули (19), коли показання вольтметра  $U_{B0}$  не перевищують максимального значення його шкали. Напругу  $U_X$  на опорі  $R_X$ , що перевищує максимальне значення шкали вольтметра без додаткового резистора (при малому опорі  $R_I$ ), знаходять за формулою (18). При цьому показання вольтметра  $U_B$  при досить великому додатковому опорі  $R_d$  уже не будуть перевищувати максимального значення шкали.

Зв'язок коефіцієнта  $N$  з опором додаткового резистора знаходять з формули (18):

$$N = \frac{U_{B0}}{U_B} = \frac{U_B + U_d}{U_B} = 1 + \frac{U_d}{U_B} = 1 + \frac{R_d}{R_B}. \quad (20)$$

Опір додаткового резистора обчислюють за формулою:

$$R_d = R_B(N - 1). \quad (21)$$

Якщо необхідно, наприклад, збільшити ціну поділки вольтметра в 10 разів, то опір додаткового резистора треба взяти в 9 разів більше опору вольтметра. При цьому показання вольтметра  $U_B$  у схемі з додатковим резистором треба помножити на 10 (формула (18)), щоб одержати дійсну напругу  $U_X$  на резисторі  $R_X$ .

Якщо опір додаткового резистора невідомий, то, вимірюючи напруги  $U_{B0}$  і  $U_0$  за схемами **а** і **б** на рис.3, знаходять  $N$  за формулою (19), а потім  $R_d$  за формулою (21).

### Прилади і приладдя

Амперметр, вольтметр, дільник напруги, набір шунтів, набір додаткових резисторів, сполучні дроти, джерело струму.

### Порядок виконання роботи

**Завдання 1.** Визначення коефіцієнтів шунтування, опорів невідомих шунтів за показаннями амперметра з шунтом і без нього і сили струму в колі.

1. Зібрати схему **а** на рис. 30.2.
2. Подати напругу на дільник і, збільшуючи опір  $R_1$  обертанням повзунка, переконатися в тому, що при деякому положенні повзунка сила струму в колі перевищує межу вимірів амперметра.
3. Зменшуючи опір дільника напруги  $R_1$ , записати максимально можливі показання амперметра  $I_{A0max}$  у табл.1.
4. Приєднати шунт з невідомим опором (схема **б** на рис.30.2) і, не змінюючи положення повзунка дільника (див. п.3), записати показання амперметра  $I_{Amax}$  у табл.1.
5. Визначити коефіцієнти шунтування  $K$  за формулою (16) і записати в табл.1.
6. Повторити виміри, зазначені в п. 3 і 4, і обчислення, зазначені в п. 5, тричі при інших положеннях повзунка дільника напруги, але для того самого шунта. Дані занести в табл.1.
7. Обчислити середнє значення коефіцієнта шунтування  $\langle K \rangle$  і за формулою (12) опір шунта  $R_{ш1}$ .
8. Повторити виміри й обчислення, вказані в п.3 – 7, ще для двох шунтів.
9. Для кожного з шунтів у ланцюзі, складеному за схемою **б** на рис.30.2, знайти кілька значень сили струму в межах від  $I_{A0max}$  (п.4) до межі вимірювань амперметра й обчислити відповідні значення  $I$  в ланцюзі за формулою (10):  $I = I_A \cdot K$ . Дані занести в табл.1.

**Завдання 2.** Визначення опорів додаткових резисторів і коефіцієнтів розширення меж виміру вольтметра за показаннями вольтметра з додатковим резистором і без нього і напруги на ділянці кола.

1. Зібрати схему **а** на рис.30.3.
2. Подати напругу на дільник і, збільшуючи опір  $R_1$  обертанням повзунка, переконатися в тому, що при деякому його положенні напруга перевищує межу показань вольтметра.
3. Зменшуючи опір дільника напруги  $R_1$ , записати максимально можливі показання вольтметра  $U_{B0max}$  у табл.2.
4. Приєднати додатковий резистор з невідомим опором  $R_D$  (схема **б** на рис.30.3) і, не змінюючи положення повзунка дільника (див.п.3), записати показання вольтметра  $U_{Bmax}$  у табл.2.
5. Визначити коефіцієнт  $N$  за формулою ( 19 ) і записати в табл.2.
6. Повторити виміри, зазначені в п. 3 і 4, обчислення, вказані в п. 5, тричі при інших положеннях повзунка дільника, але для того самого додаткового резистору. Дані занести в табл.2.
7. Обчислити середнє значення коефіцієнта  $\langle N \rangle$  і за формулою (21) опір додаткового резистора  $R_D$ .
8. Повторити виміри й обчислення, зазначені в п. 3 - 7, ще для двох додаткових резисторів.
9. Для кожного з додаткових резисторів у ланцюзі, складеному за схемою **б** на рис.30.3, знайти кілька значень напруги  $U_B$  у межах від  $U_{Bmax}$  (п.4) до межі

вимірювань вольтметра й обчислити відповідні значення  $U_x$  на ділянці з опором  $R_x$  за формулою (18):  $U_x = U_B \cdot N$ . Дані занести в табл.2.

Таблиця 1

№ $R_{ш}$	1				2				3			
$I_{A0}$ , мА												
$I_A$ , мА												
$K$												
$\langle K \rangle$												
$R_{ш}$ , Ом												
$I_A$ , мА												
$I$ , мА												

Таблиця 2

№ $R_D$	1				2				3			
$U_{B0}$ , В												
$U_B$ , В												
$N$												
$\langle N \rangle$												
$R_D$ , Ом												
$U_B$ , В												
$U$ , В												

### Контрольні запитання

1. Записати і пояснити закономірності паралельного і послідовного з'єднання провідників.
2. Який вид з'єднання використовується в побутовій електромережі і чому?
3. Що таке шунт, яке його призначення?
4. Що таке додатковий резистор, яке його призначення?
5. Дати визначення коефіцієнта шунтування і записати зв'язок між опором амперметра і шунта.
6. Який зв'язок між опором вольтметра і опором додаткового резистора?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 31.

### Визначення електрорушійної сили джерела струму компенсаційним методом

Мета роботи – ознайомлення з компенсаційним методом вимірів у колах постійного струму.

Робота в замкненому колі відбувається за рахунок дії сторонніх причин - полів неелектричного походження. Електрорушійна сила (е.р.с.) є мірою дії сторонніх сил джерела струму. Величина е.р.с. джерела  $\varepsilon$  визначається роботою сторонніх сил у замкненому колі при проходженні через переріз провідника одиниці заряду.

Звичайні струмопровідні вольтметри не придатні для точного визначення е.р.с. У цьому легко переконатися, якщо підключити до полюсів джерела струму такий вольтметр (рис .31.1) і записати закон Ома для замкненого кола:

$$\varepsilon = IR + Ir, \text{ чи } \varepsilon = U + Ir, \quad (1)$$

де  $\varepsilon$  - е.р.с. джерела струму;

$I$  - сила струму в колі;

$r$  - внутрішній опір джерела струму;

$R$  - опір вольтметра;

$U=IR$  – напруга на полюсах джерела струму, яка вимірюється вольтметром.

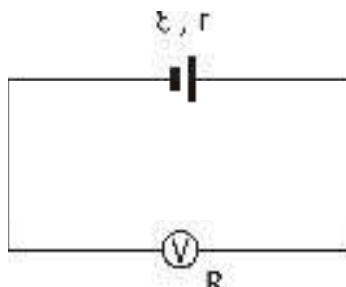


Рис. 31.1

З рівняння (1) видно, що  $\varepsilon$  більше вимірюваної вольтметром напруги  $U$  на величину спадання напруги на внутрішньому опорі джерела струму  $U_r=Ir$ . Це і є абсолютна систематична похибка у вимірі е.р.с. вольтметром, який створює замкнене коло для проходження електричного струму. Відносна похибка визначення е.р.с. обчислюється за формулою:

$$\delta = \frac{I_r}{IR + I_r} = \frac{r}{R + r}. \quad (2)$$

Коли струм крізь джерело відсутній, його е.р.с. дорівнює різниці потенціалів на полюсах джерела, яку можна вимірювати електростатичним або електронним вольтметром. Але найбільш точним методом виміру е.р.с. є компенсаційний метод.



## Метод вимірювання й опис установки

Компенсаційний метод полягає в тому, що е.р.с., яка підлягає виміру, врівноважується (компенсується) напругою, яку створює інше джерело. При цьому сила струму через досліджуване джерело дорівнює нулю.

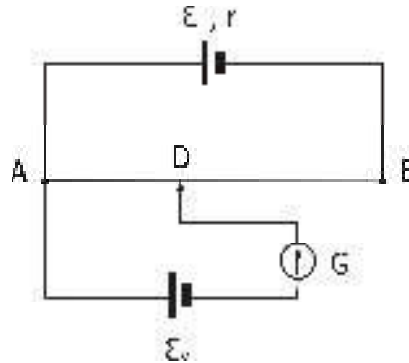


Рис. 31.2

Розглянемо суть методу компенсації (рис.31.2). Джерело струму з е.р.с.  $\epsilon$ , що свідомо перевищує е.р.с. досліджуваного елемента  $\epsilon_x$ , замикається на реостат АВ. Досліджуваний гальванічний елемент з невідомою е.р.с.  $\epsilon_x$  приєднується одним полюсом до джерела струму з е.р.с.  $\epsilon$  в точці А, а іншим – через гальванометр G до ковзного контакту реостата D. Сила струму крізь джерело з невідомою е.р.с. може дорівнювати нулю тільки в тому випадку, якщо обидва джерела будуть ввімкнені однойменними полюсами назустріч один до одного. Падіння напруги на реостаті АВ завжди більше, ніж е.р.с. досліджуваного елемента, тому що  $\epsilon > \epsilon_x$ . Тоді завжди можна підібрати таку ділянку реостата AD, щоб струм у ділянці, де ввімкнено гальванометр, дорівнював нулю. Звідси:

$$U_{AD} = IR_{AD} = \epsilon_x, \quad (3)$$

де  $I$  – струм крізь реостат АВ;  
 $R_{AD}$  – опір ділянки реостата AD.  
 За законом Ома для повного кола:

$$I = \frac{\epsilon}{R_{AB} + r}, \quad (4)$$

де  $R_{AB}$  – опір реостата;  
 $r$  – внутрішній опір джерела  $\epsilon$ .

Якщо замість досліджуваного джерела струму підключити джерело струму з відомою е.р.с.  $\epsilon_N$  і зміною положення повзунка (ковзного контакту D) знову домогтися, щоб струм крізь це джерело не проходив, то аналогічно рівнянню (3) одержимо:

$$\epsilon_N = IR_{AD1}, \quad (5)$$

де  $R_{AD1}$  – опір ділянки AD, але з іншим положенням точки D;

$I$  – сила струму, обумовлена тим самим рівнянням (4), що й у випадку з досліджуваним джерелом, тому що сила струму в частині кола  $ACD$  в обох випадках дорівнює нулю.

Якщо поділити відповідно ліві й праві частини рівнянь (3) і (5), одержимо

$$\varepsilon_x = \varepsilon_N \frac{R_{AD}}{R_{AD1}}. \quad (6)$$

Таким чином, визначення е.р.с. гальванічного елемента зводиться до підбору опорів  $R_{AD}$  і  $R_{AD1}$ . Величини цих опорів пропорційні довжинам відповідних ділянок реостата  $l_X$  і  $l_N$ :

$$R_{AD} = \rho \frac{l_X}{S}, \quad R_{AD1} = \rho \frac{l_N}{S}; \quad (7)$$

$$\varepsilon_X = \varepsilon_N \frac{l_X}{l_N}. \quad (8)$$

Схему експериментальної установки надано на рис. 31.3.

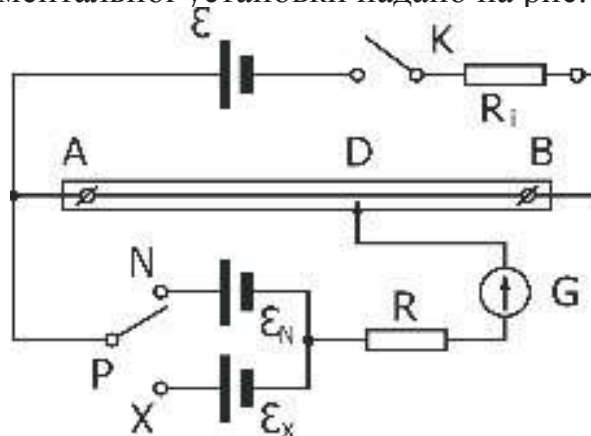


Рис. 31.3

На схемі позначено:  $\varepsilon$  – джерело струму з е.р.с., що перевищує невідому е.р.с.  $\varepsilon_X$ ;  $\varepsilon_N$  – елемент з відомою е.р.с.;  $\varepsilon_X$  – елемент, е.р.с. якого потрібно визначити;  $G$  – гальванометр;  $AB$  – реостат;  $K$  – ключ;  $P$  – перемикач;  $R$  – резистор, що обмежує струми в колах.  $R_i$  – додаткові опори.

### Прилади і приладдя

Джерело струму з е.р.с.  $\varepsilon$ , елемент Вестона з е.р.с.  $\varepsilon_N$ , досліджуване джерело струму з е.р.с.  $\varepsilon_X$ , реостат зі шкалою, гальванометр  $G$ , додаткові резистори  $R_i$ .

### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися зі схемою на лабораторному столі.
2. Замкнути ключ  $K$  і поставити перемикач  $P$  у положення “ $X$ ”.
3. Перемістити повзунок реостата  $D$  до положення, при якому гальванометр покаже 0.
4. Внести значення положення повзунка  $D$  на шкалі  $l_X$  у таблицю (№ досліджу – 1).

