

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	4
ВСТУПНЕ ЗАНЯТТЯ: Електровимірюальні прилади.....	5
ЛР № 31: Вивчення електростатичного поля.....	11
ЛР № 32: Визначення ціни поділки і внутрішнього опору гальванометра.....	15
ЛР № 33: Вимірювання опорів містком Уітстона.....	18
ЛР № 34: Визначення температурного коефіцієнта електроопору металів.....	22
ЛР № 35: Вимірювання електрорушійної сили джерела методом компенсації.....	27
ЛР № 36: Градуювання термопари.....	31
ЛР № 37: Визначення питомого опору електроліту.....	36
ЛР № 38: Визначення ємності конденсатора за допомогою містка Сотті.....	40
ЛР № 39: Перевірка закону Ома для змінних струмів.....	43
ЛР № 40: Визначення роботи виходу електронів з металу.....	47
ЛР № 41: Визначення питомого заряду електрона методом магнетрона.....	51
ЛР № 42: Вивчення релаксаційного генератора.....	55
ЛР № 43: Вивчення магнетного поля соленоїда за допомогою датчика Холла.....	59
ЛР № 44: Визначення горизонтальної складової напруженості та індукції магнітного поля Землі.....	63
ЛР № 45: Дослідження гістерезису феромагнетних матеріалів.....	67
ЛР № 46: Дослідження електромагнітних хвиль у двопровідній лінії.....	72
ЛР № 47: Дослідження явища резонансу в <i>RLC</i> -контурі.....	76
ЛР № 48: Дослідження явища взаємоіндукції.....	81
ЛР № 49: Вивчення електронного осцилографа.....	86
ЛР № 50: Дослідження гістерезису газового розряду.....	93
ДОДАТОК А: Одиниці вимірювання електричних і магнетичних величин в системі СІ.....	97
ДОДАТОК В: Використання методу найменших квадратів для апроксимації залежностей між фізичними величинами.....	98

ПЕРЕДМОВА

Підготовлене видання методичних вказівок до лабораторних робіт з курсу фізики має своєю метою полегшити доступ студентам до інформації, необхідної для успішного виконання завдань лабораторного практикуму. Добірка містить виклад змісту 19-ти лабораторних робіт з розділу „Електрика і магнетизм”, допоміжний матеріал до вступного заняття з цього розділу курсу, звідну таблицю одиниць вимірювання електричних та магнетних величин в системі СІ та опис стандартного способу апроксимації залежностей між фізичними величинами. Кожна лабораторна робота, переважно, розрахована на одне двогодинне заняття. Порядок виконання лабораторних робіт та форма звітності окремо доводяться студентам.

Навчальна лабораторія електрики і магнетизму в завершеному вигляді (матеріальна частина, методичне забезпечення) сформована зусиллями лаборантів, інженерів та викладачів кафедри фізики впродовж багатьох років на основі традицій, передянутих від базової кафедри тодішнього Львівського політехнічного інституту. З вдячністю назовемо цих спеціалістів: лаборант Ярослав Гураль, асистент Іларіон Галанець, асистент Михайло Герасимів, ст.лаборант Ігор Мисечко, ст.викладач Олександр Рокіцький, доцент Григорій Соболь.

Заходи з модернізації матеріально-технічної бази лабораторії при переході на типове лабораторне устаткування започаткував доцент Андрій Пундик та продовжив доцент Юрій Нікіфоров за активної участі зав. лабораторіями Богдана Гавриша.

Даний практикум відображає, якщо можна так сказати, класичний варіант лабораторії такого типу з максимальною наочністю схеми та методики експерименту, а також традиційним способом опрацювання даних. Інший варіант лабораторії, побудований на стандартних функціональних елементах електричних схем із використанням електронних вимірювальних пристройів та комп'ютерних технологій керування експериментом, впроваджує кафедра фізики на сучасному етапі. В даній підбірці прикладом таких лабораторних робіт є роботи під № 40, 41, 43, 45, 47, 48, 49.

Укладач вдячний ст.викладачу Анатолію Чубатому та асистенту Романії Коземчук за висловлені зауваження при підготовці тексту збірника до друку.

1 Поняття вимірювального приладу

Електровимірювальний прилад – це сукупність засобів, за допомогою яких здійснюється вимірювання певної електричної величини.

В приладах безпосередньої оцінки вимірювальна величина визначається стріочним або цифровим способом відліку, або за допомогою світлового “зайчика” на градуйованій шкалі. Це – амперметри, вольтметри, ватметри, омметри, гальванометри.

До приладів порівняння належать численні компенсатори, електровимірювальні містки, електронні вольтметри. В них вимірювана величина визначається порівнянням з відомою однорідною величиною.

Для вимірювання електричних величин в приладах безпосередньої оцінки використовують фізичні явища, на основі яких створюється обертальний момент і наступне переміщення рухливої системи приладу. Обертальний момент утворюється внаслідок взаємодії поля постійного магнету і струму в котушці, магнетного поля котушки з струмом і феромагнетиком, взаємодії магнетних полів котушок зі струмами, взаємодії заряджених тіл. За принципом дії розрізняють такі системи електровимірювальних приладів: магнетоелектричну, електромагнетну, електродинамічну, індукційну, електростатичну, термоелектричну, детекторну, вібраційну. Прилади різних систем реагують на різні значення вимірювальної величини (середні, діючі, амплітудні і т.д.).

Якість електровимірювальних приладів визначається допустимими межами вимірювань, чутливістю, похибками вимірювання, реагуванням на зовнішні електричні і магнетні поля та на зміну температури, стійкістю щодо перевантажень тощо.

2 Чутливість приладу

Чутливість S визначається відношенням лінійного або кутового зміщення покажчика приладу $\Delta\alpha$ до зміни вимірювальної величини Δx , яка зумовила це зміщення:

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

Чим більша чутливість приладу, тим точніше можна провести вимірювання.

Величина $C = \frac{1}{S}$, обернена до чутливості, називається ціною поділки приладу.

3 Клас точності приладу

Для характеристики точності електровимірювальних приладів використовують так звані зведені похибки, що є різновидністю відносної похибки:

$$\epsilon_{\text{зв}} = \pm \frac{\Delta x}{x_{\text{н}}} \cdot 100\%,$$

де Δx – абсолютна похибка вимірювальної величини, $x_{\text{н}}$ – нормуюче значення (верхня межа вимірювань по шкалі приладу, ширина інтервалу показів приладу). При цьому вводиться поняття класу точності.

Клас точності приладу рівний межі зведеної похибки в % без врахування знаку. Граничне значення абсолютної похибки при вимірюваннях можна оцінити за класом точності приладу на основі співвідношення

$$\Delta x_m = \frac{BM \cdot KT}{100},$$

де **BM** – верхня межа шкали, **KT** – клас точності приладу. Розрізняють вісім класів точності: 0.05; 0.1; 0.2; 0.5; 1.0; 1.5; 2.5; 4.0. Групу приладів з класом точності від 0.05 до 0.5 використовують, головним чином, для точних лабораторних вимірювань і називають **прецизійними**; прилади класу від 1.0 до 4.0 називають **технічними**.

Таким чином, для засобів вимірювання відома лише максимальна похибка, яку вони можуть дати, бо при їх виготовленні похибки не встановлюють, а лише перевіряють, чи вони не виходять за межі допустимої норми (тобто класу точності). Якщо клас точності не вказується, то межа абсолютної похибки пристрою приймається рівною $\frac{1}{2}$ ціни поділки шкали.

4 Системи електровимірювальних приладів

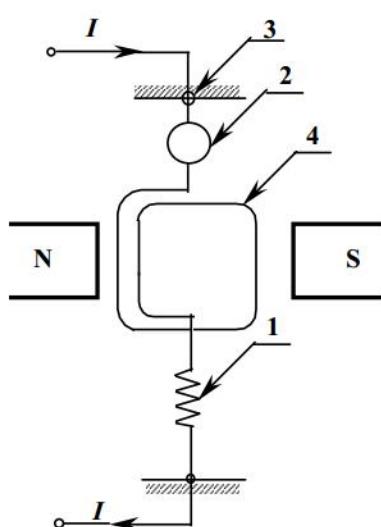


Рисунок 4.1: 1 – металева стрічка; 2 – дзеркальце; 3 – підвіс; 4 – рухома рамка

складна будова.

Поєднання вимірювального механізму магнетоелектричної системи з термоелектричним перетворювачем дозволяє застосувати пристрій для вимірювання змінних струмів.

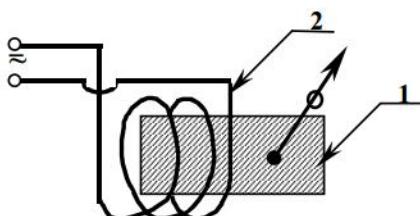


Рисунок 4.2: 1 – рухоме феромагнетне осердя; 2 – нерухома катушка

4.1 Принцип дії гальванометра магнетоелектричної системи базується на взаємодії поля постійного магнету зі струмом, що пропускається через рухому рамку (рис. 4.1).

Гальванометром називають високочутливі прилади, які мають неградуйовану шкалу. Ціна поділки шкали визначається експериментально або за паспортом приладу. Гальванометри магнетоелектричної системи є основною частиною будь-якого амперметра чи вольтметра постійного струму.

Переваги магнетоелектричних приладів: висока чутливість, мале споживання електричної енергії, рівномірна шкала.

Недоліки: чутливість до перевантажень, можливість вимірювання тільки постійних струмів, порівняно

4.2 Принцип дії приладу електромагнетної системи базується на взаємодії магнетного поля катушки зі струмом з рухливим феромагнетним осердям (рис. 4.2).

Переваги приладів електромагнетної системи: стійкість до перевантажень, відносна простота конструкції, придатність для вимірювань постійного і змінного струмів.

Недоліки: нерівномірність шкали, менша чутливість і точність ніж для приладів магнетоелектричної системи, залежність показів від впливу зовнішніх магнетних полів.