5. Поставити перемикач Р в положення “N”.
6. Перемістити повзунок D реостата також до положення, при якому гальванометр покаже 0.
7. Внести друге значення положення повзунка D на шкалі  $l_N$  у таблицю (№ досліду – 1).
8. Повторити дії зазначені в п.2 – 7 , ще два рази (№ дослідів 2,3).
9. Обчислити середні значення  $\langle l_x \rangle$  і  $\langle l_N \rangle$  із трьох значень  $l_x$  і  $l_N$  і результати занести в таблицю.
10. Визначити відносні й абсолютні похибки вимірів  $\Delta l_x$  і  $\Delta l_N$ , (№ дослідів 1,2,3).
11. Обчислити е.р.с., за формулою (8), використовуючи значення  $\langle l_x \rangle$  і  $\langle l_N \rangle$  , і результат занести в таблицю. Значення  $\epsilon_N$  надається на робочому місці.
12. Обчислити відносну й абсолютну похибки визначення е.р.с. невідомого джерела струму  $\epsilon_x$  для дослідів 1,2,3.
13. Повторити дії, зазначені в п.п. 2 – 12 з різними додатковими резисторами  $R_i$ . Дані внести в таблицю (№ дослідів 4 – 15).
14. Обчислити середнє значення  $\langle \epsilon_x \rangle$  з усіх визначених значень  $\epsilon_x$

№	$R_i$	$l_x$	$\langle l_x \rangle$	$l_N$	$\langle l_N \rangle$	$\epsilon_x$	$\langle \epsilon_x \rangle$
1	-						
2							
3							
4	$R_1$						
5							
6							
7	$R_2$						
8							
9							
10	$R_1+R_2$						
11							
12							
13	$\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$						
14							
15							

### Контрольні запитання

1. Що називається е.р.с. джерела струму ?
2. Які помилки у визначенні е.р.с. мають місце при вимірі її вольтметром ?
3. Пояснити суть методу компенсації за схемою.
4. Сформулювати закон Ома для однорідної і неоднорідної ділянок кола.
5. Одержати робочу формулу для обчислення е.р.с. досліджуваного елемента.
6. Пояснити якісний вплив додаткового опору  $R_i$  на зміну положення точки D на реостаті.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 32. Моделювання електричних полів за допомогою електролітичної ванни

Мета роботи – вивчення електростатичного поля заряджених тіл різної конфігурації, побудова еквіпотенціальних поверхонь для заданої конфігурації і розташування електродів, побудова сімейства силових ліній (ліній напруженості).

Силова взаємодія між будь-якими тілами не може відбуватися без участі матерії. Заряджені частинки і тіла, знаходячись на відстані, взаємодіють один з одним за посередництвом їхніх електричних полів, що являють собою один з видів матерії, які існують поряд з речовиною. Поле нерухомих зарядів називається електростатичним.

Електричне поле виявляє себе за силовою дією на заряди. Силовою характеристикою поля є напруженість  $\vec{E}$  - векторна величина, яка дорівнює відношенню сили, що діє з боку поля, на пробний заряд, який вміщено в дану точку, до значення цього заряду:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

Напруженість електричного поля вимірюється в  $\frac{Н}{Кл}$ , або  $\frac{В}{м}$ . Отже, на заряд, що знаходиться у точці з напруженістю  $\vec{E}$ , діє сила

$$\vec{F} = q\vec{E}.$$

Електричне поле прийнято зображувати графічно за допомогою ліній напруженості, тобто ліній, дотична до яких у кожній точці збігається з напрямком вектора  $\vec{E}$ . Кількість ліній напруженості, що пронизують уявну одиничну площадку, перпендикулярну до цих ліній, вибирається рівною модулю напруженості в даній точці. Лінії напруженості електричного поля починаються на позитивних і закінчуються на негативних зарядах або починаються і закінчуються в нескінченності, ніде не замикаються і не перетинаються.

Енергетичною характеристикою поля є потенціал. Потенціал – це скалярна фізична величина, що характеризує здатність поля виконувати роботу і вимірюється відношенням потенціальної енергії пробного точкового заряду, який вміщено в дану точку поля, до величини цього заряду. Можна також сказати, що потенціал даної точки поля дорівнює роботі, що виконана полем при переміщенні одиничного позитивного точкового заряду з цієї точки поля в нескінченність ( у ту область, де поле відсутнє):

$$\varphi = \frac{W_p}{q_0} = \frac{A}{q_0}.$$

Якщо заряд  $q$  переміщується з точки поля з потенціалом  $\varphi_1$  у точку з потенціалом  $\varphi_2$ , то сили поля виконують роботу

$$A = W_{p1} - W_{p2} = q(\varphi_1 - \varphi_2),$$

що дорівнює добутку заряду на різницю потенціалів  $\varphi_1 - \varphi_2$ .

В електричному полі можна побудувати поверхні, які є геометричним місцем точок з однаковим потенціалом – екіпотенціальні поверхні. Переміщення заряду уздовж цієї поверхні не супроводжується здійсненням роботи ( $\varphi = \text{const}$ ,  $d\varphi = 0$ ). Це означає, що сила, яка діє на заряд, увесь час перпендикулярна до переміщення. Отже, лінії напруженості перпендикулярні до екіпотенціальних поверхонь.

За одиницю потенціалу прийнятий вольт (В).

Дві основні характеристики електричного поля – напруженість  $\vec{E}$  і потенціал  $\varphi$  - зв'язані між собою. Це можна показати, якщо переміщувати позитивний точковий заряд  $q_0$  на малу відстань  $d\vec{l}$  із точки 1 у точку 2 ( див. рис.32.1 ) у полі з напруженістю  $\vec{E}$ . Через точки 1 і 2 проходять екіпотенціальні поверхні з потенціалами  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  (нехай  $\varphi_1 > \varphi_2$  ). Якщо переміщення  $d\vec{l}$  складає кут  $\alpha$  з напрямком вектора  $\vec{E}$ , то роботу  $dA$  можна виразити так:

$$dA = q_0 E dl \cos\alpha. \quad (1)$$

З іншого боку,

$$dA = -q_0 d\varphi, \quad (2)$$

де  $d\varphi$  - нескінченно мала зміна потенціалу.

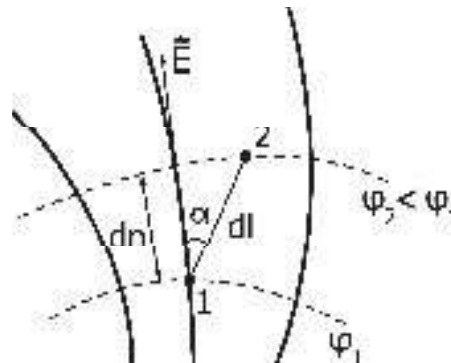


Рис. 32.1

Прирівнюючи вирази (1) і (2) для роботи і з огляду на те, що  $dl \cos\alpha = dn$  є найкоротша відстань між екіпотенціальними поверхнями, що вимірюється уздовж нормалі до них, тобто уздовж лінії напруженості, одержимо:

$$E = -\frac{d\varphi}{dn}. \quad (3)$$

Отже, модуль напруженості поля в даній точці визначається швидкістю падіння потенціалу уздовж лінії напруженості. Знак “-” показує, що вектор  $\vec{E}$  спрямований у бік убавання потенціалу. Величина  $\frac{d\varphi}{dn}$  називається градієнтом потенціалу.

У векторному вигляді зв'язок між напруженістю  $\vec{E}$  і потенціалом  $\phi$  можна записати так:

$$\vec{E} = -\text{grad}\phi. \quad (4)$$

Для однорідного поля вираз ( 4 ) набуває простого вигляду:

$$E = \frac{\phi_1 - \phi_2}{d}, \quad (5)$$

де  $d$  – відстань уздовж лінії напруженості між точками з потенціалами  $\phi_1$  і  $\phi_2$ .

### Метод вимірювання і опис установки

Експериментальне дослідження картини електростатичного поля в цій роботі здійснюється за допомогою установки, схематично зображеної на рис. 32.2.

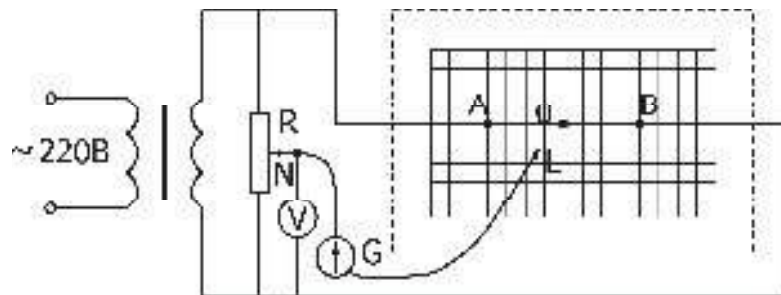


Рис. 32.2

В електродлітичну ванну, заповнену розчином слабкого електроліту (роль електроліту в роботі відіграє водопровідна вода), вміщуємо металеві моделі електродів A і B, картину поля яких необхідно вивчити. На електроди подається змінна напруга, щоб виключити ефекти електролізу і перекручування картини поля, що виникають при цьому.

У вимірювальну частину схеми входять: вимірювальний зонд, подільник напруги, вольтметр, що показує потенціал на зонді, і гальванометр, що реєструє струм. Зонд являє собою металевий провідник без ізоляції, розміри якого значно менші за розміри електродів. Зонд вноситься в досліджувану точку поля.

Якщо потенціал зонда, що встановлюється дільником напруги, не збігається з потенціалом досліджуваного поля, то гальванометр покаже струм, відмінний від нуля.

Переміщуючи зонд по координатній сітці площини електродлітичної ванни, можна знайти точки з потенціалом, що збігається з потенціалом зонда. Струм через гальванометр при цьому дорівнює нулю.

З'єднуючи плавною кривою точки з однаковими потенціалами, нанесеними на координатну сітку (аркуш міліметрового паперу) одержимо картину екіпотенціальних ліній, що є перетином дна електродлітичної ванни і екіпотенціальних поверхонь досліджуваної моделі електродів.

З огляду на те, що силові лінії в кожній точці поля перпендикулярні до

еквіпотенціальних поверхонь, можна побудувати картину поля за допомогою силових ліній (ліній напруженості). Для цього виберемо довільно на одному з електродів точку (наприклад, А). Проведемо через цю точку дотичну до металевої поверхні електрода (будь-яка металева поверхня є еквіпотенціальною). Встановимо перпендикуляр до дотичної у цій точці і продовжимо до перетину з наступною еквіпотенціальною лінією (точка В). Проводячи аналогічні геометричні побудови в інших точках еквіпотенціальних ліній, знаходимо напрямки ліній напруженості (силових ліній).

Середнє значення напруженості електричного поля  $\langle E \rangle$  можна визначити, використовуючи рівняння (5). Для цього треба виміряти відстань між точками з потенціалами  $\phi_A$  і  $\phi_B$ ,  $\phi_C$  і  $\phi_D$  і т.п., а різницю потенціалів легко визначити з отриманої картини поля.

### **Прилади і приладдя**

Джерело змінної напруги 30 В, подільник напруги (потенціометр), ламповий вольтметр, гальванометр (мікроамперметр), електролітична ванна з координатною сіткою, зонд, набір електродів, аркуш міліметрового паперу.

### **Порядок виконання роботи**

1. Приєднати електроди і зонд до клем, розташованих на лабораторному столі (конфігурацію електродів і їхнє розташування вказує викладач).
2. Перенести форму, розміри і розташування електродів з лабораторного макета на аркуш міліметрового паперу в повній відповідності з макетом.
3. Ввімкнути катодний вольтметр і установку.
4. Установити за допомогою потенціометра  $R$  потенціал зонда.
5. Визначити координати точок з однаковими потенціалами, переміщуючи зонд.
6. Нанести координати точок з однаковими потенціалами, переміщуючи зонд і нанести їх на аркуш.
7. Повторити дії, вказані в п. 4 - 5, для інших значень потенціалу, погоджених з викладачем.
8. З'єднати плавно точки з однаковими потенціалами еквіпотенціальними лініями.
9. Побудувати картину електричного поля за допомогою силових ліній поля.
10. Розрахувати середню напруженість поля  $E$  в деяких точках за погодженням з викладачем.

### **Контрольні запитання**

1. Що називається потенціалом (одиниці виміру в системі СІ)?
2. Дати визначення напруженості електричного поля (одиниці виміру в системі СІ).
3. Установити зв'язок між напруженістю поля і потенціалом.
4. Що називається градієнтом потенціалу? Як спрямований вектор градієнта потенціалу?
5. Довести ортогональність силових ліній і еквіпотенціальних поверхонь.



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 33.

### Визначення діелектричної проникності діелектриків

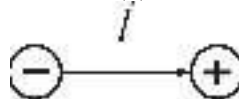
Мета роботи – визначення діелектричної проникності твердих діелектриків, вивчення залежності ємності конденсатора від різних діелектричних середовищ, що містяться між його пластинами, від відстані між пластинами.

Діелектрики – це речовини, в яких зовнішні електрони мають сильний зв'язок зі своїми атомами, і розірвати цей зв'язок складно. (Для цього треба або значно підняти температуру діелектрика, або піддати його якому-небудь випромінюванню). У звичайному стані в ідеальних діелектриках немає вільних зарядів, що можуть переміщуватися по об'єму діелектрика під дією зовнішнього електричного поля. Тому вони не проводять електричний струм.

Існують три групи діелектриків: полярні, неполярні діелектрики і так звані іонні кристали. Полярні діелектрики складаються з полярних молекул, неполярні – з неполярних молекул, а в іонних кристалах окремі молекули втрачають свою відокремленість. Гратку іонних кристалів можна розглядати як дві вставлені одна в одну ґратки, з яких одна створена позитивними, а друга – негативними іонами. Полярні молекули – це молекули, в яких центри розміщення позитивних і негативних зарядів при відсутності зовнішнього електричного поля не збігаються, тому їх можна вважати жорсткими діполями. Діполь – це система двох однакових за величиною, але протилежних за знаком зарядів  $q$ , що розташовані на відстані  $l$ . Електричним моментом діполя (діпольним моментом) називається вектор

$$\vec{p} = ql \vec{1}. \quad (1)$$

Він спрямований від негативного до позитивного заряду.



Прикладом полярних діелектриків є вода, оксид вуглецю, соляна кислота, спирти та ін.

Неполярні молекули – це молекули, в яких центри розміщення позитивних і негативних зарядів за відсутності зовнішнього електричного поля збігаються. Неполярні молекули не мають власного діпольного моменту. Прикладом неполярних діелектриків є парафін, бензол, газоподібні водень, кисень, азот та ін.

Прикладом іонних кристалів є хлорид натрію, хлорид калію та ін.

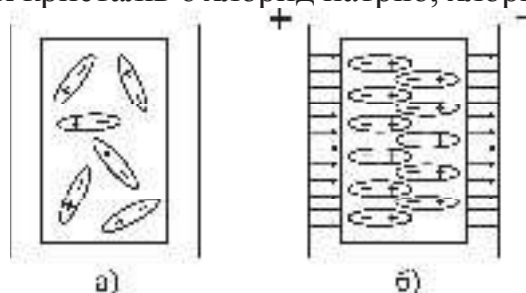


Рис. 33.1



Поляризація діелектрика – це процес придбання ним у всьому об’ємі електричного діпольного моменту при внесенні діелектрика в електричне поле. Цей процес відбувається неоднаково в трьох групах діелектриків. У полярних діелектриках – це поворот діполей (їх орієнтація) у напрямку зовнішнього електричного поля (рис. 33.1). У неполярних діелектриках – це зміщення позитивних зарядів у напрямку зовнішнього поля, а негативних – у протилежному напрямку. У кристалічних діелектриках, що мають іонну будову, - це зсув цілої ґратки позитивних іонів в один бік (по полю), а ґратки негативних іонів – у протилежному напрямку. Якщо не вдаватися у подробиці будови діелектриків, то кінцевий результат впливу зовнішнього електричного поля на них однаковий: придбання електричного діпольного моменту в усьому об’ємі діелектрика завдяки зміщенню у протилежних напрямках позитивних і негативних зарядів, тобто поляризація.

Орієнтації діполей заважає тепловий рух молекул, але чим нижче температура, тим сильніша орієнтація молекул, що викликається цим полем. При постійній температурі орієнтація тим сильніша, чим більше поле. У результаті поляризації діполей на поверхню діелектрика, що обернена до позитивної пластини конденсатора, виступають негативні кінці діполей, а на протилежну поверхню – позитивні (рис. 33.1, а, б). Ці заряди називаються поляризаційними. При поляризації загальний заряд діелектрика не змінюється. Заряди, що виступають на поверхні діелектрика, є зв’язаними зарядами, тобто вони не можуть переміщуватися по діелектрику.

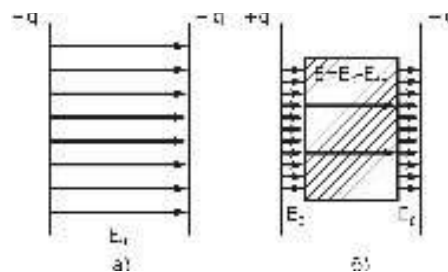


Рис. 33.2

На рис. 33.2 зображено силові лінії електричного поля плоского конденсатора: а) між пластинами – вакуум, б) між пластинами вміщено діелектрик. З цього рисунка видно, що поряд з полем, яке утворюється зарядженими пластинами конденсатора (а)  $\vec{E}_0$  зв’язані заряди, в свою чергу, утворюють своє електричне поле  $\vec{E}_{\text{вн}}$ , спрямоване в протилежний бік. Таким чином, за принципом суперпозиції поле в середині діелектрика ослаблюється і дорівнює:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_{\text{вн}} ; \quad (2)$$

$$E = E_0 - E_{\text{вн}} . \quad (3)$$

Кількісною характеристикою ступеня поляризації є сумарний електричний момент одиниці об’єму діелектрика, що називається

поляризованістю діелектрика:

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_i}{\Delta V}, \quad (4)$$

де  $\sum_i \vec{p}_i$  - сума електричних дипольних моментів усіх молекул в об'ємі  $\Delta V$ .

При відсутності зовнішнього електричного поля сумарний електричний момент діелектрика будь-якого типу дорівнює нулю (для неполярних діелектриків електричний момент кожної молекули дорівнює нулю, а для полярних – їх орієнтація неупорядкована, тому сума теж дорівнює нулю).

В ізотропних діелектриках будь-якого типу поляризованість зв'язана з напруженістю електричного поля  $\vec{E}$  співвідношенням

$$\vec{P} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (5)$$

де  $\varepsilon_0$  - електрична стала;  
 $\varepsilon$  - діелектрична сприйнятливість.

Величина  $\varepsilon = 1 + \varepsilon$  називається діелектричною проникністю речовини, яка завжди більша за одиницю, тому що  $\varepsilon > 0$  (або  $\varepsilon > 1$ , тому що  $\varepsilon > 0$ ).

Фізичний зміст діелектричної проникності полягає в тому, що вона показує, у скільки разів напруженість електричного поля в однорідному ізотропному середовищі менше, ніж напруженість у вакуумі:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E} = \frac{E_0}{E - E_{\text{вн}}}. \quad (6)$$

Значення  $\varepsilon$  різні для різних діелектриків. Наприклад, для парафіна  $\varepsilon = 2$ , для чистої води  $\varepsilon = 81$ , для повітря  $\varepsilon = 1,00059$ .

Електроємністю відокремленого провідника називають коефіцієнт пропорційності між його зарядом і потенціалом:

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (7)$$

Конденсатор являє собою систему двох провідників, розміщених близько один від одного. Ці провідники називаються обкладками конденсатора. Ємність конденсатора дорівнює:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}. \quad (8)$$

Величина ємності конденсатора визначається геометрією обкладок (плоский, циліндричний, сферичний конденсатор), їх розташуванням, розмірами, відстанню між ними і діелектричними властивостями середовища, що заповнює простір між обкладками.

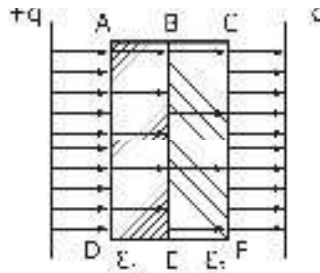


Рис. 33.3

Якщо діелектрик, що міститься між обкладками конденсатора, неоднорідний (але ізотропний), то електричне поле в ньому буде ослаблюватися по-різному. На рис. 33.3 зображено плоский конденсатор з діелектриком, що складається з двох паралельних пластин з різними  $\epsilon$ .

Зв'язані заряди в цьому випадку виникають не тільки на поверхнях AD і CF, але і на поверхнях BE. Таким чином цей конденсатор можна розглядати як два (у даному випадку) конденсатори, з'єднаних послідовно. Вони мають однакову площу пластин  $S$ , а відстань між ними в кожного дорівнює товщині відповідного діелектрика  $d_i$ . Тоді загальна ємність може бути визначена як

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{C_i}, \quad (9)$$

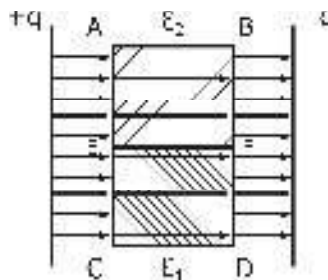


Рис. 33.4

$$\text{де } C_i = \frac{\epsilon_i \epsilon_0 S}{d_i}.$$

Якщо діелектричні пластини розміщено, як показано на рис.33.4, то в цьому випадку на межі EF зв'язані заряди не виникають. Такий конденсатор можна розглядати як два (відповідно до рисунка) конденсатори, що з'єднані паралельно, причому площа пластин кожного дорівнює відповідно площі перекривання пластин даним діелектриком, а відстань між пластинами однакова і дорівнює товщині діелектриків  $d$ :

$$C = \sum_{i=1}^N C_i, \quad (10)$$

$$\text{де } C_i = \frac{\epsilon_i \epsilon_0 S_i}{d}.$$

### Метод вимірювання і опис установки

Відомо, що ємність плоского конденсатора визначається за формулою

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}. \quad (11)$$

Якщо виміряти ємність конденсатора  $C$  з внесеним в нього діелектриком і визначити відстань  $d$  між його пластинами, то, знаючи ємність  $C_0$  конденсатора з повітряним зазором і такою ж відстанню між пластинами  $d$ , можна обчислити діелектричну проникність  $\epsilon$  за формулою

$$\epsilon = \frac{C}{C_0}. \quad (12)$$

Ємність конденсатора вимірюють приладом, що називається мостом змінного струму. Правила користування мостом змінного струму додаються до лабораторної установки.

У роботі використовується плоский конденсатор зі змінною відстанню  $d$  між пластинами. Механізм зміни відстані містить у собі мікрометричний гвинт. Обертаючи гвинт, можна змінювати відстань  $d$  між пластинами конденсатора.

### Прилади і приладдя

Плоский конденсатор змінної ємності з мікрометричним гвинтом, міст змінного струму, набір діелектричних пластин.

### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з лабораторною установкою і правилами користування мостом змінного струму.
2. Виміряти ємність конденсатора з повітряним зазором між пластинами для ряду значень  $d$  і занести дані в таблицю (значення  $d$  погодити з викладачем). Вимірювання повторюють ще два рази для зменшення випадкових похибок.
3. За одержаними даними побудувати графік залежності  $C_0 = f(d)$ .
4. Помістити між пластинами конденсатора твердий діелектрик, встановити відстань  $d$ , що дорівнює товщині діелектрика.
5. Виміряти цю відстань і ємність конденсатора з діелектриком (вимірювання повторити ще два рази).
6. Повторити п.4 і 5 для інших типів діелектриків.
7. За графіком п.3 визначити ємність повітряного конденсатора з тією ж відстанню  $d$  між пластинами, що і для конденсатора з діелектриком.
8. Визначити для кожного діелектрика  $\epsilon$  за формулою (12).
9. Виміряти ємність конденсатора з діелектриками, що в різних варіантах вміщуються між його пластинами (за вказівкою викладача).
10. За формулами (9), (10) зробити розрахунок ємності конденсатора з різними комбінаціями діелектриків і порівняти з даними п.9.

Ємність конденсатора С ( $10^{-4}$ мкФ)													
з повітряним зазором, $C_0$											з діелектриком, С		
											№1	№2	№3
d(мм)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1													
2													
3													
<C>													
$\epsilon$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			

### Контрольні запитання

1. Який фізичний зміст діелектричної проникності ?
2. Види діелектриків і поведження їх у зовнішньому електричному полі.
3. Що таке поляризація діелектрика?
4. Ємність конденсатора, одиниці вимірювання.
5. Від яких фізичних величин залежить ємність конденсатора?
6. Вивести робочу формулу для визначення  $\epsilon$  .
7. Послідовне і паралельне з'єднання конденсаторів.
8. Нарисувати силові лінії електричного поля в конденсаторі, якщо в нього вміщено ізотропний діелектрик.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 34.

### Розрахунок розгалуженого електричного кола і його експериментальна перевірка

Мета роботи - розрахунок конкретного електричного кола на базі рівнянь Кірхгофа, подальша експериментальна перевірка цього розрахунку.

Розрахунок електричного кола складається з визначення струмів, що протікають крізь усі його елементи (знаючи струми і опори елементів, можна визначити інші електричні характеристики: падіння напруги на елементах, потужності, що виділяються в елементах, тощо).

Повне дослідження процесів у складних електричних колах проводиться з використанням двох правил Кірхгофа, що базуються на законі Ома і законі збереження заряду. В даній роботі будуть розглянуті лінійні електричні кола постійного струму.

Перша система рівнянь Кірхгофа зв'язує між собою струми, що сходяться в якійсь вузловій точці кола:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (1)$$

У цій системі струмам, що приходять до вузлової точки, надається позитивний знак, а тим, що виходять, - негативний (таке правило знаків не є обов'язковим, потрібно тільки дотримувати угоду про те, щоб усі струми, що входять у вузол, мали один знак, а струми, що виходять із вузла, - протилежний знак).

Вузлом схеми називають її довільну точку, в якій сходяться більше двох гілок.

Під гілкою розуміють довільну нерозгалужену ділянку кола, що з'єднує два яких-небудь вузли схеми.

Друга система рівнянь Кірхгофа складена для будь-яких замкнених контурів кола на базі рівності суми падінь потенціалу на відповідних ділянках кола сумі електрорушійних сил, що зустрічаються в цьому контурі:

$$\sum_{k=1}^i I_k R_k = \sum_{k=1}^l \epsilon_k. \quad (2)$$

У цій системі рівнянь струми з довільно заданими напрямками входять у суму зі знаком плюс, якщо напрямки збігаються з довільно обраним напрямком обходу контуру, якщо не збігаються – зі знаком мінус. Електрорушійні сили мають позитивний знак, якщо вони підвищують потенціал у напрямку обходу контура.

Ця система рівнянь має складатися з лінійно незалежних рівнянь, тому кількість рівнянь, зіставлених з використанням першого правила Кірхгофа, має бути на одиницю меншою за кількість вузлів системи.

Рівняння на основі другого правила Кірхгофа треба скласти тільки для незалежних контурів (два або декілька контурів називають незалежними, якщо кожний з них містить хоча б один елемент (гілку), що не входить в інші контури, або якщо вони відрізняються хоча б одним елементом).

Розрахунок електричних кіл рекомендується проводити за таким алгоритмом:

- 1) на схемі довільно вказати стрілками напрямок струмів у відповідних гілках схеми і пронумерувати їх;
- 2) обрати напрямок обходу контурів;
- 3) скласти рівняння на основі першого правила Кірхгофа (алгебраїчна сума струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює нулю);
- 4) недостатні для повноти системи рівняння скласти на основі другого правила Кірхгофа (у будь-якому замкненому контурі алгебраїчна сума падінь потенціалів на окремих ділянках кола дорівнює алгебраїчній сумі е.р.с., що зустрічаються в цьому контурі). При цьому, обходячи контур у довільному напрямку, вважати позитивними ті струми і падіння напруги, напрямом яких збігається з напрямком обходу, і негативними ті, напрямом яких протилежний напрямку обходу. Позитивними вважати ті е.р.с., що підвищують потенціал у напрямку обходу, тобто е.р.с. буде позитивною, якщо при обході треба йти від мінуса до плюса всередині джерела е.р.с.;
- 5) розв'язати отриману систему рівнянь і проаналізувати одержаний результат.