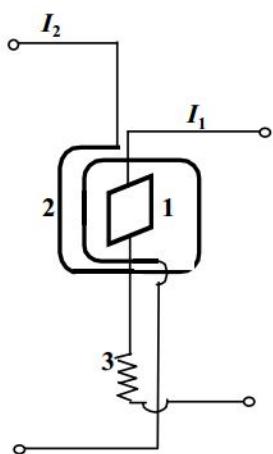


Рисунок 4.3: 1 – рухома рамка; 2 – нерухома котушка; 3 – металева стрічка (або ізольована спіральна пружина)

4.3 Принцип дії приладу електродинамічної системи ґрунтуються на взаємодії магнетних полів двох котушок зі струмом (рухомої і нерухомої) (рис. 4.3).

Котушки в приладах електродинамічної системи з'єднують послідовно або паралельно, залежно від призначення. В амперметрах котушки з'єднують паралельно (нерухома виконує роль шунта). У вольтметрах обидві котушки з'єднують послідовно разом з додатковим опором. У ватметрах нерухома котушка вмикається в коло послідовно, а рухома разом з додатковим опором – паралельно споживачам енергії.

Переваги: такі прилади призначені для постійного та змінного струмів, відзначаються високою точністю (через відсутність в котушках металевих частин).

Недоліки: низька чутливість, нерівномірність шкали (окрім ватметра), чутливість до перевантажень, вплив зовнішніх магнетних полів на покази приладу.

4.4 Приклади використання інших вимірювальних систем

Серед приладів індукційної системи широке застосування мають лічильники електричної енергії змінного струму. Електростатичні прилади використовуються головним чином для вимірювання напруги в колах постійного і змінного струмів в широкому діапазоні частот. Прилади електронної системи являють собою поєднання вимірювальної схеми на базі електронних ламп чи напівпровідниковых елементів і вимірювального механізму магнетоелектричної або електростатичної системи. Вони використовуються для вимірювання в радіоелектронних схемах напруг і частот значних діапазонів. Цифрові електронні прилади невідому величину, що вимірюється, визначають в дискретно-цифровій формі за допомогою цифрових індикаторів. Вони мають ряд переваг над звичайними – висока точність і швидкість вимірювання, повна автоматизація процесу вимірювання, можливість передачі результатів на відстані тощо.

5 Зміна меж вимірювання амперметра і вольтметра

Будь-який електровимірювальний прилад у процесі вимірювань не повинен змінювати своїх параметрів та режиму дії об'єкта вимірювань. Тому опір амперметра, який під'єднується в коло послідовно, мусить бути малим, а опір вольтметра, який під'єднується паралельно до навантаження – великим.

5.1. Шунт

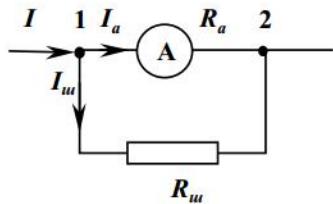


Рисунок 5.1

Розширення меж вимірювання амперметра досягається під'єднанням паралельно до амперметра так званого шунта (рис. 5.1).

Очевидно $U_a = U_{\text{ш}}$ та $I = I_a + I_{\text{ш}}$. Тому при $\frac{I}{I_a} = n$

необхідно вибрати $R_{\text{ш}} = \frac{R_a}{n-1}$. При $R_{\text{ш}} \ll R_a$ для опору з'єднання маємо $R_x \approx R_{\text{ш}}$. Тому малий шунт зменшує вплив амперметра на електричні характеристики кола.

5.2 Додатковий опір

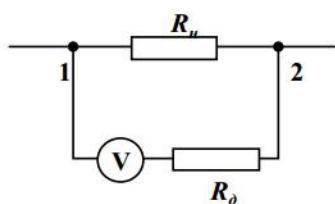


Рисунок 5.2

Розширення меж вимірювання вольтметра досягається під'єднанням послідовно до вольтметра додаткового опору (рис. 5.2).

Очевидно $I_V = I_d$ та $U_n = U_V + U_d$. Тому при $\frac{U_n}{U_V} = n$ необхідно вибрати $R_d = (n-1) \cdot R_V$. При

$R_V + R_d \gg R_n$ для опору з'єднання маємо $R_x \approx R_n$. Тому великий додатковий опір зменшує вплив вольтметра на електричні характеристики кола.

6 Умовні позначення на шкалах електровимірювальних приладів

Для правильного застосування електровимірювального приладу слід дотримуватися технічних особливостей, вказаних на шкалі приладу.

Таблиця 6.1

Зміст позначок	Умовне позначення
1	2
Позначення принципу дії приладу	
Магнетоелектричний з рухомою рамкою	
Магнетоелектричний з рухомим магнетом	
Логометр магнетоелектричний	
Електромагнетний	
Електродинамічний	

Продовження таблиці 6.1

1	2
Індукційний	
Вібраційний	
Електростатичний	
Додаткові позначення	
Термоперетворювач неізольований (термопара торкається нагрівника)	
Термоперетворювач ізольований (термопара ізольована від нагрівника)	
Перетворювач електронний у вимірювальному колі	
Випрямляч напівпровідниковий	
Напруга випробувальна для ізоляції, 500 В	
Напруга випробувальна, більша за 500 В (наприклад, 2 кВ)	
Посилання на відповідний документ	
Резистор	
Екран електростатичний	
Екран магнетний	
Затискач для заземлення	
Коректор	
Клас точності, %, при нормуванні похибки від межі вимірювання (наприклад, 1,5%)	1,5
Клас точності, %, при нормуванні похибки від довжини шкали (наприклад, 1,5%)	
Струм змінний однофазний	
Струм постійний	—
Струм постійний і змінний	
Струм трифазний змінний	

Продовження таблиці 6.1

1	2
Горизонтальне положення приладу	
Вертикальне положення приладу	
Положення приладу під кутом 60°	 60°

На шкалі приладу можуть бути інші позначення – одиниці вимірювання, робоча частота, ступінь захисту від впливу зовнішніх полів тощо.

7 Контрольні питання та завдання

- 7.1 Які основні характеристики якості електровимірювальних приладів?
- 7.2 Які основні особливості конструкцій характерні для різних систем електровимірювальних приладів?
- 7.3 Чим визначається клас точності вимірювального приладу? Які є класи точності?
- 7.4 Як можна розширити межі вимірювання амперметра і вольтметра?
- 7.5 Описати прилад за умовними позначеннями на шкалі.
- 7.6 Розрахувати похибки і чутливість приладу за шкалою приладу та його показами.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За ред. І.Т.Горбачука.- Київ: Вища школа, 1992.- 512 с.
2. Фізичний практикум: Ч. 2 / За ред. В.П.Дущенка.- Київ: Вища школа, 1984.- 256 с.
3. Кортнев А.В. и др. Практикум по физике.- М.: Высшая школа, 1963.- 516 с.
4. Вартабедян В.А. Загальна електротехніка.- Київ: Вища школа, 1971.- 358 с.

МЕТА РОБОТИ: Побудувати модель електростатичного поля за допомогою еквіпотенціальних та силових ліній для електродів різної конфігурації.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 1) гальванометр;
- 2) два металевих зонди;
- 3) дві пари електродів різної форми;
- 4) підставка для закріплення електродів і паперу;
- 5) джерело постійної е.р.с.;
- 6) з'єднувальні провідники;
- 7) лінійка, олівець, вода, папір.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТУ

Нерухомий електричний заряд створює в навколоишньому просторі статичне електричне поле. На будь-який заряд, внесений в це поле, діє електрична сила, що є головною властивістю поля.

Електричне поле є особливим станом матерії, що передає взаємодію. Сильною характеристикою поля є його напруженість \vec{E} . **Напруженість електричного поля E чисельно дорівнює силі, з якою поле діє на одиничний позитивний заряд, поміщений в дану точку поля:**

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{\text{ел}}}{q_0}. \quad (2.1)$$

Напрям вектора \vec{E} збігається з напрямом сили, що діє на заряд, а величина напруженості вимірюється в Н/Кл.

При цьому вважається, що заряд q_0 не спотворює поля, в якому він знаходиться.

Розглянемо поле, утворене точковим зарядом q . За законом Кулона сила електричної взаємодії між двома точковими зарядами q_0 і q у вакуумі рівна:

$$F_{\text{ел}} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad (2.2)$$

де r - віддаль між двома зарядами; $\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - електрична стала. Напруженість поля, створеного зарядом q на віддалі r , тепер запишеться у формі

$$E(r) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (2.3)$$

В ізотропному і однорідному діелектричному середовищі

$$E = \frac{E_0}{\epsilon},$$

де E_0 - напруженість поля у вакуумі; ϵ - діелектрична проникливість середовища ($\epsilon \geq 1$).

Електричне поле можна описувати аналітично у вигляді залежності $E(r)$ або за допомогою силових ліній (графічно).

Сильною лінією називається лінія, дотична до якої в кожній точці співпадає за напрямом з вектором напруженості електричного поля в цій точці. Таким чином, силова лінія визначає в кожній точці, через яку вона проходить, напрям напруженості \vec{E} , а отже, і напрям сили, що діє на позитивний заряд, поміщений в цю точку поля. Густота силових ліній характеризує числове значення напруженості.

Силові лінії статичного поля починаються і закінчуються на зарядах і ніде не перетинаються.

Енергетичною характеристикою поля є його потенціал. Він вимірюється роботою, виконаною силами поля при переміщенні одиничного позитивного заряду із даної точки поля в точку, де дія поля вже не проявляється. Дійсно, робота переміщення заряду q_0 силами електричного поля точкового заряду q із однієї точки поля r_1 в другу r_2 рівна:

$$A_{12} = \int_{r_1}^{r_2} \vec{F} d\vec{r} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = q_0 (\phi_1 - \phi_2), \quad (2.4)$$

де $\phi_1 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_1}$ - потенціал початкової точки, а $\phi_2 = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_2}$ - кінцевої. Тепер для $r_2 \rightarrow \infty$

маємо $\phi_2 = 0$ і тоді $\phi_1 = \frac{A_{1\infty}}{q_0}$. Вимірюється потенціал у Вольтах: 1 В = 1 Дж/Кл.

Вираз роботи через різницю потенціалів зберігає зміст і для поля, утвореного будь-яким розподілом зарядів.