#### П Р И К Л А Д

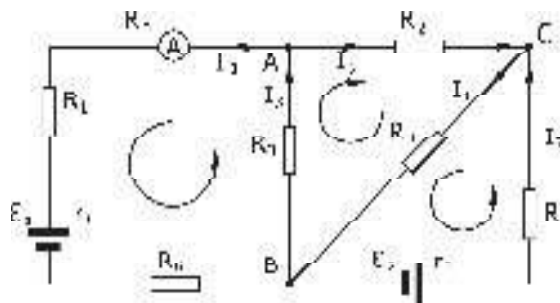


Рис. 34.1

Перше правило Кірхгофа для вузлів А і С (рис. 34.1):

$$-I_1 - I_2 + I_3 = 0 \quad , \quad (A)$$

$$+I_2 - I_4 + I_5 = 0 \quad . \quad (C)$$

Друге правило Кірхгофа для трьох незалежних контурів:

$$I_1 R_1 + I_1 R_6 + I_1 R_A + I_1 r_1 + I_3 R_3 = -\varepsilon_1,$$

$$I_2 R_2 + I_3 R_3 + I_4 R_4 = 0,$$

$$I_5 R_5 + I_5 r_2 + I_4 R_4 = \varepsilon_2.$$



Рівняння незалежні, система повна.

Як правило, внутрішні опори е.р.с. малі і їх можна не враховувати:

$$r_1 = r_2 = 0.$$

У результаті розв'язання складених рівнянь визначені величини можуть бути від'ємними. Якщо визначаються струми, то від'ємне значення вказує лише на те, що фактичний напрямок струму обернений до напрямку стрілки на рисунку. Якщо ж визначаються опори, то від'ємне значення вказує на неправильний результат.

При цьому слід згадати, що рівняння Кірхгофа є основою розрахунку і нелінійних кіл разом з вольт–амперними характеристиками нелінійних елементів.

### **Опис установки**

Лабораторна установка складається з декількох джерел живлення, набору резисторів, з'єднувальних провідників, які необхідно з'єднати за схемою, що задається викладачем.

### **Прилади і приладдя**

Набір резисторів, джерела живлення, вимірювальний прилад, набір з'єднувальних провідників.

### **Порядок виконання роботи**

1. Одержати у викладача завдання на складання конкретної електричної схеми.
2. Виміряти опори і е.р.с. джерел і опори резисторів. Дані показати викладачеві.
3. Зіставити коло за заданою схемою.
4. Виміряти падіння напруги на кожному резисторі і визначити напрямок струмів за схемою. Дані показати викладачеві.
5. Використовуючи правила Кірхгофа, за відомими опорамі і е.р.с. обчислити струми в кожному з резисторів і падіння напруги. Порівняти з експериментальними даними.

### **Контрольні запитання**

1. Дати визначення вузла, незалежних контурів електричного кола.
2. Сформулювати перше і друге правила Кірхгофа.
3. Яка сутність правил Кірхгофа?
4. Пояснити сенс від'ємного значення струмів, одержаних при розв'язанні системи рівнянь.
5. Скласти запропоновану викладачем систему рівнянь для визначення струмів у розгалуженому електричному колі, користуючися правилами Кірхгофа.



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 35.

### Дослідження роботи трьохелектродної електронної лампи

Мета роботи – зняття вольт-амперних (анодних і сіткових) характеристик трьохелектродної лампи і визначення її основних параметрів.

Вольт-амперною характеристикою називається залежність струму від напруги.

Трьохелектродна електронна лампа (тріод) являє собою скляний балон з трьома електродами (катод, анод і сітка), що знаходяться в середині балону, з якого ретельно викачане повітря (тиск складає мільйонні частки мм.рт.ст). При цьому створюють таку форму електродів і їхнє розміщення, щоб при невеликих змінах напруги між катодом і керуючим електродом (сіткою) одержувати різкі й великі зміни величини анодного струму, що проходить крізь лампу. З цією метою анод (3) і сітку (2) виконують у вигляді коаксіальних циліндрів, а розжарюючий катод (1) – уздовж осі циліндра. Сітка має вигляд гвинтової лінії з досить великим кроком, щоб надати можливість електронам, що вилітають з поверхні катода, пройти до анода і створити анодний струм (див. рис. 35.1). Катод робиться або у вигляді нитки, або теж у вигляді циліндра. Від кожного електрода назовні виведені контакти в цоколь лампи для включення тріода в електричне коло. Такі тріоди використовуються в лампових генераторах і підсилювачах змінного струму. Пізніше на зміну їм прийшли сучасні напівпровідникові прилади.

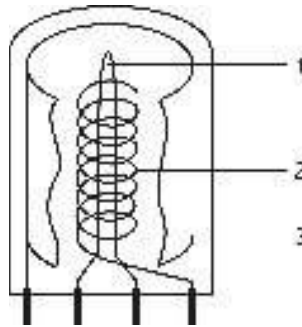


Рис. 35.1

Однак тріоди продовжують використовуватися в електроніці, там, де потрібна особлива надійність, знаходять застосування в навчальному лабораторному практикумі для вивчення термоелектронної емісії, що лежить в основі роботи всіх пристроїв, де створюється електричний струм у вакуумі (вакуумні діоди і тріоди, електронно-променеві трубки, прискорювачі та ін.) чи в газі (газорозрядні трубки).

Термоелектронна емісія – це випускання електронів з поверхні нагрітих твердих чи рідких тіл. Для нагрівання катода використовується нитка розжарювання, що вводиться у середину катода.

Найменша температура катода, при якій починається досить інтенсивна емісія, складає приблизно  $1000\text{ C}^0$ , але вимагає спеціального покриття поверхні катода (плівки торію, цезію, барію, окисів деяких металів).

Число електронів, що вилітають щомиті з розжареного катода, визначається його площиною, матеріалом і залежить від температури. Однак при відсутності електричного поля між катодом і анодом електрони, що випускаються, не досягають анода, а оточують його у вигляді хмари. При позитивному потенціалі на аноді електричне поле буде прискорювати електрони, вони рухатимуться до анода і крізь лампу піде струм, величина якого зростатиме зі збільшенням різниці потенціалів між катодом і анодом. Починаючи з деякого значення напруги на аноді, подальше зростання сили струму взагалі припиняється, тобто струм досягає насичення. Це обумовлено тим, що всі електрони, які випускаються катодом, досягають анода.

Важливо знати, що струм, величина якого перестає залежати від напруги, є струмом насичення. У лампах з оксидним катодом досягти насичення не можна, тому що при великих значеннях напруги відбувається руйнування катода.

Якщо аноду надати негативний потенціал, а катоду позитивний, то електрони під дією сил електричного поля будуть відштовхуватися від анода, і струму в лампі не буде.

У тріоді при анодному потенціалі  $U_A$  і постійній температурі катода сила струму в колі анода істотно залежить від потенціалу на сітці  $U_C$ . Сітка розташована ближче до катода, ніж анод, тому її поле більше впливає на потік електронів. При позитивному потенціалі на сітці її поле складається з полем анода, і потік електронів буде прискорюватися сильніше, анодний струм дуже швидко зростатиме. При деякому негативному потенціалі на сітці її поле гальмує електрони, анодний струм зменшується, і можна знайти такий негативний потенціал, при якому жоден електрон, що випускається катодом, не досягне анода, незважаючи на те, що на аноді потенціал буде позитивним. Найменша негативна напруга на сітці лампи, при якій лампа перестає проводити струм, – замикаюча напруга.

### **Зняття вольт-амперних характеристик, визначення параметрів трьохелектродної лампи**

Знаючи дві сіткові характеристики, зняті при двох різних анодних напругах  $U_{A1}$ ,  $U_{A2}$ , можна визначити параметри лампи, тобто величини, що характеризують її якість і властивості. Анодний струм тріода при постійній температурі катода є функцією напруги на сітці й аноді лампи. Таким чином, у тріоді анодний струм буде функцією двох напруг  $I_A = f(U_A, U_C)$ , що можуть змінюватися незалежно одна від одної. Тому можна вивчати залежності:

$I_A = f(U_A)$  при  $U_C = \text{const}$  – анодна характеристика;

$I_A = f(U_C)$  при  $U_A = \text{const}$  – сіткова характеристика.

Сімейства анодних і сіткових характеристик лампи подано на рис. 35.2 і 35.3.

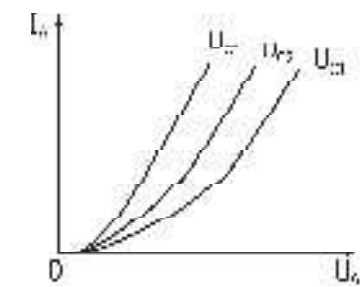


Рис. 35.2

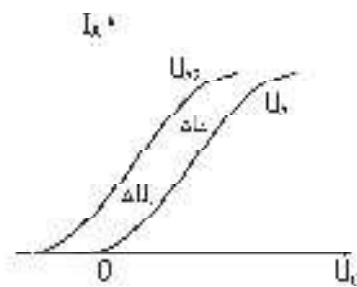


Рис. 35.3

Існують три важливих параметри електронної лампи: внутрішній опір  $R_i$ , крутість сіткової характеристики  $S$  і коефіцієнт посилення лампи  $\mu$ .

Внутрішній опір визначається як відношення приросту анодної напруги до викликаного ним приросту анодного струму (при сталій напрузі на сітці лампи):

$$R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} \quad \text{при } U_C = \text{const} \quad (1)$$

Крутість сіткової характеристики (крутість лампи) визначається як тангенс кута нахилу характеристики:

$$S = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_C} \quad \text{при } U_A = \text{const} \quad (2)$$

Крутість сіткової характеристики називають ще провідністю лампи по сітці.

Коефіцієнт підсилення  $\mu$  дорівнює відношенню зміни анодної напруги  $\Delta U_A$  до зміни напруги на керуючій сітці  $\Delta U_C$ , що спричиняють ту ж саму зміну анодного струму:

$$\mu = \frac{\Delta U_A}{\Delta U_C} \quad \text{при } I_A = \text{const}. \quad (3)$$

Величина, обернена до коефіцієнта підсилення, називається проникністю лампи:

$$D = \mu^{-1} .$$

Коефіцієнт підсилення лампи  $\mu$  показує, в скільки разів напруга прикладена до сітки, діє сильніше на анодний струм, ніж та ж напруга, прикладена до анода.

Зв'язок між цими параметрами лампи визначається формулою

$$\frac{R_i S}{\mu} = 1 \quad (4)$$

Для визначення параметрів лампи методом трьох точок треба на прямолінійній ділянці двох сіткових або анодних характеристик побудувати

характеристичний трикутник ABC (рис.35.2, 35.3). Сторона АВ визначає зміну напруги на аноді лампи  $\Delta U_A$  (рис.35.2) або на сітці  $\Delta U_C$  (рис.35.3), BC – зміну анодного струму  $\Delta I_A$ .

### Опис лабораторної установки

Схему лабораторного макета показано на рис.35.4.

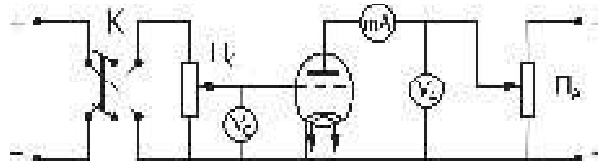


Рис. 35.4

Перемикач К дозволяє змінювати полярність напруги  $U_C$ , що подається на сітку від дільника напруги  $P_C$ . Анодна напруга  $U_A$  до лампи подається і регулюється потенціометром  $P_A$  і вимірюється вольтметром  $V_A$ .

Міліамперметр mA визначає анодний струм лампи  $I_A$ . Підігрів катода здійснюється ниткою розжарювання, до якої підводиться змінна напруга 6,3В.

### Прилади і приладдя

Універсальне джерело струму, трьохелектродна лампа, 2 вольтметри і міліамперметр, потенціометри.

### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися зі схемою експериментальної установки на лабораторному столі.
2. Одержати завдання на виконання лабораторної роботи, значення напруг  $U_A$  і  $U_C$  у викладача і ввімкнути установку.
3. Зняти анодні характеристики тріода при заданих постійних напругах на сітці лампи  $U_C$ . Дані записати в табл. 1. Побудувати сімейство анодних характеристик, відкладаючи вздовж осі x значення  $U_A$  у вольтах, а вздовж осі y – значення  $I_A$  у міліамперах.
4. Зняти сіткові характеристики при заданих значеннях анодної напруги, отриманих у викладача. Дані записати в табл. 2.
5. Побудувати сімейство сіткових характеристик.
6. Для прямолінійних ділянок отриманих характеристик визначити, користаючись співвідношеннями (1), (2), (3), параметри  $R_i, S, \mu$ . Перевірити співвідношення (4).
7. Визначити абсолютні похибки розрахунку параметрів  $R_i, S, \mu$ .

Таблиця 1

Анодні характеристики									
Анодний струм $I_A$ , mA									
$U_A$ , В	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$U_C =$									
$U_C =$									

Таблиця 2

Сіткові характеристики									
Анодний струм $I_A$ , mA									
$U_c$ , В	-4	-2	0	2	4	8	12	16	20
$U_A =$									
$U_A =$									

### Контрольні запитання

1. Які будова і принцип дії вакуумного тріода?
2. У чому суть явища термоелектронної емісії?
3. Що таке струм насичення?
4. Що називається анодною і сітковою характеристиками лампи?
5. Яка роль негативного об'ємного заряду ("електронної хмари")?
6. Яка умова попадання електронів на анод ?
7. Дати визначення і пояснити фізичний зміст основних параметрів лампи.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 36.