Потенціал є функцією віддалі від даної точки до заряду. Проте, можна виділити таку сукупність точок, для яких потенціал буде однаковим. Для поля, утвореного точковим зарядом, такі сукупності точок будуть утворювати концентричні сферичні поверхні. **Геометричне місце точок одинакового потенціалу називається еквіпотенціальною поверхнею.**

Силові лінії завжди перпендикулярні до поверхні одинакового потенціалу. Дійсно, при переміщенні одиничного позитивного заряду сила, що діє на нього зі сторони поля, чисельно дорівнює напруженості E , а елементарна робота рівна

$$\Delta A = E \Delta l \cos \alpha, \quad (2.5)$$

де Δl – елементарний відрізок шляху, α - кут між напрямом вектора напруженості і напрямком переміщення.

З другої сторони, робота переміщення додатнього одиничного заряду із точки з потенціалом ϕ в точку з потенціалом $\phi + \Delta\phi$ чисельно дорівнює (на основі означення потенціалу)

$$\Delta A = \phi - (\phi + \Delta\phi) = -\Delta\phi, \quad (2.6)$$

де $\Delta\phi$ - приріст потенціалу.

Якщо переміщення проходить по еквіпотенціальній поверхні, то робота, виконана полем, буде дорівнювати нулю, оскільки $\Delta\phi = 0$. Із порівняння двох формул для ΔA маємо, що в цьому випадку $\cos\alpha = 0$, або кут $\alpha = 90^\circ$; тобто, силові лінії є перпендикулярними до еквіпотенціальної поверхні в даній точці поля.

Значення напруженості E виражається через градієнт потенціалу $\frac{\Delta\phi}{\Delta l}$ (зміну

потенціалу $\Delta\phi$ на одиницю довжини в напрямку нормалі до еквіпотенціальної поверхні). Дійсно, з порівняння (2.5) і (2.6) можемо записати

$$E_l = -\frac{\Delta\phi}{\Delta l}, \quad (2.7)$$

де $E_l = E \cdot \cos \alpha$. З формули (2.7) видно, що вектор напруженості поля спрямований в сторону зменшення потенціалу: для $E_l > 0$ необхідно щоб $\Delta\phi < 0$; також випливає, що напруженість можна вимірювати у В/м.

Будова приладу, що використовується при дослідженні електростатичного поля, показана на рис. 2.1.

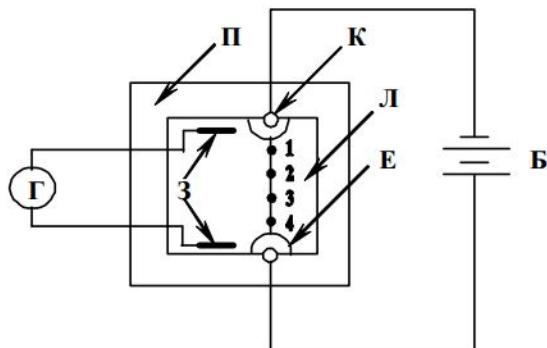


Рисунок 2.1

Базова частина приладу – підставка **P** (плоский, прямокутної форми листок ізолятора). Симетрично поблизу країв цього листка вмонтовані дві клеми **K**. До них знизу під'єднані клеми батареї **B**, а зверху затиснуті гайками плоскі електроди **E**, які притискають до підставки вологий фільтрувальний папір **L**.

На установці електростатичне поле заряджених тіл моделюється стаціонарним електричним полем постійного струму між електродами в слабопровідному середовищі (папері, змоченому водою) [1]. Джерело е.р.с.

підтримує між електродами постійну різницю потенціалів і по поверхні змоченого паперу тече слабкий струм. Лінії струму відтворюють силові лінії електричного поля, як це випливає з закону Ома в диференціальній формі: $\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$, де \vec{j} - вектор густини струму в певній точці провідної площини, σ - питома електропровідність змоченого паперу, \vec{E} - напруженість електричного поля в цій же точці. Наявність слабкого струму забезпечує також спливання заряду з металевого зонда **З**, поміщеного в деяку точку провідної площини, і тоді він приймає потенціал даної точки [2]. Це дозволяє використати метод зондів для вимірювання розподілу потенціалу.

3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 3.1 Закріпити фільтрувальний папір і круглі електроди на підставці і провести на папері між центрами електродів пряму лінію, яку прийняти за вісь x ; папір змочити.
- 3.2 Вивчити розподіл спаду потенціалу між електродами вздовж проведеної на папері лінії. Для цього, приєднавши зонди **З** до клем гальванометра **Г** (кінці зондів необхідно оберігати від зіткнення з клемами установки, тому що це приводить до псування гальванометра), помістити вістря одного із зондів безпосередньо близько до електрода, не торкаючись його (точка 1). Вістря другого зонда розмістити на невеликій віддалі від точки 1 по осі x (точка 2) і виміряти відхилення стрілки гальванометра, що відповідає певній різниці потенціалів між точками 1 і 2. Потім вістря першого зонда помістити в точку 2, а другим зондом знайти таку точку на осі x (точка 3), щоб відхилення стрілки гальванометра було таке ж, як і між точками 1 і 2, тобто різниця потенціалів була рівна попередній. Таким чином знайти на осі x 6-7 точок, різниця потенціалів між якими була б однаковою.
- 3.3 Виміряти лінійкою віддалі Δl між пронумерованими точками вздовж осі x .
- 3.4 Результати вимірювань і дані гальванометра записати в таблицю 3.1:

Таблиця 3.1

Пара точо к	Віддалі між ними, Δl , м	Покази галваномет ра, a , н	Ціна поділки галваномет ра, c , А/под	Опір галваномет ра, R , Ом	$\Delta\phi$, В	E_b , В/м
-------------------	--	-------------------------------------	---	------------------------------------	---------------------	----------------

- | | |
|-----|--|
| 3.5 | Для знаходження еквіпотенціальних ліній вістря одного із зондів встановити на осі x в точці 1. Переміщаючи вістря другого зонду вправо і вліво від вказаної лінії, знайти 5-6 точок, які мають одинаковий потенціал (стрілка гальванометра при цьому не відхиляється), як і в точці 1 на осі x . Всі знайдені точки відмітити олівцем і з'єднати їх плавною кривою, яка і буде лінією, що зображує переріз еквіпотенціальної поверхні. Analogічно знайти точки для еквіпотенціальних ліній, що проходять через всі відмічені точки на осі x . Потім виконати те саме з електродами другої форми. |
| 3.6 | Визначити за формулою (2.7) значення напруженості електричного поля між еквіпотенціальними лініями вздовж осі x і занести в таблицю 3.1. Різницю потенціалів між лініями визначити за формулою:
$\Delta\varphi = n \cdot c \cdot R,$ де n – покази гальванометра при вімкненні його між сусідніми точками вздовж осі x , c – ціна поділки гальванометра, R – його опір. |
| 3.7 | Замалювати картинку поля між електродами за допомогою силових і еквіпотенціальних ліній. Описати поле за отриманою картинкою (див. [2, 3]). |

4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 4.1. Дати означення електричного поля. В чому суть методів фізичного та математичного моделювання поля?
- 4.2. Сформулювати закон Кулона.
- 4.3. Сформулювати закон збереження електричного заряду.
- 4.4. Дати означення напруженості електричного поля. Одиниці напруженості.
- 4.5. Дати означення потенціалу поля. Одиниці потенціалу.
- 4.6. Дати тлумачення силової та еквіпотенціальної лінії. Перерахувати їх властивості.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За ред. І.Т.Горбачука.- Київ: Вища школа, 1992.- 512 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 3: Электричество.- М.: Наука, 1983.- 688 с.
3. Детлаф А., Яворский Б. Курс физики.- М.: Высшая школа, 1989.- 608 с.

МЕТА РОБОТИ: Визначення ціни поділки і внутрішнього опору гальванометра методом шунтування.

I ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 1) гальванометр магнетоелектричної системи;
- 2) шунт Р34 (0-900 Ом);
- 3) магазин опорів MCP-60 М (0,01 Ом – 10000 Ом);
- 4) джерело струму з відомою е.р.с. (акумулятор або гальванічний елемент);
- 5) перемикач і два ключі;
- 6) з'єднувальні провідники.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Гальванометром називають високочутливі прилади, які мають неградуйовану шкалу. Щоб виміряти силу струму (або різницю потенціалів) за допомогою гальванометра, необхідно знати ціну поділки його шкали. Ціна поділки шкали, яку називають також перевідним коефіцієнтом, визначається експериментально або за паспортом приладу. Ціна поділки, або перевідний коефіцієнт гальванометра за струмом, позначається через C_a і задається в амперах на одну поділку шкали (A/под.), а за напругою – через C_v і задається у вольтах на одну поділку (В/под.). Обидва коефіцієнти пов'язані співвідношенням закону Ома:

$$C_v = C_a R_e, \quad (2.1)$$

де R_e – внутрішній опір гальванометра.

Величина, обернена до перевідного коефіцієнта C називається чутливістю гальванометра S . Чим менший перевідний коефіцієнт, тим більша чутливість, і навпаки. Чутливість гальванометра до струму S_a можна зменшувати під'єднанням шунта (або додаткового опору, якщо йдеться про S_v). Шунтом називають невеликий опір, під'єднаний паралельно до вимірювального приладу (амперметра). Шунтування дозволяє розширити межі вимірювання сили струму приладом та зменшити його вплив на електричні характеристики кола. Додатковий опір під'єнується послідовно до вимірювального приладу (вольтметра) і відіграє таку ж роль при вимірюванні напруги.

В даній роботі необхідно визначити внутрішній опір і перевідні коефіцієнти гальванометра методом шунта і відомого опору.