### Дослідження електричного струму в напівпровідниках

Мета роботи – зняття вольт-амперної характеристики напівпровідникового діода; визначення залежності опору діода і коефіцієнта випрямлення від напруги; вивчення роботи діода з випрямлення змінного струму в схемах одно- і двопівперіодного випрямлення.

Напівпровідниками називають речовини, які залежно від зовнішніх впливів (температури, домішок, опромінення та ін.) є або провідниками, або діелектриками. У напівпровідників провідність зростає зі збільшенням температури, а у металів зменшується.

Кожному валентному електрону кристала, згідно з квантовою теорією, відповідає певне значення енергії (рівень на енергетичній діаграмі). Сукупність рівнів енергії валентних електронів однорідного кристала утворює на енергетичній діаграмі напівпровідника валентну зону – зону дозволених рівнів (або просто: дозволена зона), які можуть бути зайняті електронами повністю або частково (це залежить від будови атомів певної речовини і взаємодії атомів в кристалі).

Кількість енергетичних рівнів у валентній зоні дорівнює  $N/2$ , якщо кристал містить  $N$  атомів. Оскільки в реальних кристалах кількість атомів дуже велика ( $\sim 10^{23} \text{ см}^{-3}$ ), то енергетична різниця між сусідніми рівнями в зоні зовсім мала ( $\ll kT$ ). Навіть при такій великій ширині зони як 10 еВ ця різниця має порядок  $10^{-22}$  еВ для  $1 \text{ см}^3$  кристала.

Далі ми розглянемо спрощену схему розташування вказаних вище зон і заповнення їх електронами. При цьому слід пам'ятати дві важливі речі: 1) система енергетичних рівнів знаходиться не в звичайному просторі, де одиницями виміру відстані є метр, сантиметр та ін., а в енергетичному просторі, де відстані між рівнями вимірюються в одиницях енергії (Дж, еВ та ін.); 2) принцип Паулі, за яким кожний квантовий стан може бути зайнятий не більш ніж одним електроном. Підвищення енергії електронів при цьому означає переміщення їх з одного рівня на інший, більш високий, рівень енергії.

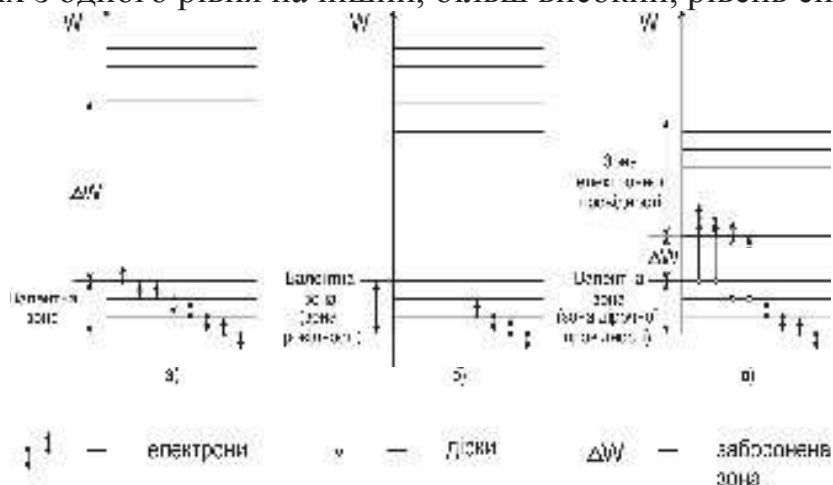


Рис .36.1

На рис. 36.1 горизонтальними лініями показано енергетичні рівні, які складають валентну зону і наступну за нею вільну від електронів зону. Між ними знаходиться заборонена зона з шириною  $\Delta W$ . На зайнятих електронами рівнях позначено два електрони чорними кружками зі стрілками. Це не суперечить принципу Паулі, тому що при однаковій енергії електрони мають різні проекції власних орбітальних моментів (спинів), тобто знаходяться у різних квантових станах, на що вказують протилежні напрямки стрілок.

На рис. 36.1 зображено три випадки:

1. У валентній зоні, де знаходяться електрони, всі рівні зайняті. Ширина забороненої зони велика:  $\Delta W \gg kT$  (рис. 36.1,а). У цьому випадку під дією електричного поля і підвищення температури (якщо ці дії не занадто великі) підвищення енергії, а, отже, і рух електронів неможливі – надто велика ширина забороненої зони (відстань до наступної вільної зони). Це – діелектрики.

2. У валентній зоні зайнята лише частина рівнів, при низьких температурах – нижня. Електрони, що розташовані поблизу вакантних рівнів, можуть легко переходити до них під дією дуже маленького електричного поля. Ця зона зветься зоною провідності, а кристал є провідником (рис. 36.1,б). Для різних металів є інші розташування валентних зон (наприклад, їх перекриття), але принцип виникнення електричного струму в них залишається тим самим, що і в спрощеному варіанті.

3. Картина зайнятих і вільних від електронів рівнів та сама, що і у діелектриків, тільки ширина забороненої зони  $\Delta W$  маленька настільки, що при невеликому збільшенні температури електрони заповненої валентної зони одержують енергію, якої достатньо для подолання забороненої зони і переходу до вільних рівнів наступної зони (рис. 36.1,в). Кількість електронів, що переходять, а, отже, і величина електричного струму сильно збільшуються при підвищенні температури. Це – напівпровідники. Вільна зона, в яку переходять електрони, називається зоною електронної провідності, а валентна зона, яку електрони залишають, - зоною дірочної провідності. Діркою умовно називають вакантне місце, яке звільняє електрон. Їй приписують позитивний заряд. Перехід електронів із заповненої зони у вільну зону супроводжується переміщенням дірок, що обумовлює дірочну провідність. На рис. 36.1,в дірки позначені прозорими кружками. Звичайно, справжніми носіями електричних зарядів у напівпровідниках (як і в металах) є реальні електрони, а не формально введені дірки.

Провідність  $\sigma$  чистих (без сторонніх домішок) напівпровідників, обумовлену підвищенням температури, називають власною провідністю. У першому наближенні для невеликого інтервалу температур вона, таким чином, залежить від абсолютної температури  $T$  :

$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta W}{2kT}},$$

де  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К (стала Больцмана);

$\sigma_0$  – стала величина, яка залежить від конкретного напівпровідника.



Ніякої якісної відміни між діелектриками і напівпровідниками при низьких температурах немає. Є тільки кількісна – ширина забороненої зони. Умовно до діелектриків багато дослідників відносять речовини, в яких ширина забороненої зони більше 2 eВ. До напівпровідників відноситься широкий клас речовин: більшість елементів IV, V і VI груп періодичної системи Менделєєва (вуглець у вигляді графіту, бор, кремній, германій, фосфор, миш'як, селен, сурма, телур, йод та ін.); багато сплавів, солей; велика кількість неорганічних сполук.

Окрім власної провідності існує домішкова провідність напівпровідників. Вона виникає при введенні в кристалічну ґратку чистої речовини атомів інших речовин, а також при порушеннях власної кристалічної ґратки. Оскільки електричний струм виникає при дуже маленьких кількостях цих атомів або порушеннях власної ґратки, їх в обох випадках для стислості називають домішками.

У свою чергу, домішкова провідність може бути двох видів: донорна (n-типу) і акцепторна (p-типу).

Донорна провідність виникає у випадку, коли атоми домішки мають валентність вище ніж атоми основної речовини, а енергетичні рівні валентних електронів домішки розташовуються в забороненій зоні напівпровідника близько до вільної зони (нижче неї). Під дією зовнішнього електричного поля електрони з домішкового рівня легко переходять на рівні вільної зони, створюючи електричний струм (рис.36.2,а). Прикладом є чотиривалентний напівпровідник германій, в якому деякі атоми замінені атомами п'ятивалентної сурми.

Акцепторна провідність виникає у випадку, коли атоми домішки мають валентність менше ніж атоми основної речовини, а домішкові рівні розташовані в забороненій зоні дуже близько до валентної зони, яка зайнята електронами, але вище неї. Під впливом зовнішнього електричного поля електрони з валентної зони основної речовини легко переходять на вільні рівні акцепторної домішки, створюючи у валентній зоні так звані позитивні дірки (рис.36.2, б). Оскільки вони, знаходячись в енергетичному спектрі основної речовини, володіють більшою рухливістю, ніж електрони в акцепторній домішці, така провідність називається дірочною, або p-типу (позитивною). Прикладом є той самий германій з домішкою тривалентного індію, який намагається приєднати до себе четвертий електрон із ґратки германію.

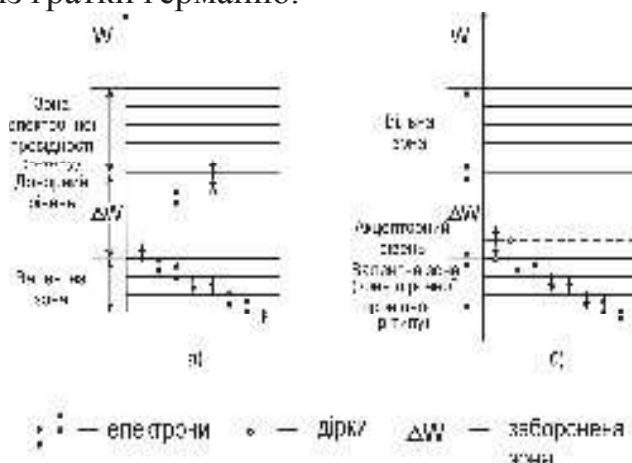


Рис. 36.2



Велике практичне значення мають з'єднання напівпровідників двох типів:  $n$  і  $p$ . Таке з'єднання називається напівпровідниковим діодом і може використовуватися як випрямляч змінного струму.

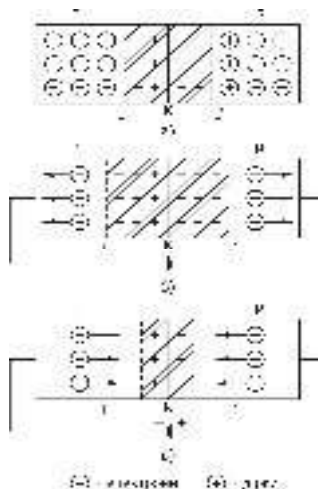


Рис. 36.3

Розглянемо явища, які відбуваються в місці контакту  $K$  двох провідників  $n$ - і  $p$ -типу (рис. 36.3,а). Внаслідок теплового руху через місце контакту відбувається дифузія електронів і дірок. Напівпровідник  $n$ -типу втрачає електрони і тому заряджається позитивно. Водночас напівпровідник  $p$ -типу заряджається негативно. Поблизу межі поділу  $K$  утворюється подвійний електричний шар  $LL'$ , який створює контактне електричне поле, що перешкоджає дальшій одnobічній дифузії електронів у напрямі  $n \rightarrow p$  і дірок у протилежному напрямі. Концентрація носіїв струму в контактному шарі внаслідок їх рекомбінації набагато менша, ніж в об'ємі напівпровідника, тому цей шар називають *запірним*.

Прикладемо до контакту  $p$ - $n$  напівпровідників зовнішнє електричне поле так, щоб струм проходив від напівпровідника  $p$ -типу до напівпровідника  $n$ -типу (рис. 36.3,б). Дірки і електрони почнуть переміщуватися в напрямі до контакту. Опір запірного шару внаслідок збільшення концентрації носіїв струму зменшиться, і через контакт піде більший струм. Цей напрям струму називається *прямим*.

Прикладемо до контакту  $p$ - $n$  напівпровідників зовнішнє електричне поле в напрямі від напівпровідника  $n$ -типу до напівпровідника  $p$ -типу (рис.36.3,в). Під дією зовнішнього поля дірки і електрони рухатимуться вглиб відповідних напівпровідників, зона запірного шару збільшиться, а тому зросте і його опір. Сила струму, що проходить через контакт, зменшиться. Такий зворотній напрям струму називається *запірним*. На цих властивостях  $p$ - $n$  переходу ґрунтується дія напівпровідникового діода. Здатність напівпровідникового діода проводити струм в одному напрямку краще, ніж в іншому, обумовлює його застосування для випрямлення змінного струму. На рис. 36.4 зображено типову залежність струму (він проходить через  $p$ - $n$  перехід) від прикладеної

напруги, так звану вольт-амперну характеристику діода. З рис. 36.4 видно, що при  $U > 0$  (прямий напрям) опір переходу незначний і струм різко зростає; при  $U < 0$  (зворотній напрям) опір великий і струм практично залишається незмінним до деякого значення  $U_0$ , при якому струм різко зростає. Така напруга називається *пробивною*.

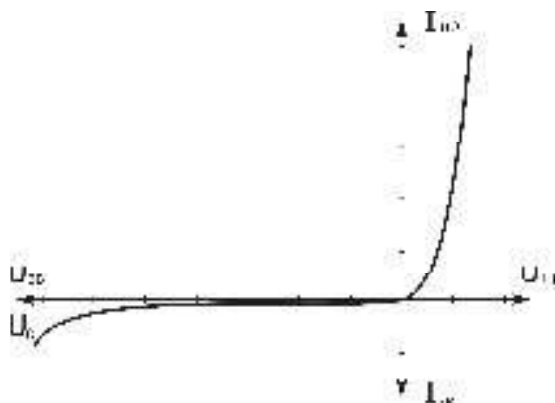


Рис. 36.4

Властивості напівпровідникового діода, який є випрямлячем, характеризуються коефіцієнтом випрямлення, що дорівнює відношенню струмів, прямого до зворотного, які вимірюються при однакових за величиною прямій і зворотній напругах:

$$K = \frac{I_{пр}}{I_{зв}} \quad (\text{при } |U_{пр}| = |U_{зв}|). \quad (1)$$

Опір напівпровідникового діода  $R$  також є його характеристикою. Його можна визначити із закону Ома за формулою

$$R = \frac{U}{I}, \quad (2)$$

де  $U$  – напруга;

$I$  – сила струму.

На рис. 36.5 зображено типову залежність опору діода в прямому і зворотному напрямках від прикладеної напруги.