Так як в приладах магнетоелектричної системи відхилення стрілки пропорційне силі струму, то коефіцієнт C_a буде величиною постійною, і сила струму I при відхиленні стрілки на n поділок шкали буде

$$I = C_a \cdot n. \quad (2.2)$$

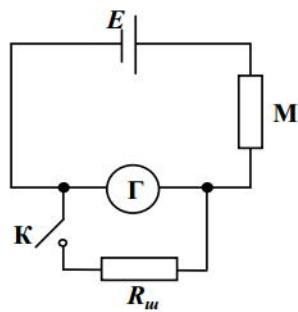


Рисунок 2.1

На рис. 2.1 дана принципова схема для визначення ціни поділки C_a і внутрішнього опору гальванометра R_e . Тут Γ – гальванометр, E – джерело струму, R_u – опір шунта, M – магазин опорів. Позначивши силу струму в колі при зовнішньому опорі R_1 і відсутності шунта через I_1 , а при зовнішньому опорі R_2 і наявності шунта через I_2 , і застосувавши друге правило Кірхгофа (або закон Ома для повного кола), одержимо в обох випадках:

$$E = I_1(R_e + R_1) = C_a n_1(R_e + R_1), \quad (2.3)$$

$$E = I_2(R' + R_2). \quad (2.4)$$

Тут нехтують опором з'єднувальних проводів і внутрішнім опором джерела струму. Опір R' розгалуження гальванометр-шунт рівний

$$R' = \frac{R_u R_e}{R_u + R_e}.$$

За першим правилом Кірхгофа $I_2 = I_e + I_{uu}$, де I_e – струм, що проходить через гальванометр, а I_{uu} – струм, що проходить через шунт. Відношення сил струмів в розгалуженнях обернено пропорційне опорам розгалужень, тобто

$$\frac{I_e}{I_{uu}} = \frac{R_u}{R_e},$$

звідки

$$I_{uu} = I_e \frac{R_e}{R_u};$$

$$I_2 = I_e + I_{uu} = I_e \left(1 + \frac{R_e}{R_u}\right).$$

Підставивши I_2 і R' в формулу (2.4), одержимо ($I_e = C_a \cdot n_2$)

$$E = C_a n_2 \left(1 + \frac{R_e}{R_u}\right) \left(R_2 + \frac{R_u R_e}{R_u + R_e}\right). \quad (2.5)$$

Розв'язавши сумісно рівняння (2.3) і (2.5) відносно R_e і C_a , одержимо

$$R_e = \frac{R_u(n_1 R_1 - n_2 R_2)}{n_2(R_2 + R_u) - n_1 R_u}, \quad (2.6)$$

$$C_a = \frac{E}{n_1(R_e + R_1)}. \quad (2.7)$$

3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

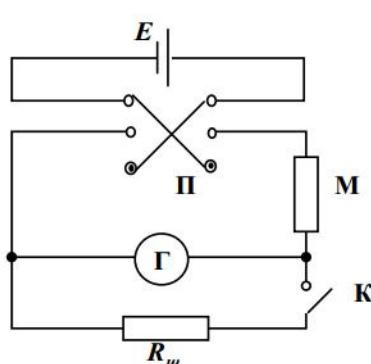


Рисунок 3.1 Електрична схема вимірювань з використанням нуль-гальванометра

3.1 Не під'єднуючи джерела струму, зібрати електричне коло за схемою, приведеною на рис. 3.1; ключі при цьому повинні бути розімкнені.

3.2 Ввести повністю опір магазину **M**. Перевірити, чи встановлена стрілка гальванометра на нуль; якщо не встановлена, то її необхідно за допомогою коректора поставити на нуль.

3.3 Після перевірки електричного кола керівником лабораторного заняття під'єднати джерело струму і приступити до вимірювань.

3.4 Замкнути перемикач **Pi**, потім підібрати такий опір R_1 магазину **M**, при якому стрілка гальванометра відхиляється би приблизно на

2/3 шкали гальванометра. Встановити число поділок n_1 і величину опору R_1 .

- 3.5 За допомогою перемикача **P** змінити напрям струму і встановити число поділок n'_1 , на яке відхилиться стрілка в іншу сторону. Розімкнути перемикач **P** і ввести повністю опір магазину **M**.
- 3.6 Увімкнувши шунт (замкнути ключ **K**), замкнути перемикач **P** і підібрати такий опір R_2 магазину **M**, щоб стрілка гальванометра відхилялась якомого більше. Встановити відхилення стрілки гальванометра n_2 .
- 3.7 Перемикачем **P** змінити напрям струму в колі і встановити відхилення стрілки n'_2 . Зафіксувати величину увімкнутого опору шунта R_{us} .
- 3.8 Analogічні виміри провести для будь-яких інших опорів шунта ще 2-3 рази. Результати вимірювань записати в таблицю 3.1:

Таблиця 3.1

№ досліду	Відхилення стрілки гальванометра при вимкненому шунті			Відомі опори			Відхилення стрілки гальванометра з шунтом			$R_z, \text{ Ом}$	$\Delta R_z, \text{ Ом}$	$\varepsilon_R, \%$
	n_1	n'_1	$n_0 = \frac{n_1 + n'_1}{2}$	$R_1, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$R_{us}, \text{ Ом}$	n_2	n'_2	$n = \frac{n_2 + n'_2}{2}$			

- 3.9 Визначити за формулами (2.6), (2.7), (2.1) внутрішній опір і перевідні коефіцієнти гальванометра (замість n_1 підставляємо n_0 , замість n_2 підставляємо n , взяті з таблиці 3.1) для кожного досліду.
- 3.10 Обчислити абсолютні і відносні похибки за серією вимірювань і виписати кінцеві результати для R_z , C_a і C_v .

4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 4.1 Пояснити будову та принцип дії гальванометра магнетоелектричної системи.
- 4.2 Яку мету переслідує шунтування вимірювальних приладів?
- 4.3 Що називають ціною поділки гальванометра? Чутливістю?
- 4.4 Як змінюється чутливість гальванометра при під'єднанні додаткового опору та шунтуванні?
- 4.5 Чому в роботі добивається максимального відхилення стрілки гальванометра?
- 4.6 Сформулювати правила Кірхгофа для розгалуженого кола.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Кортнев А.В. и др. Практикум по физике.- М.: Высшая школа, 1963.- 516 с.
2. Калашников С.Г. Электричество.- М.: Наука, 1977.- 592 с.
3. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За ред. І.Т.Горбачука.- Київ: Вища школа, 1992.- 512 с.
4. Детлаф А., Яворский Б. Курс физики.- М.: Высшая школа, 1989.- 608 с.

МЕТА РОБОТИ: Вивчення законів постійного струму та практичне володіння методом Уітстона для вимірювання опорів.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 1) джерело постійного струму (ВСШ-6);
- 2) нуль-гальванометр;
- 3) магазин еталонних опорів;
- 4) вимірювальні опори;
- 5) реохорд, реостат;
- 6) ключ, з'єднувальні провідники.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Згідно з електронною теорією провідності, частина атомів у металах дисоційована на електрони (переважно валентні) і позитивні іони, в результаті чого метали завжди мають велике число так званих вільних електронів (електронів провідності). Концентрація їх сягає значення $\sim 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

Теорія пояснює електричний опір металів розсіянням електронів провідності на теплових коливаннях атомів (іонів) та структурних неоднорідностях кристалічної гратки. Тому електричний опір металів є характеристикою, чутливою не лише до зміни температури, і точне вимірювання електроопору є важливим методом дослідження зразків. Прикладом може бути дослідження напружень в зразках, чистоти і структури металів та їх сплавів, фазових перетворень у твердих тілах та інше. Це завдання розв'язується декількома способами. Найбільш поширені з них – метод омметра, метод амперметра-вольтметра та містковий метод.

Метод омметра базується на тому, що за законом Ома при сталій напрузі струм у колі обернено пропорційний опору кола. У цьому випадку шкалу амперметра, увімкненого в коло, градуюють в одиницях опору. Нульова поділка шкали омметра відповідає правому краю шкали (при нульовому опорі струм у колі максимальний). Метод омметра використовується для приблизного вимірювання середніх за величиною опорів.

Суть **методу амперметра-вольтметра** полягає у вимірюванні сили струму амперметром і спаду напруги вольтметром на відповідній ділянці кола. Значення опору визначають за законом Ома. Метод амперметра-вольтметра є дуже простим і надійним і використовується для досить точного визначення малих і середніх опорів.

Суть **мостикового методу** полягає у використанні схеми, запропонованої Уітстоном.

Місток Уітстона призначено для точного вимірювання опорів. Він складається з реохорда **AC**, чутливого гальванометра **G** і двох опорів – відомого **R₀** і невідомого **R_x** (рис. 2.1). Реохорд являє собою закріплена на лінійці однорідну дротину, вздовж якої може пересуватися ковзаючий контакт **D**. Розглянемо схему без ділянки **BD**. Замкнемо ключ **K**. Тоді по дротині **AC** потече струм **I₂** і вздовж ней буде спостерігатися рівномірне падіння потенціалу від величини **φ_A** (у точці **A**) до величини **φ_C** (у точці

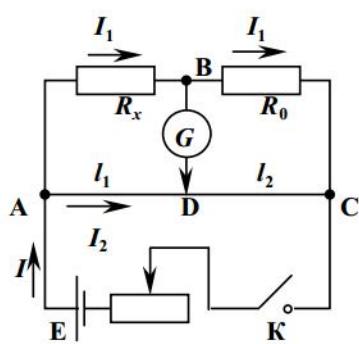


Рисунок 2.1

C). По колу ABC пройде струм I_1 , при цьому буде спостерігатися падіння потенціалу від ϕ_A до ϕ_B (на опорі R_x) і від ϕ_B до ϕ_C (на опорі R_0). Очевидно, в точці B потенціал має проміжне значення ϕ_B між значеннями ϕ_A і ϕ_C . Тому на ділянці AC завжди можна знайти точку D, потенціал якої ϕ_D дорівнює потенціалу ϕ_B в точці B. Якщо між точками B і D увімкнено гальванометр G, то в цьому випадку струм через нього не потече, оскільки $\phi_D = \phi_B$. Таке положення називають рівноважним. Виведемо умову рівноваги містка.

На основі другого правила Кірхгофа, для будь-якого замкненого контура алгебраїчна сума спадів напруг на відповідних опорах дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, що діють в контурі:

$$\sum_{(i)} I_i r_i = \sum_{(i)} \varepsilon_i . \quad (2.1)$$

Запишемо ці умови для контурів ABD та BCD при рівновазі моста:

$$\begin{aligned} I_1 R_x - I_2 r_{AD} &= 0; \\ I_1 R_0 - I_2 r_{DC} &= 0. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Розв'язавши систему рівнянь (2.2), одержуємо умову рівноваги моста

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{r_{AD}}{r_{DC}} . \quad (2.3)$$

Оскільки опори ділянок AD і DC пропорційні їх довжинам l_1 і l_2 :

$$r_{AD} = \rho \frac{l_1}{S} \quad \text{та} \quad r_{DC} = \rho \frac{l_2}{S} ,$$

де ρ – питомий опір провідника, l – довжина провідника, S – площа поперечного перерізу провідника, то

$$R_x = R_0 \frac{l_1}{l_2} . \quad (2.4)$$

Якщо довжина реохорда l , то $l_2 = l - l_1$, і тоді

$$R_x = R_0 \frac{l_1}{l - l_1} . \quad (2.5)$$

При опорі реохорда 10-20 Ом місток Уітстона описаного типу застосовується, як правило, для вимірювання невеликих опорів (від 1 до 1000 Ом). Точність вимірювання опорів містком визначається граничною чутливістю гальванометра, точністю регулювання і відліку відомих опорів, характеристиками реохорда.

Знайдемо, при якому положенні повзунка реохорда похибка вимірювання буде мінімальною. Маючи (2.5), отримаємо вираз для розрахунку відносної похибки

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R_0}{R_0} + \frac{\Delta l_1}{l_1} + \frac{\Delta(l - l_1)}{l - l_1} = \frac{\Delta R_0 \cdot l_1(l - l_1) + R_0 \cdot \Delta l_1 \cdot (l - l_1) + R_0 l_1 \cdot \Delta(l - l_1)}{R_0 l_1(l - l_1)} . \quad (2.6)$$

Очевидно, що відносна похибка буде мінімальною, коли знаменник у виразі (2.6) буде максимальним. Знайдемо умову максимуму для функції $f(l_1) = R_0 l_1(l - l_1)$:

$$\frac{df(l_1)}{dl_1} = R_0 l - 2R_0 l_1 = 0 .$$

Звідки

$$l_1 = \frac{l}{2} .$$

Таким чином, похибка буде мінімальною, коли при відсутності струму через гальванометр повзунок D стоять посередині реохорда ($l_1 = l/2$).

3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

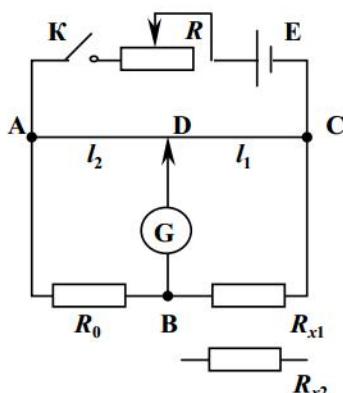


Рисунок 3.1

- 3.1 Скласти коло за схемою (рис. 3.1).
- 3.2 Ввести максимальний опір на реостаті R .
- 3.3 Встановити повзунок D посередині реохорда AC і підібрати на R_0 такий опір, щоб при замиканні ключа K стрілка гальванометра G залишалася на нулі.
- 3.4 Вивести опір реостату R і знову встановити стрілку гальванометра на нуль, змінюючи R_0 . Вичерпавши можливості магазину, вивести стрілку гальванометра на нуль, рухаючи повзунок D . Виміряти опір R_0 та l_1 і l_2 .
- 3.5 Одержані дані для опору R_0 та l_1 і l_2 записати в таблицю 3.1:

Таблиця 3.1

Опір	№ вимірю	R_0 , Ом	l_1 , мм	l_2 , мм	R_x , Ом	R_x ср., Ом	ΔR_x ср., Ом	ε_x , %
R_{x1}	1							
	2							
	3							
R_{x2}	1							
	2							
	3							
послідовно R_{x1} і R_{x2}	1							
	2							
	3							
паралельно R_{x1} і R_{x2}	1							
	2							
	3							

3.6 Повторити вимірювання, змінюючи R_0 на $\pm 10\%$. Гальванометр виводять на нуль повзунком D .

3.7 Аналогічні вимірювання проводять для R_{x2} , а також для послідовного і паралельного сполучення R_{x1} і R_{x2} .

ПРИМІТКА: Замикати коло ключем слід тільки на короткий час, навіть тоді, коли місток зрівноважено, бо нагрівання всіх частин кола веде до зміни їх опорів.

3.8 Обчислюють значення невідомих опорів за формулами (2.4) або (2.5), а також відносні та абсолютні похибки за серією вимірювань.

3.9 Розрахувати за формулами $R_{noscl.} = R_{x1} + R_{x2}$ і $\frac{1}{R_{nap.}} = \frac{1}{R_{x1}} + \frac{1}{R_{x2}}$ та порівняти їх з

вимірюваними значеннями $R_{noscl.}$ і $R_{nap.}$. Пояснити причини можливих розходжень обчислень і вимірюваних величин $R_{noscl.}$ і $R_{nap.}$.

4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 4.1 Чим зумовлений електричний опір провідників?
- 4.2 У чому полягає суть методу вимірювання електроопору містком Уітстона?
- 4.3 Що відображає умова рівноваги містка?
- 4.4 Чому гальванометр, що застосовується в містку Уітстона, має двосторонню шкалу з нулем посередині?
- 4.5 Як зміниться умова рівноваги містка, якщо гальванометр і джерело струму поміняти місцями?
- 4.6 Які переваги має метод містка Уітстона перед іншими методами визначення опорів?
- 4.7 Яке практичне застосування має вимірювання електричного опору матеріалів?
- 4.8 Сформулювати закон Ома для дільниці кола і правила Кірхгофа для розгалуженого кола.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Сірий Е.І. Загальний фізичний практикум. Ч.3.- Львів: ЛДУ, 1966.- 216 с.
2. Фізичний практикум. Ч.2. / За ред. В.П.Дущенка.- Київ: Вища школа, 1984.- 256 с.
3. Калашников С.Г. Электричество.- М.: Наука, 1977.- 592 с.
4. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За ред. І.Т.Горбачука.- Київ: Вища школа, 1992.- 512 с.
5. Детлаф А., Яворский Б. Курс физики.- М.: Высшая школа, 1989.- 608 с.

МЕТА РОБОТИ: Поглибити теоретичні знання з фізики електропровідності металів, оволодіти методикою вимірювання електроопору з допомогою містка постійного струму, навчитися обробляти результати експерименту.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 1) масляна ванна;
- 2) досліджуваний опір;
- 3) комбінований цифровий прилад Щ4313;
- 4) з'єднувальні провідники;
- 5) нагрівник;
- 6) термометр.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ДОСЛІДНА УСТАНОВКА

2.1 Електричний опір металів та його температурна залежність

Згідно з класичною електронною теорією провідності атоми у металах дисоційовані на електрони і позитивні іони, в результаті чого метали завжди мають велике число так званих вільних електронів. Ними є валентні електрони атомів металу, що найслабше зв'язані з ядрами атомів. Валентні електрони металів легко переходять від одного атома до іншого – вони становлять немовби спільну власність усіх суміжних атомів. Виявляється, що в одновалентних металах на один атом в середньому припадає один вільний електрон. Вільні електрони, або інакше електрони провідності, розподілені по всій кристалічній гратці металу, вузлами якої є позитивні іони. Позитивні іони здійснюють коливання навколо своїх положень рівноваги, а вільні електрони рухаються між ними хаотично, подібно до молекул ідеального газу (звідси і назва “електронний газ”).

Якщо до металевого провідника прикласти напругу і створити в його об'ємі електричне поле, то електрони захоплюються ним і починають переміщуватися у напрямі проти поля (за напрям струму прийнято напрям, протилежний руху електронів, тобто від позитивного полюса до негативного). При своєму русі електрони зазнають неперервних зіткнень з іонами гратки і передають їм свою енергію. В результаті відбувається перетворення енергії електронів у джоулеве тепло. Цими зіткненнями і зумовлений, головним чином, опір провідника струмові, що протікає в ньому.

За законом Ома для ділянки кола сила постійного струму є прямопропорційна прикладеній напрузі U :

$$I = \frac{U}{R}.$$

Величина R називається електричним опором ділянки кола. Одиноцею вимірювання електроопору в системі СІ є 1 Ом (1 Ом = 1 В/1 А).

Електричний опір залежить від матеріалу провідника, його розмірів і форми. Для однорідного провідника із сталим поперечним перерізом S і довжиною l опір

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.1)$$

де ρ - питомий опір (фізична величина, що характеризує електричні властивості матеріалу і чисельно дорівнює опорові провідника з одиничними геометричними розмірами). Питомий опір залежить тільки від природи і стану матеріалу та не залежить

від форми і розмірів зразка. Величина, обернена до питомого опору $\sigma = 1/\rho$, називається питомою провідністю. В системі одиниць СІ питомий опір вимірюється в Ом·м, а питома провідність в Ом⁻¹м⁻¹, або См·м⁻¹ (1 Ом⁻¹ = 1 См). На практиці часто ще користуються позасистемними одиницями питомого опору Ом·мм²/м і мкОм·см.

З підвищеннем температури інтенсивність коливного руху іонів гратки зростає, зіткнення вільних електронів з іонами частішають і опір металу збільшується. Залежність опору провідника від температури можна подати емпіричною формулою

$$R_t = R_0(1 + \alpha_1 t + \alpha_2 t^2 + \dots) \quad (2.2)$$

де R_0 – опір провідника при 0°C; α_1, α_2 – температурні коефіцієнти опору, що залежать від матеріалу провідника. В межах температур від 0 до 100°C коефіцієнти $\alpha_2, \alpha_3\dots$ здебільшого настільки малі, що ними нехтуєть і залежність опору від температури вважається лінійною. Для вищих температур ці коефіцієнти стають значними і залежність $R=f(t)$ відхиляється від лінійної. Для високих температур її знаходять, як правило, дослідним шляхом.

Таким чином, для багатьох провідників, зокрема всіх металів, можемо вважати, що при звичайних (кімнатних) температурах

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

звідки

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}. \quad (2.3)$$

Тут, температурний коефіцієнт опору α рівний відносній зміні опору провідника при підвищенні температури на 1°; вимірюється температурний коефіцієнт в град⁻¹. Опір всіх металів зростає з підвищеннем температури, значить $\alpha > 0$. Для всіх чистих металів температурний коефіцієнт опору близький до 1/273=0,00367, тобто величини температурного коефіцієнта розширення газів. Слід зауважити, що деякі сплави (наприклад, константан) мають дуже мале значення α . Тому їх застосовують для виготовлення еталонів опору.