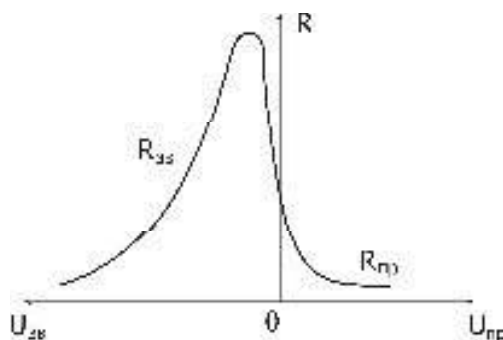


Рис. 36.5

Діоди для випрямлення промислового струму виготовляють з напівпровідників, що мають великий опір (германій, кремній, селен, а також

закис міді  $\text{Cu}_2\text{O}$ ). Найефективнішими є германієві та кремнієві діоди, ККД яких досягає 98%, і селенові – 70%.

### Опис вимірювальної схеми і приладів

Напруга на селеновий напівпровідниковий діод подається з дільника напруги  $R$  і вимірюється вольтметром  $V$  (рис. 36.6). Струм крізь селеновий стовпчик вимірюється міліамперметром у прямому напрямку і мікроамперметром – у зворотному.

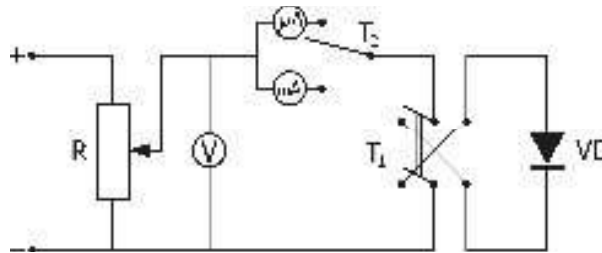


Рис. 36.6

Для визначення напрямку струму крізь напівпровідниковий діод у схему вмикається тумблер  $T_1$ , а для вимірювання величини струму в прямому і зворотному напрямках – тумблер  $T_2$ , що вмикає відповідно міліамперметр  $\text{mA}$  або мікроамперметр  $\text{μA}$ . Напруга на дільник подається від джерела постійної напруги.

### Прилади і приладдя

Напівпровідниковий діод (селеновий стовпчик), джерело постійної напруги, дільник напруги, потенціометр, міліамперметр, мікроамперметр, тумблери, джерело змінної і постійної напруги, вольтметр, осцилограф.

### Порядок виконання роботи

1. Визначити ціну поділки приладів і ввімкнути установку.
2. Змінюючи напругу  $U_{\text{пр}}$ , зняти залежність прямого струму  $I_{\text{пр}}$  від напруги  $U_{\text{пр}}$ . Дані внести в таблицю.
3. Змінюючи полярність прикладеної напруги, зняти залежність зворотного струму  $I_{\text{зв}}$  від напруги  $U_{\text{зв}}$  аналогічно п. 2. Дані внести в таблицю.
4. Повторити дії, зазначені в п. 2 і 3, три рази. Визначити середню силу струму при кожному значенні напруги.
5. Побудувати графік залежності середніх сил струмів  $I_{\text{пр}}$  і  $I_{\text{зв}}$  від напруг  $U_{\text{пр}}$  і  $U_{\text{зв}}$ . Значення сили струму в прямому напрямку відкладати в  $\text{mA}$  зі знаком “+”, у зворотному – у  $\text{μA}$  зі знаком “-”.
6. Побудувати залежність опору напівпровідникового діоду  $R$  від прикладеної

напруги  $U$ , використовуючи формулу (2).

7. Побудувати залежність коефіцієнта випрямлення  $K$  від абсолютної напруги, прикладеної до діода, використовуючи формулу (1).
8. Зняти осцилограми струму для різних схем випрямлення, які визначає викладач.

U, В	I <sub>пр</sub> , мА			<I <sub>пр</sub> >, мА	I <sub>звор.</sub> , мкА			<I <sub>звор.</sub> >, мкА	K	R <sub>п</sub> , Ом	R <sub>зв</sub> , кОм
	1	2	3		1	2	3				

### Контрольні запитання

1. Що таке напівпровідник?
2. Що таке «дірочна» і електронна провідність?
3. Чим напівпровідник відрізняється від діелектриків і металів з точки зору квантової теорії?
4. Пояснити вольт-амперну характеристику напівпровідникового діода.
5. Як відбувається випрямлення змінного струму?
6. Пояснити графіки залежностей  $K(U)$  і  $R(U)$ .
7. Напівпровідниковий діод, його будова і робота.
8. Будова і властивості напівпровідників з власною провідністю.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 37.

### Визначення індукції магнітного поля електромагніту

Мета роботи – експериментальне визначення величини магнітної індукції, створеної в зазорі електромагніту, і його градування, тобто встановлення залежності індукції магнітного поля електромагніту від сили струму в його обмотці.

Магнітне поле утворюється провідниками зі струмом, або постійними магнітами. Для дослідження магнітного поля необхідно внести в нього пробний контур зі струмом (чи магнітну стрілку). Поле справляє орієнтуючу дію на внесений у нього контур зі струмом. Обертаючий момент  $M_{\max}$ , що діє на контур, залежить як від властивостей поля в даній точці, так і від властивостей контуру. Величина обертаючого моменту, що діє на контур зі струмом у магнітному полі, пропорційна силі струму  $I$ , що тече в контурі, і його площі  $S$ , залежить від орієнтації контуру і не залежить від форми контуру. Таким чином, дія магнітного поля на плоский контур зі струмом визначається векторною величиною

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}, \quad (1)$$

що називається магнітним моментом контуру.  $\vec{n}$  - одиничний вектор позитивної нормалі до контуру. Для характеристики магнітного поля вводиться векторна величина  $\vec{B}$ , яка називається магнітною індукцією і модуль якої є коефіцієнтом пропорційності між  $M_{\max}$  і  $p_m$ , тому що в одній і тій же точці поля відношення  $\frac{M_{\max}}{p_m}$  є константою для різних контурів:

$$B = \frac{M_{\max}}{IS}. \quad (2)$$

Напрямок вектора магнітної індукції збігається з напрямком позитивної нормалі до контуру  $\vec{n}$  в її рівноважному положенні, коли  $M = 0$ . Вектор  $\vec{n}$  проводиться перпендикулярно до контуру так, щоб з його кінця було «видно» рух струму в контурі проти годинникової стрілки.

Дія магнітного поля на провідник зі струмом описується силою Ампера. Експериментально встановлено, що на елемент  $d\vec{l}$  провідника зі струмом  $I$  у магнітному полі  $\vec{B}$  діє сила  $d\vec{F}_A$ :

$$d\vec{F}_A = I \cdot d\vec{l} \times \vec{B}, \quad (3)$$

модуль якої дорівнює

$$dF_A = I \cdot dl \cdot B \cdot \sin \alpha,$$

де кут  $\alpha$  знаходиться між векторами  $d\vec{l}$  і  $\vec{B}$ .

## Метод вимірювання й опис установки

Індукцію магнітного поля електромагніту можна визначити дослідним шляхом, використовуючи електродинамічну взаємодію провідника зі струмом і магнітним полем — методом магнітних терез. Магнітні терези являють собою прямолінійний твердий провідник зі струмом, вміщений у магнітне поле міжполюсного простору електромагніту (рис. 37.1). Провідник знаходиться на відстані  $L_2$  від осі обертання важеля, а на відстані  $L_1$  розташовується шалька з важками. Важіль з мінімальним тертям обертається навколо осі і збалансований так, що при виключеному полі система знаходиться в рівновазі. Якщо відповідним чином вибрати напрямки струму в провіднику  $I_2$  і магнітного поля, то сила Ампера буде діяти вгору і виштовхувати провідник. У цьому випадку величина сили Ампера дорівнює:

$$F_A = B \cdot I_2 \cdot l, \quad (4)$$

де  $l$  — частина провідника, що знаходиться в магнітному полі.

Обертаючий момент сили Ампера  $F_A \cdot L_2$  компенсується моментом сили тяжіння важків  $m \cdot g \cdot L_1$ , що приводить терези знову в рівновагу. Таким чином, з рівності моментів випливає:

$$F_A \cdot L_2 = m \cdot g \cdot L_1. \quad (5)$$

З рівняння (5) знаходимо силу Ампера:

$$F_A = mg \frac{L_1}{L_2}. \quad (6)$$

Остаточно, індукцію магнітного поля  $B$  можна визначити за формулою

$$B = \frac{F_A}{I_2 \cdot l} = \frac{L_1 \cdot g \cdot m}{L_2 \cdot l \cdot I_2}. \quad (7)$$

Вимірювальна установка схематично зображена на рис. 1.

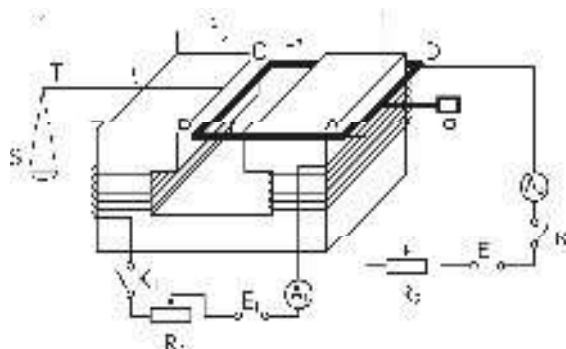


Рис. 37.1

Між полюсами електромагніту знаходиться прямолінійний відрізок провідника BC. Провідник BC обертається навколо осі AD. На відстані  $L_1$  від осі обертання знаходиться шалька  $S$ , яку навантажують важками  $P$ . Вага шальки і провідника зрівнюється з іншою стороною вантажем  $G$ , тому вся система до проходження струму по провіднику знаходиться в рівновазі. Силу струму в

електромагніті визначають амперметром  $A_1$ , а силу струму в провіднику – амперметром  $A_2$ . Реостати  $R_1$  і  $R_2$  служать для регулювання струму в необхідних межах в обмотці електромагніту і провіднику ВС відповідно.

### Прилади і приладдя

Електромагніт, магнітні терези, незалежні джерела струму, амперметри, реостати, набір важків.

### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з лабораторною установкою і включити її з дозволу викладача.
2. Установити за допомогою реостата  $R_1$  струм  $I_1$  в котушці електромагніту за вказівками викладача.
3. Навантажити шальку  $S$  важками  $m$  за вказівкою викладача.
4. Замкнути ключ  $K_2$  і за допомогою реостата  $R_2$  довести силу струму  $I_2$  у рамці до величини, при якій система зрівноважиться. Записати у таблицю значення величин  $I_1$ ,  $I_2$  і  $m$ .
5. Не змінюючи струм  $I_1$ , повторити досліди ще 2 рази з важками іншої маси і значення  $m$  і  $I_2$  записати в таблицю.
6. Провести аналогічні виміри для інших значень струму  $I_1$  в котушці електромагніту і результати внести в таблицю (5–7 значень).
7. Для кожного виміру обчислити величину  $B$  за формулою (7) (значення довжин  $L_1$ ,  $L_2$  і  $l$  дані на робочому місці). Результати занести в таблицю.
8. Для кожного значення сили струму  $I_1$  обчислити середнє значення величини магнітної індукції  $B$ . Результати занести в таблицю.
9. Побудувати графік  $\langle B \rangle = f(I_1)$ .

$I_1, A$												
$m, \text{кг}$												
$I_2, A$												
$B, \text{Тл}$												
$\langle B \rangle, \text{Тл}$												

### Контрольні запитання

1. Що називається індукцією магнітного поля, який фізичний зміст цієї величини, в яких одиницях вона вимірюється в системі СІ?
2. Дати визначення магнітного моменту контуру зі струмом.
3. Що називається позитивною нормаллю до контуру зі струмом?
4. Дати визначення величини і напрямку сили Ампера.
5. Які будова і призначення електромагніту?
6. Чому як матеріал осердя електромагніту використовується феромагнетик?
7. У чому полягає градування електромагніту?
8. Як визначається індукція магнітного поля електромагніту в цій лабораторній роботі?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 38.

### Визначення питомого заряду електрона за допомогою магнетрона

Мета роботи – визначення питомого заряду електрона, дослідження його руху в схрещених електричному і магнітному полях (метод магнетрона).

Відношення заряду електрона  $e$  до його маси спокою  $m$  називається питомим зарядом електрона  $e/m$ . У багатьох електронних приладах (електронно-променеві трубки, електронні мікроскопи, прискорювачі заряджених частинок та ін.) використовуються пучки електронів, що рухаються в електричних і магнітних полях. Характер руху (траєкторія, швидкість, прискорення) і сила взаємодії частинок пучка залежать від величини і конфігурації кожного поля, їхнього взаємного розташування, а також від питомого заряду електрона.

Питомий заряд електрона можна визначити, вивчаючи його рух в електричному і магнітному полях. Нехай електрон влітає зі швидкістю  $\vec{v}$  в однорідне магнітне поле індукції  $\vec{B}$ , що спрямоване до нас (рис. 38.1).

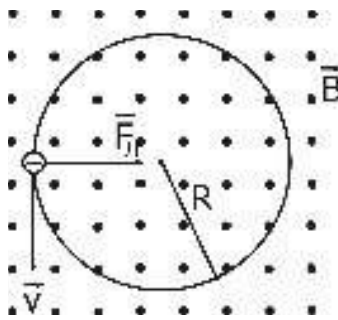


Рис. 38.1

$\vec{B}$  і  $\vec{v}$  взаємно перпендикулярні. На електрон діє сила Лоренца:

$$\vec{F}_L = e\vec{v} \times \vec{B}. \quad (1)$$

Оскільки електрон заряджений негативно, то й напрямок сили визначається правилом правої руки. З формули (1) видно, що сила Лоренца перпендикулярна до швидкості і, отже, відіграє роль доцентрової сили, вона не змінює величини швидкості і кінетичної енергії частинки:

$$\vec{F}_L = \vec{F}_{\text{доц.}},$$

або

$$\frac{mv^2}{R} = evB.$$

Тоді питомий заряд електрона

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{RB}, \quad (2)$$

де  $R$  - радіус кола, по якому буде обертатися електрон (рис. 1).