Якщо опір провідника виміряний при двох різних температурах t_1 і t_2 , то

$$R_1 = R_0(1 + \alpha t_1) \quad \text{i} \quad R_2 = R_0(1 + \alpha t_2).$$

З двох рівнянь отримуємо розрахункову формулу для α за результатами вимірювань температурної залежності опору:

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1}. \quad (2.4)$$

Строго кажучи, величина α залежить від температури, тому за формулами (2.3) і (2.4) можна визначити лише середнє значення α в температурному інтервалі (від 0°C до t °C, наприклад). Взявши безмежно малі інтервали температур, дістанемо точне означення:

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{dR}{dt}. \quad (2.5)$$

Для чистих металів α змінюється настільки незначно, що в інтервалі температур порядку 100°C α можна вважати постійним.

Електричний опір металів – структурно-чутлива їх властивість, зумовлена, згідно з квантовою теорією, розсіянням електронних хвиль на дефектах кристалічної структури та теплових коливаннях гратки (фонах).

За правилом Маттісена питомий опір металів можна записати у вигляді суми

$$\rho = \rho_c + \rho_t,$$

де ρ_c – питомий опір, зумовлений розсіянням електронів провідності на структурних дефектах; ρ_r – питомий опір, зумовлений розсіянням електронів на коливаннях іонів (фононах).

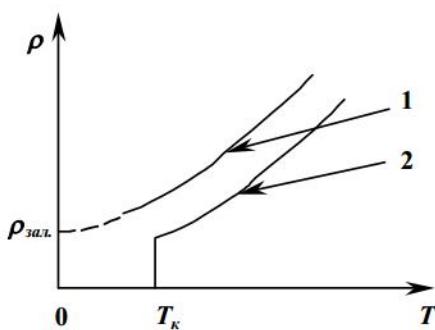


Рисунок 2.1

При підвищенні температури зразка зростає амплітуда теплових коливань атомів, що призводить, в свою чергу, до зростання електроопору. Суттєво, що опір ρ_c від температури не залежить, тому при зниженні температури фононна складова питомого опору ρ_r зменшується, тобто при $T \rightarrow 0$, маємо $\rho_r \rightarrow 0$ і $\rho \rightarrow \rho_c$; ρ_c називається ще залишковим питомим опором. Цей опір залишається в металах і сплавах при охолодженні до температур, близьких до абсолютноного нуля. На рис. 2.1 показана

залежність питомого опору звичайних металів від температури (крива 1). Відрізок, що відсікається на осі ординат, задає залишковий питомий опір $\rho_{\text{зal.}}$ ($\rho_{\text{зal.}} = \rho_c$).

У великої групи металів і сплавів при температурах близьких до абсолютноного нуля опір стрибком спадає до нуля (крива 2 на рис. 2.1). Явище стрибкоподібного зникнення опору називається надпровідністю, а температура переходу в надпровідний стан – критичною температурою T_k . Відкриті порошкові надпровідники, критична температура яких сягає 120-150 К.

Вивчення температурної залежності опору металів має важливе значення в експериментальній фізиці і особливо в метрології. На властивості металів змінювати опір із зміною температури ґрунтуються принцип роботи термометрів опору, призначених для вимірювання температури.

Термометри опору – це високочутливі прилади, здатні вимірювати різницю температур меншу як 0,001 К. Вони позбавлені цілого ряду недоліків, властивих рідинним термометрам (залежності показів від температури середовища, дисперсії скла, похибок при градууванні тощо), тому термометри опору застосовуються при температурних вимірюваннях в досить широкому інтервалі – від температур поблизу абсолютноного нуля до 1000 К. Найкращим матеріалом для термометрів опору є чиста платина, яка в широкому інтервалі температур стабільно зберігає свої властивості. Крім платини для виготовлення термометрів опору широко застосовується мідь.

Завдяки чутливості електроопору до різних факторів (структурі, внутрішніх напружень, домішок та ін.) метод, заснований на вимірюванні електроопору, застосовується в матеріалознавстві для вивчення діаграм фазових рівноваг і кінетики фазових перетворень, для отримання інформації відносно характеру, природи і концентрації різних дефектів, що виникають в металах і сплавах в результаті термічної або механічної обробки.

2.2 Методика дослідження температурної залежності електроопору металів

Дослідження залежності опору від температури проводять в спеціально пристосованих для цього рідинних або повітряних термостатах.

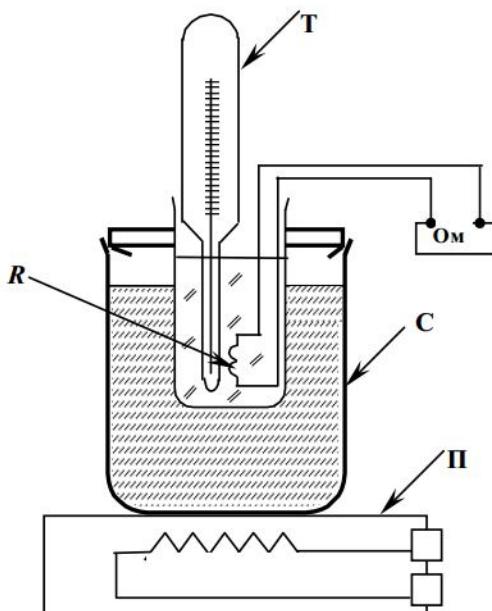


Рисунок 2.2

C, наповнену водою, яку ставлять на електроплитку **Π** (нагрівник). При нагріванні і охолодженні досліджуваного опору вимірюють одночасно його температуру (термометром) і величину опору (приладом Щ4313).

3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 3.1 Ознайомитись із схемою установки. Під'єднати вимірювальний опір до відповідних клем приладу Щ4313.
- 3.2 Виміряти опір досліджуваного провідника при кімнатній температурі.
- 3.3 Увімкнути електроплитку.
- 3.4 Через кожних 5-10°C вимірюють температуру і величину опору.
- 3.5 Вимірювання проводять до температури 80-90°C. Після цього вимикають електроплитку.
- 3.6 При наявності часу для збільшення точності дослідження рекомендується вимірювання температури і опору проводити при охолодженні, якщо воно відбувається повільніше ніж нагрівання.
- 3.7 Одержані дані записують в таблицю 3.1:

Таблиця 3.1

$t, ^\circ\text{C}$							
R_t, Ω							

- 3.8 Складають таблицю 3.2 для розрахунку α :

Таблиця 3.2

№ п/п	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	R_1, Ω	R_2, Ω	$\alpha, \text{град}^{-1}$	$\Delta\alpha, \text{град}^{-1}$	$\varepsilon, \%$
1							
2							
3							

На рис. 2.2 зображена схема установки для дослідження температурної залежності опору металів.

Досліджуваний опір (дротяний резистор) R поміщається в пробірку, заповнену неелектропровідною рідиною (гліцерином, трансформаторною оливою). Кінці опору R виводяться назовні і через ізольовані провідники під'єнуються до містка постійного струму, який служить для вимірювання величини опору.

Правила користування містком постійного струму подані на внутрішній стороні кришки містка. Для вимірювання температури досліджуваного опору в пробірку вставляється термометр **T**. Пробірка з рідиною, досліджуваним опором і термометром поміщається у фарфорову посудину

С.зн.	X	X	X	X	X			
-------	---	---	---	---	---	--	--	--

- 3.9 За формулою (2.4) обчислюють температурний коефіцієнт опору α матеріалу досліджуваного провідника. При цьому рекомендується брати пари значень R_1 і R_2 , для яких відповідні температури вимірювані через однакові інтервали (тобто, щоби $t_2 - t_1$ були, по можливості, однаковими для всіх пар значень). Обчислити не менше 3-х значень α .
- 3.10 За середніми значеннями обчислюють абсолютну і відносну похибки вимірювань.

ЗАВДАННЯ НА САМОСТІЙНУ РОБОТУ

1. Результати експерименту зобразити у вигляді графіка $R=f(t)$, відклавши по осі абсцис значення температури $t^{\circ}\text{C}$, а по осі ординат – значення R_t . Встановити можливі відхилення графіка від прямолінійності. Побудувати рівноважну лінійну залежність для заданого інтервалу температур.
2. З лінійного графіка визначити R_0 , продовживши одержану пряму до перетину з віссю R_t при $t=0^{\circ}\text{C}$. Обчислити середню величину температурного коефіцієнта опору за формулою (2.3) для окремого температурного інтервалу. Порівняти отримане значення з результатами розрахунків α за формулою (2.4).

4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 4.1 Чим зумовлений електричний опір металів за класичною і квантовою теоріями?
- 4.2 Від яких факторів і як залежать опір провідників?
- 4.3 Що таке питомий опір і питома електропровідність? В яких одиницях вони вимірюються?
- 4.4 Чому опір провідників зростає при збільшенні температури?
- 4.5 Що таке “температурний коефіцієнт опору”?
- 4.6 Як визначити середнє і точне значення температурного коефіцієнта опору?
- 4.7 Чому дорівнює питомий опір провідників за правилом Маттісена?
- 4.8 Як змінюється опір провідників при зниженні температури? Що таке надпровідність?
- 4.9 Яке застосування методу вимірювання електроопору?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За ред. І.Т.Горбачука - Київ: Вища школа, 1992.- 512 с.
2. Сірий Е.І. Загальний фізичний практикум. Ч. 3: Електрика і магнетизм.- Вид. ЛДУ, 1966.- 216 с.
3. Фізичний практикум. Ч.2 / За ред. В.П.Дущенка.- Київ: Вища школа, 1984.- 256 с.
4. Калашников С.Г. Электричество.- М.: Наука, 1977.- 592 с.
5. Детлаф А., Яворский Б. Курс фізики.- М.: Вища школа, 1989.- 608 с.

МЕТА РОБОТИ: Оволодіти методикою вимірювання електрорушійної сили джерела методом компенсації.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 1) джерело е.р.с. (ВСШ-6);
- 2) елемент Вестона;
- 3) досліджуване джерело е.р.с.;
- 4) нуль-гальванометр;
- 5) реохорд, опори, ключі.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ДОСЛІДНА УСТАНОВКА

У кожному джерелі струму відбувається перерозподіл електричних зарядів. Природа сил, які це спричиняють і підтримують постійний струм в колі різноманітна (за рахунок хімічних реакцій, контактної різниці потенціалів, вихрового електричного поля, сили Лоренца, фотоелектричного ефекту тощо). Ці сили називають сторонніми. Джерело сторонніх сил в колі постійного струму виконує роботу з переміщення носіїв заряду проти сил електростатичного поля. Величина, яка чисельно дорівнює роботі A сторонніх сил по переміщенню одиничного позитивного заряду вздовж усього електричного кола, називається **електрорушійною силою (е.р.с.) джерела**: $\varepsilon = \frac{A}{q}$ (якщо джерело струму під'єднується в електричне коло, то заряд q повертається у вихідну точку). Вимірюється е.р.с. у вольтах: 1 В = 1 Дж/Кл.

Гальванічним елементом називається хімічне джерело струму, коли два різні металеві електроди занурюють в розчин електроліту. Кожен метал набуває по відношенню до електроліта деякий потенціал (електродний потенціал). Повний стрибок потенціалу на двох електродах і є е.р.с. елемента.

Електрорушійна сила гальванічного елемента не залежить від розмірів електродів і кількості електроліту, а визначається лише їх хімічним складом і при даних умовах постійна. Кожен тип такого елементу створює відповідну е.р.с.

Згідно закону Ома для повного кола

$$\varepsilon = IR + Ir, \quad (2.1)$$

де ε - електрорушійна сила, I – сила струму, R – опір зовнішньої ділянки кола, r – внутрішній опір елемента. Спад напруги на зовнішній ділянці кола дорівнює:

$$U = IR.$$

З рівняння (2.1) випливає, що

$$U = \varepsilon - Ir. \quad (2.2)$$

Таким чином, спад напруги на зовнішній ділянці кола дорівнює електрорушійній силі мінус спад напруги на внутрішній ділянці (опорові джерела).

Отже, вимірювання е.р.с. джерела неможливо провести за показами одного вольтметра, оскільки вольтметр вимагає для своєї роботи наявності струму в колі, а тоді проявляється спад напруги на внутрішній частині джерела. Вимірювання вольтметром різниця потенціалів буде меншою, ніж е.р.с. В таких випадках, коли власний опір вольтметра великий (наприклад, для лампового вольтметра), струм в колі малий. Лише тоді $U \approx \varepsilon$.

Точні е.р.с. елементів можна поміряти компенсаційним методом Поггендорфа-Боша. Розглянемо коло, зображене на рис. 2.1:

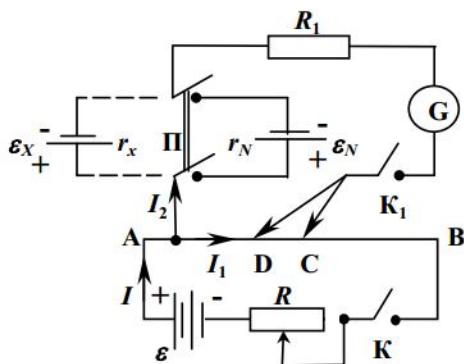


Рисунок 2.1

ϵ - батарея, ϵ_x - досліджуване джерело, ϵ_N - еталонне джерело, G - гальванометр, АВ - калібратор провід.

Якщо е.р.с. досліджуваного елемента ϵ_x менша, ніж батареї ϵ , то на реохорді АВ завжди можна знайти таку точку С, коли струм через гальванометр не проходить і стрілка гальванометра вийде на нуль (струми від ϵ та ϵ_x течуть через G в протилежних напрямках). За другим правилом Кірхгофа для верхнього замкнутого контура

$$-I_2(r_x + R_1 + r_G) + I_1 R_{AC} = \epsilon_x, \quad (2.3)$$

де r_x - внутрішній опір батареї, R_{AC} - опір ділянки АС.

Якщо струм через гальванометр $I_2=0$, то

$$I_1 R_{AC} = \epsilon_x. \quad (2.4)$$

В цьому випадку спад напруги на ділянці АС дорівнює е.р.с. досліджуваного елемента.

Замінююмо досліджуваний елемент еталонним, е.р.с. якого відома. Пересуваючи рухомий контакт на дротині, доб'ємося такого положення D, щоб струм через гальванометр не проходив. Тоді вираз (2.4) можна переписати у вигляді

$$I_1 R_{AD} = \epsilon_N. \quad (2.5)$$

Струм, який проходить через ділянку АВ залишається без змін, тому що струму на ділянці з гальванометром немає.

Розділивши вираз (2.4) на (2.5) одержимо:

$$\epsilon_x = \epsilon_N \frac{R_{AC}}{R_{AD}}. \quad (2.6)$$

У зв'язку з тим, що для циліндричного провідника $R = \rho \frac{l}{S}$, де ρ - питомий опір, l - довжина, S - поперечний переріз, можемо записати

$$\epsilon_x = \epsilon_N \frac{l_1}{l_2}, \quad (2.7)$$

де l_1 , l_2 - довжини ділянок АС і АД в будь-яких одиницях. Знаючи ϵ_N і вимірювши $AC=l_1$ і $AD=l_2$, за формулою (2.7) вирахуємо ϵ_x .

Провідник реохорда АВ, який застосовується в схемі, натягнутий на лінійку, що дозволяє безпосередньо вимірювати довжини l_1 і l_2 . Ключ-кнопка K_1 дозволяє замикати і розмикати обидва кола на короткі проміжки часу, щоб не було швидкого розряду джерела ϵ , поляризації елементів ϵ_x та ϵ_N . З цією ж метою захисту елементів і гальванометра від сильних струмів в той час, поки ще не знайдено потрібні точки С або D, вводимо послідовно з гальванометром і елементом ϵ_x досить великий захисний опір R_1 (приблизно в 10-100 кОм).

Вмикаємо в коло досліджуваний елемент ϵ_x і нормальній елемент ϵ_N за допомогою перемикача Π. **Під'єднувати досліджуваний елемент і батарею необхідно однокінцевими полюсами в точці А реохорда.** В роботі застосовується високочутливий гальванометр з зеркальною шкалою. Нуль шкали знаходиться посередині (для більш вигідного визначення моменту відсутності струму).

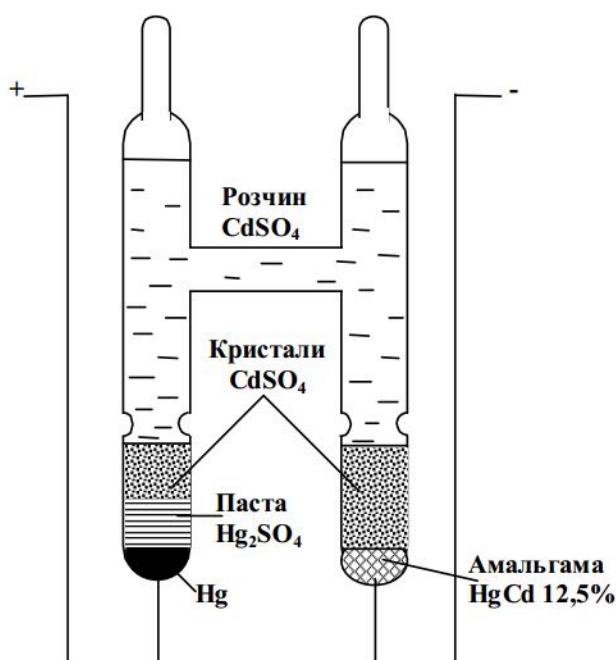


Рисунок 2.2

За еталонне джерело е.р.с. використовують ртутно-кадмієвий нормальній елемент Вестона. Він складається з скляної посудини, що має форму букви **H** (рис. 2.2). В нижній частині впаяні платинові електроди, з'єднані з затискачами. Додатну полярність має ртуть, від'ємну – амальгама кадмію. Електролітом буде насыщений розчин CdSO_4 , а деполяризатором – сірчанокислий окис ртути Hg_2SO_4 . Е.р.с. нормального елемента дуже мало змінюється з часом, тому що мала поляризація, а також мало змінюється з температурою. При $t=20^\circ\text{C}$ вона дорівнює 1,0183 В. У зв'язку з незмінністю е.р.с. нормального елемента, її можна порівнювати з іншими невідомими е.р.с. Від елемента Вестона неможна брати струм вище $10^{-6}\text{-}10^{-5}$ А і тому його застосовують виключно в компенсаційних схемах.

3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

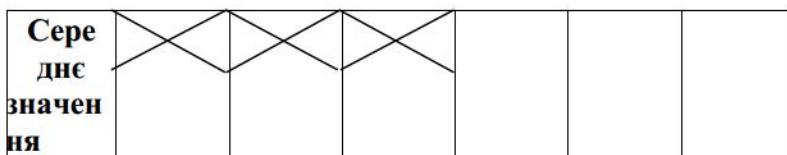
- 3.1 Склалти електричне коло за схемою на рис. 2.1, особливу увагу звернути на правильне поєднання полярності клем всіх трьох е.р.с.
- 3.2 Перемикачем **П** під'єднати джерело ε_X , замкнути ключ **K**, натиснути **K₁** і переміщуючи контакт **C**, добитися, щоб стрілка гальванометра **G** стала на нуль. Зняти довжину **AC**, це буде I_X .
- 3.3 Перемкнути **П** на ε_N і аналогічно знайти $\Delta D = I_N$.
- 3.4 Обчислити величину е.р.с. за формулою

$$\varepsilon_X = \varepsilon_N \frac{I_X}{I_N}.$$

- 3.5 Виміри проводити при 5 різних опорах на реостаті **R**. Дані записати в таблицю 3.1:

Таблиця 3.1

№ досліду	I_X , мм	I_N , мм	ε_N , В	ε_X , В	$\Delta \varepsilon_X$, В	$\Delta \varepsilon_X / \varepsilon_x$, %



3.6 Похибки у визначенні ε_X обчислити за серією вимірів.