Цей радіус буде зменшуватися, якщо величина швидкості незмінна, а індукція  $B$  зростає.

Якщо перед тим як електрон влітає у магнітне поле, він пройшов зі стану спокою ( $v_0 = 0$ ) в електричному полі різницю потенціалів, що прискорює,  $U$ , то його кінетична енергія дорівнює роботі електричного поля:

$$\frac{mv^2}{2} = eU. \quad (3)$$

Виражаючи з рівняння (3) швидкість  $v$  і підставляючи її в рівняння (2), одержимо

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{R^2 B^2}. \quad (4)$$

### Метод вимірювання й опис установки

Магнетрон являє собою вакуумний діод з катодом непрямого розжарювання і анодом. Катод  $K$  розташовується уздовж осі циліндричного анода, так що електричне поле спрямоване уздовж радіуса. Лампа міститься всередині соленоїда, що створює магнітне поле, спрямоване паралельно катоду. Переміщення електронів відбувається в кільцевому проміжку між катодом і анодом магнетрона. Цей рух має кілька відмінностей від того ідеального випадку, який ми аналізували вище.

1) Початкова швидкість  $v_0$  електронів, що вилітають з катода, відмінна від 0. Рівняння (3) повинно мати більш складний вигляд.

2) У магнетроні електрон рухається одночасно в електричному і магнітному полях. Оскільки електричне поле збільшує швидкість електрона, то його траєкторія не буде дугою кола, а має більш складну форму. Ця особливість у лабораторній роботі не дуже істотна, тобто формула (3) справедлива, траєкторії електронів — дуги кіл.

У формулі (4)  $U = U_a$  — анодна напруга.

Введемо ще одне спрощення. Оскільки радіус циліндричного анода  $r_a$  набагато більше радіуса циліндричного катода  $r_k$ , то можна вважати, що  $r_k = 0$ .

Розглянемо траєкторії електронів у магнетроні при різних значеннях індукції магнітного поля  $B$  (рис. 38.2). У відсутності магнітного поля траєкторія електрона прямолінійна і спрямована уздовж радіуса анода. У слабкому полі вона являє собою дугу великого радіуса. Анодний струм в обох випадках найбільший. Зі збільшенням індукції  $B$  магнітного поля радіус  $R$  зменшується.

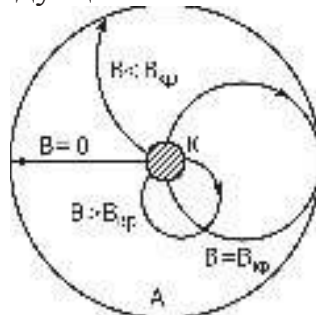


Рис. 38.2

При деякому критичному значенні магнітного поля  $B_{кр}$  електрони рухатимуться по колу, діаметр якого дорівнює радіусу анода; вони ледь торкаються поверхні анода:  $R = 0,5 r_a$ . При  $B > B_{кр}$  електрони рухаються по колах, діаметр яких менше радіуса анода, вони не попадають на анод. Анодний струм дорівнює нулю ( $I_a = 0$ ).

Отже, для  $B = B_{кр}$  формула (4) набуває вигляду

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 r_a^2}. \quad (5)$$

Індукцію  $B$  магнітного поля соленоїда обчислюємо за формулою

$$B = \mu \mu_0 n I, \quad (6)$$

де  $\mu$  — магнітна проникність середовища ( $\mu = 1$ );

$\mu_0$  — магнітна стала ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{M}$ );

$I$  — сила струму в обмотці соленоїда;

$n$  — число витків на одиницю довжини соленоїда.

Підставляючи (6) у (5), одержимо розрахункову формулу

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{\mu^2 \mu_0^2 n^2 I_{кр}^2 r_a^2}. \quad (7)$$

Таким чином, для обчислення питомого заряду електрона потрібно виміряти анодну напругу  $U_a$ , значення струму  $I_{кр}$  в соленоїді, при якому анодний струм дорівнює нулю;  $n$  і  $r_a$  вказані на лабораторному стенді.

З вищевикладеного може скластися думка, що зміна анодного струму  $I_a$  з ростом струму  $I$  у соленоїді повинна відбуватися так, як показано на рис. 3 штриховою лінією.

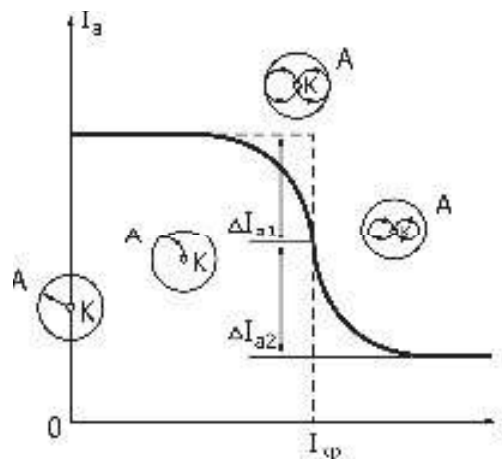


Рис. 38.3

В реальних умовах з ряду причин (різні початкові швидкості електронів, непаралельність поверхонь анода і катода, наявність залишкових газів та ін.) крива  $i_a = f(I)$  спадає більш плавно і не перетинає осі абсцис. Вона зображена на рис. 3 з суцільною лінією.  $I_{кр}$  визначаємо за таким правилом. Ділянку крутого спаду поділяємо точкою Q навпіл (тобто  $\Delta I_1 = \Delta I_2$ ). Струм соленоїда, що відповідає точці Q, є критичним струмом.

Схема електричного кола магнетрона показана на рис. 38.4.  $R_a$  — потенціометр, яким можна підбирати визначену напругу на аноді  $U_a$ . Міліамперметр і вольтметр контролюють роботу анодного кола.

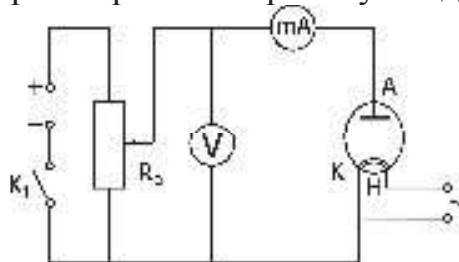


Рис. 38.4

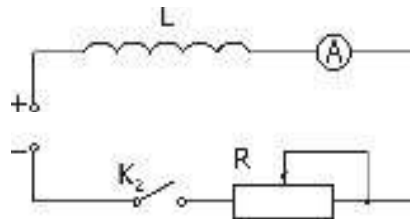


Рис. 38.5

На рис. 38.5 подана схема включення соленоїда, в магнітному полі якого знаходиться магнетрон. Регулюючим резистором R можна змінювати струм соленоїда I, величина якого виміряється амперметром A.

У лабораторній роботі як магнетрон використовують електронну лампу 6Е5С, тому що її конструкція повністю задовольняє переліченим вище умовам. Вигляд екрана індикатора наведено на рис. 38.6.

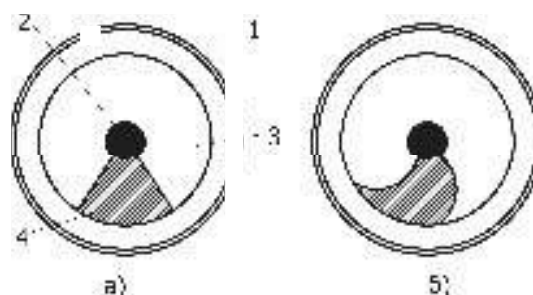


Рис. 38.6

Частина електронів, що випускаються катодом лампи, рухається радіально в електричному полі між її катодом і екраном.

Потрапляючи на екран, покритий флуоресціюючою речовиною, ці

електрони викликають його світіння. При спостереженні зверху конічний екран лампи дозволяє простежити траєкторії руху електронів від катода до екрана. Крізь отвір в екрані проходить керуючий електрод, з'єднаний з анодом. Напруга на аноді значно менше, ніж на екрані, тому керуючий електрод трохи послаблює поблизу себе електронний потік. На екрані утвориться тінь у вигляді сектора з прямолінійними краями (рис. 38.6, а).

Коли лампа знаходиться в однорідному магнітному полі, паралельному осі катода, електрони відхиляються і рухаються по майже кругових траєкторіях. На рис. 38.6 видно вигин країв темного сектора при наявності магнітного поля, що відповідає траєкторіям руху електронів у цих полях. Одночасно зі зміною світіння відповідних ділянок екрана змінюється анодний струм лампи, убуваючи майже до нуля.

### Прилади і приладдя

Магнетрон; міліамперметр; амперметр; вольтметр; потенціометр; соленоїд; регулюючий резистор; джерела постійного і змінного струму; два ключі.

### Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричні кола магнетрона (рис. 38.4) і соленоїда (рис. 38.5). Ручку потенціометра  $R_a$  повернути до кінця проти годинникової стрілки. Опір резистора  $R$  зробити максимальним.
2. Замкнути коло ключем  $K_1$ , потенціометром  $R_a$  встановити анодну напругу  $U_a$ , задану викладачем. Ключем  $K_2$  замкнути коло соленоїда. Збільшувати резистором  $R$  струм  $I$  соленоїда з інтервалами  $0,1$  А до максимального. Вимірювати величину анодного струму  $I_a$ . Результати вимірів  $U_a$ ,  $I$ ,  $I_a$  записати в таблицю.
3. Для нових значень  $U_a$  дослідити залежність анодного струму  $I_a$  від струму в соленоїді  $I$ , діючи так, як сказано в п. 2. Результати вимірів  $U_a$ ,  $I$ ,  $I_a$  занести в таблицю.
4. Використовуючи таблицю, побудувати графіки  $I_a = f(I)$  на аркуші міліметрівки. Із сімейства кривих вибрати ту, яка спадає найбільш круто, по ній визначити  $I_{кр}$ .
5. За формулою (7) обчислити питомий заряд електрона в системі одиниць СІ. Порівняти отриманий результат з довідковими даними.

Ua = B		Ua = B		Ua = B		Ua = B	
I, A	Ia, mA	I, A	Ia, mA	I, A	Ia, mA	I, A	Ia, mA

### Контрольні запитання

1. Які сили діють на електрон, що рухається в магнітному й електричному полях?
2. Що таке сила Лоренца? Як визначається її напрямок? Які Ви знаєте прояви сили Лоренца в природі?
3. Як використовується в техніці сила Лоренца? Назвіть прилади й апарати, в яких вона використовується.
4. Виведіть розрахункову формулу.
5. Який струм називають критичним? Як його визначають?
6. Які фізичні основи принципу роботи магнетрона?
7. Як визначити індукцію магнітного поля соленоїда?
8. Чому скидові характеристики не дають різкого “вертикального” зменшення сили анодного струму при значенні  $I_{кр}$

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 39.

### Вивчення магнітних властивостей феромагнетиків

Мета роботи - дослідження процесів намагнічування феромагнетиків у змінних магнітних полях, визначення величини залишкової індукції і коерцитивної сили, залежності магнітної проникності феромагнетиків від зовнішнього магнітного поля, визначення втрат енергії при перемагнічуванні.

Всі речовини за своїми магнітними властивостями діляться на діамагнетики, парамагнетики і феромагнетики.

Діамагнетики - це речовини, сумарний магнітний момент атомів і молекул яких дорівнює нулю. Під дією зовнішнього магнітного поля в атомах діамагнетика виникає індукований магнітний момент, спрямований проти зовнішнього поля. Магнітна проникність таких речовин  $\mu < 1$  і практично не залежить від температури.

Парамагнетики - це речовини, в яких магнітні моменти атомів і молекул не дорівнюють нулю. Тоді при внесенні в зовнішнє поле кожний атом (або молекула) буде поводитися як елементарний магнітик. Під дією зовнішнього поля ці магнітики будуть намагатися стати упорядкованими, тобто встановлюються уздовж поля. Після вимикання зовнішнього поля магнітні моменти одразу втрачають упорядковану орієнтацію завдяки тепловому руху ( $\mu > 1$ ).

Феромагнетизм ( $\mu \gg 1$ ) спостерігається в матеріалах, де як і в парамагнетиках, магнітні моменти молекул не індукуються, а існують незалежно від зовнішнього поля. Різниця полягає в тому, що у феромагнетиках моменти сусідніх атомів уже з самого початку орієнтовані один відносно одного. Це не означає, що феромагнетик у цілому однорідно намагнічений (наприклад, шматок м'якого заліза не є магнітом). Тобто найбільш вигідно в енергетичному сенсі, щоб зразок складався з великої кількості малих однорідно намагнічених областей (доменів). У середині кожного домена намагніченість однорідна, але напрямок вектора цієї самодовільної (спонтанної) намагніченості змінюється від одного домена до іншого. Таким чином, у відсутності магнітного поля зразок у цілому не намагнічений (розміри доменів лежать у межах від  $10^{-6}$  до  $10^{-4}$  м).

Феромагнетики є сильномагнітними речовинами - їхнє намагнічення у величезне число разів (до  $10^{10}$ ) перебільшує намагнічення парамагнетиків, крім того, намагнічення феромагнетиків не зникає після вимикання магнітного поля. До таких речовин відносяться елементи VIII групи періодичної системи елементів Д.І. Менделєєва (Fe, Ni, Co) і деякі рідкоземельні елементи, (Gd, Ho, Er) та їхні сплави. Феромагнетизм притаманний усім цим речовинам тільки в кристалічному стані й у певному інтервалі температур. При нагріванні їх вище деякої температури, що має назву температури Кюрі, впорядкованість магнітних моментів руйнується, феромагнетизм зникає, і речовина стає парамагнетиком.

Основні властивості феромагнетиків такі. Магнітна проникність феромагнетиків дуже залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля. Феромагнетики мають залишковий магнетизм, тобто вони можуть зберігати стан намагніченості і при відсутності поля, яке намагнічувало. Залишковий магнетизм є результатом магнітного гістерезису, що спостерігається при

перемагнічуванні феромагнетика і виявляється в тому, що зміна намагніченості феромагнетика в змінному полі відстає від зміни напруженості поля, що намагнічує.

Криві, отримані при поступовому збільшенні поля (початковим є розмагнічений стан зразка), називаються основними кривими намагнічування (рис. 39.1, крива 0 - 1).

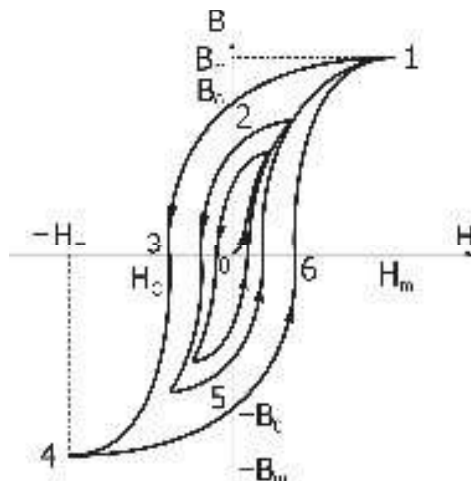


Рис .39.1

Характерне для феромагнетиків запізнення магнітної індукції в порівнянні із зовнішнім магнітним полем (гістерезис) графічно подано на рис. 39.1. Ця залежність називається петлею гістерезиса. Гістерезис обумовлений незворотністю процесів намагнічування, що і призводить до втрат енергії.

Для матеріалів, які застосовують для осердь, такі втрати призводять до зниження якості пристроїв, у яких вони використовуються, проте така незворотність іноді корисна, тому що саме завдяки їй матеріал залишається намагніченим після того, як поле, що його намагнічувало, стає рівним нулю, тобто цей матеріал стає постійним магнітом.

Розглянемо докладніше процес намагнічування феромагнетика. На рис. 39.1 показана залежність проекції вектора  $\vec{B}$  на напрямок зовнішнього магнітного поля  $\vec{H}$  від проекції його напруженості  $H$ . Зі збільшенням  $H$  від 0 до  $H_m$  (ділянка 0-1), проекція  $B$  збільшується від 0 до  $B_m$ . Це - основна крива намагнічування. При зменшенні напруженості поля від  $H_m$  до 0 проекція  $B$  убуває не до нуля, а до значення  $B_r$  (ділянка 1-2). При зміні напрямку поля і збільшенні його напруженості  $B$  буде зменшуватися і досягне значення  $B=0$  при  $H=H_c$  (ділянка 2-3), а при подальшому збільшенні напруженості поля за модулем до  $H_m$   $B$  досягає значення  $-B_m$  (ділянка 3-4). При дальшій зміні проекції напруженості поля від  $-H_m$  до  $+H_m$  проекція  $B$  змінюється від  $-B_m$  до  $+B_m$ , причому зміна відбувається за кривою 4 - 5 - 6 - 1. Таким чином, при зміні поля від  $+H_m$  до  $-H_m$  і від  $-H_m$  до  $+H_m$  залежність  $B$  від  $H$  описується замкненою кривою, що називається петлею гістерезиса. Величини  $B_r$  (залишкова індукція) і  $H_c$  (коерцитивна сила) є важливими характеристиками феромагнетика. Якщо коерцитивна сила велика, то феромагнетик називають магнітожорстким. Такі матеріали застосовують для виготовлення постійних магнітів. Феромагнетики з малою  $H_c$  називаються магнітом'якими, тому що вони легко розмагнічуються.



Такі речовини застосовують для осердь трансформаторів, електромагнітів і т.д.

Важливою характеристикою феромагнетиків є залежність магнітної проникності  $\mu(H)$  від зовнішнього поля. З її допомогою можна вибрати оптимальні умови, при яких дану речовину можна використовувати з найбільшою користю. Залежність  $\mu(H)$  для феромагнетиків визначають тільки для основної кривої намагнічування. Така форма осердя дозволяє не враховувати розмагнічуючого фактору, який для тороїда дорівнює нулю.

Процес намагнічування феромагнетика є незворотнім. Робота, необхідна для перемагнічування феромагнетика, пропорційна площі петлі гістерезиса.

### Метод вимірювання

Електрична схема лабораторної установки наведена на рис.39.2.

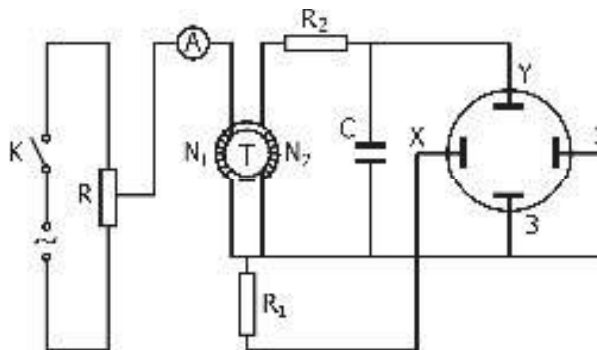


Рис. 39.2

Феромагнітне осердя у даній роботі має форму тороїда. Первинна обмотка тора з опором  $R_1$  при проходженні по ній струму  $I_1$  з частотою 50 Гц створює магнітне поле  $H_1 = I_1 n_1$ , де  $n_1$  - кількість витків на одиницю довжини в первинній обмотці. При цьому в осерді виникає індукція  $B_1$ .

У вторинній обмотці опір  $R_2$  і конденсатор застосовуються для синхронізації фаз напруг первинної і вторинної обмоток трансформатора. Напруга на конденсаторі  $U_c$ , пропорційна індукції  $B$  в зразку:

$$U_c = \frac{N_2 S}{CR_2} B, \quad (1)$$

де  $N_2$  - кількість витків у вторинній обмотці;

$S$  - переріз тороїда.

Формулу (1) можна отримати так:

$$U_c = \frac{q}{C} = \frac{\int i_2 dt}{C} = \frac{\int Edt}{R_2 C} = \frac{-\int d\Phi}{R_2 C} = -\frac{N_2 S B}{R_2 C}, \quad (2)$$

де  $q$  - заряд конденсатора,

$i_2$  - струм у вторинній обмотці,

$d\Phi$  - зміна магнітного потоку крізь вторинну обмотку.

Вважаючи  $i_2 = \frac{E}{R_2}$ , нехтуємо падінням напруги на всіх інших ділянках електричного ланцюга, крім  $R_2$ , тому що опір  $R_2$  дуже великий.

Напруга  $U_c$  подається на  $Y$ - пластини осцилографа, а  $U_x$ , що знімається з опору  $R_1$ , який знаходиться в первинній обмотці, - на  $X$ - пластини.  $U_x$  пропорційна силі струму в первинній обмотці, тобто напруженості магнітного поля:



$$U_x = I_1 R_1 = \frac{H R_1}{n_1} = \frac{H R_1}{N_1}, \quad (3)$$

де  $N_1$  - кількість витків первинної обмотки,  
 $l_1$  - її довжина.

За один період синусоїдальної зміни струму електронний промінь описує на екрані осцилографа повну петлю гістерезиса, що в точності повторюється в наступні періоди. Така петля називається динамічною петлею, на відміну від статичної, що утворюється при повільній зміні  $H$ . Змінюючи за допомогою потенціометра  $R_1$  напруженість магнітного поля  $H$ , можна одержати на екрані осцилографа сімейство петель гістерезиса, що різняться за своєю площею. Для побудови основної кривої намагнічування  $B(H)$  треба визначити на осцилограмі координати вершин петель гістерезиса і визначити масштабні коефіцієнти по осях  $X$  і  $Y$  залежно від показань вольтметра  $U_{\text{еф}}$  й амперметра  $I_{\text{еф}}$ .

Для зміни струму  $I_{\text{еф}}$  замість потенціометра  $R_1$  можна використовувати автотрансформатор. Масштаб зображення динамічної петлі гістерезиса визначається в такий спосіб. Миттєвому максимальному струму  $I_m$  в первинному ланцюзі відповідає максимальне значення напруженості магнітного поля:

$$H_m = I_m n_1 = \frac{I_{\text{еф}} \sqrt{2} \cdot N_1}{l_1}. \quad (4)$$

Підставляючи у цю формулу показання амперметра  $I_{\text{еф}}$  і значення  $N_1$  і  $l_1$ , вказані на робочому місці, обчислюємо  $H_m$ . За допомогою міліметрового паперу вимірюємо відрізок  $OH_m = L_H$  на осцилограмі і знаходимо горизонтальний масштаб петлі за формулою

$$h = \frac{H_m}{L_H}. \quad (5)$$

З формули (2) знаходимо :

$$B_m = \frac{U_{\text{см}} C R_2}{S N_2} = \frac{U_{\text{еф}} \sqrt{2} \cdot C R_2}{S N_2}, \quad (6)$$

де  $U_{\text{см}}$  - амплітудне значення напруги на вторинній обмотці, що відповідає максимальному значенню індукції  $B$ ;

$U_{\text{еф}}$  - показання вольтметра, значення  $l, C, R_2, S, N_1, N_2$  вказані на робочому місці.

Вертикальний масштаб обчислюємо за формулою

$$b = \frac{B_m}{L_b}, \quad (7)$$

де  $L_b$  вимірюється по осцилограмі і є довжиною відрізка  $OB = L_b$ .

Магнітні властивості феромагнетиків у змінних магнітних полях характеризуються динамічною магнітною проникністю

$$\mu = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}, \quad (8)$$

де магнітна стала  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ .

Площа динамічної петлі гістерезису більше площі статичної петлі, тому що вона відповідає втратам енергії, що йде не тільки на магнітний гістерезис, але і на втрати на виникнення вихрових потоків і т.ін. Розмір втрат  $W$  за один цикл перемагнічення в перерахунку на одиницю об'єму осердя (зразка) чисельно дорівнює площі петлі гістерезису:

$$W = Shb, \quad (9)$$

де  $s$  - площа петлі гістерезису;  
 $h$  і  $b$  - масштабні коефіцієнти.

### Прилади і приладдя

Джерело регульованої змінної напруги, трансформатор із досліджуваним зразком, осцилограф, амперметр, вольтметр, конденсатор і набір опорів ( $R_1$  і  $R_2$ ).

### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з лабораторною установкою, визначити ціну поділок приладів і включити установку з дозволу викладача. .
2. Регулюючи вертикальне й горизонтальне посилення, одержати на екрані осцилографа зображення петлі гістерезиса для максимального поля.
3. Зняти залежність показань вольтметра  $U_{ef}$  від показань амперметра  $I_{ef}$  (значення величин брати за вказівками викладача), обчислити  $H$  і  $B$  за формулами (4) і (6), дані занести в таблицю.
4. Перезняти зображення петлі гістерезиса для максимального поля на міліметровий папір із нанесеною на нього координатною сіткою.
5. Вимкнути осцилограф і джерело живлення.
6. Побудувати криву залежності  $B(H)$  і петлю гістерезиса в координатних осях  $B$  і  $H$ , використовуючи для обчислення масштабних коефіцієнтів  $h$  і  $b$  формули (5) і (7) і дані вимірювань.
7. Побудувати криву залежності  $\mu(H)$ , використовуючи формулу (8).
8. Знайти значення залишкової індукції  $B_r$  і коерцитивної сили  $H_c$ .
9. Знайти величину енергетичних втрат  $W$  за формулою (9).

№	$U_{ef}, B$	$I_{ef}, A$	$B, Tл$	$H, A/м$	$\mu$
1					
2					

### Контрольні запитання

1. Класифікація магнетиків.
2. Які властивості діа - і парамагнетиків?
3. Які властивості феромагнетиків?
4. У чому полягає явище магнітного гістерезиса?
5. Фізичний зміст площі статичної і динамічної петель гістерезиса.
6. Пояснити хід кривої  $\mu = f(H)$ .
7. Фізичний зміст вектора індукції магнітного поля  $\vec{B}$ .
8. Залишкова індукція і коерцитивна сила. Магнітом'які і магнітожорсткі феромагнетики.
9. Нарисувати і пояснити схему лабораторної установки.
10. Вивести формули для обчислення  $B$  і  $H$  у лабораторній роботі.

## Список джерел

1. Савельев И. В. Курс общей физики.[Текст] / Т.2.: учебник для высших учебных заведений / И. В. Савельев. – М.: Наука, 1989. – 540 с.
2. Зисман Г. А. Курс общей физики. [Текст]. Т.2: учебник для высших учебных заведений /Зисман Г. А. , Годес А. М. - М.: Наука, 1972. 336 с.
3. Базакуца В. А. и др. Лабораторный практикум по физике. [Текст]. Ч.2. - Харьков: Изд-во ХГУ,1969. 236 с.
4. Фізичний практикум. За заг. ред. проф. В. П. Дущенко. [Текст]. Ч.2.- К.: Вища школа, 1984. 126 с.
5. Методичні рекомендації до організації самостійної роботи з вивчення курсу фізики. [Текст]. - Харьков: ХНАМГ, 2008. 16с.
6. Мультиметр ВР–11А. Руководство по эксплуатации [Текст]. 2.710.042 РЭ. 6 с.
7. Осциллограф универсальный С1-73. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. [Текст]. И22.044.067ТО, 1988. 32 с.
8. Устройство вспомогательное для осциллографов (генератор) типа Л 31. Руководство по эксплуатации.[Текст]. 3.723.001.13 с.
9. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з фізики. Розділ "Механіка". [Текст]. – Х: ХНАМГ, 2005. - 45 с.

*Навчальне видання*

Методичні вказівки

до виконання лабораторних робіт з курсу загальної фізики  
розділ

**"ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ"**

*(для студентів I курсу всіх форм навчання напряму підготовки 6.050701  
"Електротехніка та електротехнології", 6.050702 "Електромеханіка")*

Укладачі: **Аксьонова Катерина Юріївна**  
**Оксюк Юрій Данилович**

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання Аксьонова К. Ю.,  
Оксюк Ю. Д.

План 2012, поз 280 М

---

Підп. до друку 19.06.2012  
Друк на ризографі.  
Зам. №

Формат 60x84 /16  
Ум. друк. арк. 3,52  
Тираж 20 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.