4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 4.1 З'ясуйте умови існування електричного струму в колі.
- 4.2 Чому для підтримки постійного перепаду потенціалу на зовнішній ділянці кола необхідні сили неелектростатичної природи?
- 4.3 Що таке е.р.с. джерела? В яких одиницях вона вимірюється?
- 4.4 В чому суть методу компенсації?
- 4.5 Чи можна проводити виміри, якщо е.р.с. батареї $\varepsilon \leq \varepsilon_N$ або ε_X ?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Калашников С.Г. Электричество.- М.: Наука, 1977.- 592 с.
2. Детлаф А., Яворский Б. Курс физики.- М.: Высшая школа, 1989.- 608 с.
3. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За ред. І.Т.Горбачука.- Київ: Вища школа, 1992.- 512 с.
4. Кортнев А.В. и др. Практикум по физике.- М.: Высшая школа, 1963.- 516 с.

МЕТА РОБОТИ: Вивчення природи ефекту Зеебека та градуювання термопари.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 1)термопара;
- 2)гальванометр;
- 3)термометр;
- 4)посудина Дьюара;
- 5)вольтметр;
- 6)катушки опору;
- 7)акумулятор;
- 8)електроплитка;
- 9)посудина з вознетривкого скла;
- 10)ключ;
- 11)з'єднувальні провідники.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА СХЕМА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Ще в кінці 18 ст. А.Вольта встановив, що при дотику двох різних металів між ними виникає контактна різниця потенціалів, яка залежить лише від їх хімічної природи та температури (1-й закон Вольти). Якщо ж декілька різномірних металів приєднати один до одного в ряд, то між крайніми провідниками цього ряду виникає різниця потенціалів, що не залежить від проміжних членів ланцюга, а задається лише характеристиками цих крайніх провідників (2-й закон Вольти).

Поява контактної різниці потенціалів може бути пов'язана з відмінностями термоелектронної емісії для контактуючих матеріалів.

Дійсно, для виходу електрона за межі металу необхідно виконати деяку роботу A (**роботу виходу**). Це зумовлено насамперед тим, що завдяки рухливості електронів провідності над поверхнею металу (верхньою площею атомів) з надлишкових електронів формується своєрідна електронна хмара, а сама поверхня є шаром позитивних іонів. Біля поверхні металу формується, таким чином, дипольний шар, поле якого протидіє спробам електронів з об'єму вийти за межі зразка. Кожен метал характерний своїм значенням роботи виходу, що суттєво залежить від стану його поверхні.

В таких умовах потенціальна енергія електрона провідності в металі може бути представлена у вигляді

$$W = -e \cdot \varphi,$$

де e – величина елементарного заряду, а φ - потенціал точки в об'ємі зразка (додатній по відношенню до точки поблизу поверхні). Перепад потенціалу має місце в дуже вузькому приповерхневому шарі, так що електрони металу знаходяться у так званій “потенціальній ямі” з практично вертикальними стінками. Робота виходу тепер запишеться

$$A = e \cdot \varphi,$$

де φ можна назвати потенціалом виходу.

Розглянемо далі з'єднання двох різномірних металів (рис. 2.1). В рівноважному стані потенціал зразка у всіх точках об'єму є однаковим, тому для двох довільних внутрішніх точок **c** і **d** справедливо

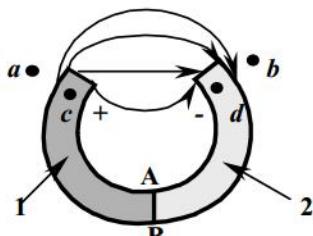


Рисунок 2.1

$$\varphi_c = \varphi_d,$$

а тоді потенціали точок *a* і *b*, що знаходяться ззовні поблизу поверхні металів, відрізняються, якщо тільки роботи виходу A_1 і A_2 для металів є різними. При цьому поверхня металів заряджається електрикою (що пов'язується з перерозподілом електричного заряду) і між вільними кінцями металів виникає електричне поле. Різниця потенціалів

$$U_k \equiv \varphi_a - \varphi_b = \frac{A_1 - A_2}{e} \quad (2.1)$$

називається **зовнішньою контактною різницею потенціалів**. Видно, що при $A_2 < A_1$, перший метал

заряджається позитивно, а другий – негативно. Зовнішня контактна різниця потенціалів для металів складає від 0,1 В до ~1 В.

Існує інша причина виникнення контактного потенціалу. Так, якщо концентрації електронів провідності в обох металах відрізняються, то в області з'єднання АВ (рис. 2.1) виникатиме дифузійний потік електронів в сторону меншої концентрації. Це приводить до формування у вузькій смузі поблизу лінії з'єднання АВ дипольного шару, поле якого буде протидіяти такому переходові електронів аж поки не встановиться динамічна рівновага – в області з'єднання утворюється перепад потенціалу, названий **внутрішньою контактною різницею потенціалів**. Тепер потенціали точок *c'* і *d'* поблизу АВ вже відрізняються на цю величину (для металів $\leq 0,01$ В).

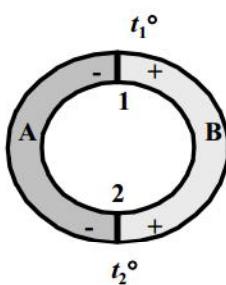


Рисунок 2.2

Розглянемо далі замкнute коло, складене з двох різних металів А і В, з'єднаних між собою надійними контактами (рис. 2.2). В умовах одинакової температури у всіх ділянках кола алгебраїчна сума контактних різниць потенціалів, при переміщенні вздовж кола, очевидно рівна нулю, оскільки для обох з'єднань 1 і 2 вони мають однакову величину і протилежний знак. Якщо ж обидва спаї підтримувати при різній температурі t_1° і t_2° , то така умова перестає бути справедливою, позаяк робота виходу і концентрація електронів в металах є залежними від температури. В колі виникає деяка електрорушійна сила,

названа **термоелектрорушійною силою (ефект Зеебека)**.

Запишемо повну електрорушійну силу у вигляді

$$E = f(t_1^\circ) - f(t_2^\circ),$$

де функція $f(t^\circ)$ має зміст е.р.с. окремого з'єднання двох металів. В найпростішому випадку спрощується лінійна залежність е.р.с. від температури

$$f(t^\circ) = f_0 + \eta t^\circ,$$

а тоді для е.р.с. термопари маємо

$$E = \eta \cdot (t_1^\circ - t_2^\circ), \quad (2.2)$$

де η називається **коєфіцієнтом термо-е.р.с.** (питомою термо-е.р.с.) для даної пари металів. Коєфіцієнт η задає термо-е.р.с., що виникає при різниці температур кінців термопари в 1°C . Величина η сягає значень $\sim 10^{-5}$ В/ $^\circ\text{C}$ для металів і значень $\sim 10^{-3}$ В/ $^\circ\text{C}$ для напівпровідників. На явиці термоелектрики заснований широко поширений в техніці спосіб вимірювання температур за допомогою, так званих, термоелектричних термометрів, що складаються з термопари і приладу для вимірювання термо-е.р.с.

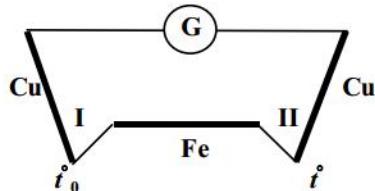


Рисунок 2.3

Розглянемо коло, де термопара з'єднана з чутливим гальванометром і один із спаїв термопари підтримується при постійній температурі t_0° (рис. 2.3). При належному виборі металів η є сталою величиною (не залежною від температури в достатньо широкому інтервалі температур) і сила струму через гальванометр пропорційна різниці температур обох кінців термопари. Якщо позначити через N число поділок шкали гальванометра, на яке переміщується стрілка під дією термо-е.р.с. E , то, внаслідок пропорційності N і E , ми можемо написати:

$$E = C \cdot N, \quad (2.3)$$

де C – постійна гальванометра, яка виражається у вольтах на одиницю поділки шкали.

Замінюючи в формулі (2.3) E через $\eta(t^\circ - t_0^\circ)$, одержимо

$$\eta(t^\circ - t_0^\circ) = C \cdot N,$$

звідки

$$\eta = \frac{C \cdot N}{t^\circ - t_0^\circ}. \quad (2.4)$$

Якщо C невідома, то її легко визначити, склавши коло за схемою, зображену на рис. 2.4.

Якщо при замиканні ключа **К** стрілка гальванометра відхиляється на N поділок, то постійна гальванометра буде:

$$C = \frac{U}{N},$$

де U – різниця потенціалів на затискачах опору R_2 . Опір ділянки при паралельному сполученні опору R_2 і гальванометра буде рівний:

$$R_{\parallel} = \frac{R_G \cdot R_2}{R_G + R_2};$$

тоді повний опір кола буде

$$R_{\parallel} + R_1 + r = \frac{R_G \cdot R_2}{R_G + R_2} + R_1 + r,$$

де r – внутрішній опір акумулятора.

Сила струму в колі буде рівна:

$$I = \frac{E_1}{\frac{R_G \cdot R_2}{R_G + R_2} + R_1 + r}.$$

Тут E_1 – е.р.с. акумулятора.

Отже, напруга U на затискачах R_2 буде рівна:

$$U = IR_{\parallel} = \frac{E_1 R_{\parallel}}{\frac{R_G \cdot R_2}{R_G + R_2} + R_1 + r};$$

так як у нашому випадку $r \ll R_1, R_2 \ll R_G$, то

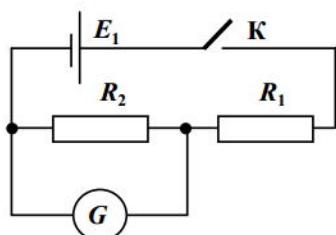


Рисунок 2.4

$$U = \frac{E_1 R_2}{R_2 + R_1}.$$

Отже

$$C = \frac{E_1 R_2}{(R_2 + R_1)N}. \quad (2.5)$$

Позначимо

$$\frac{\eta}{C} = n, \quad (2.6)$$

тоді маємо:

$$n = \frac{N}{t^\circ - t_0^\circ}. \quad (2.7)$$

Величина n , тобто зміщення стрілки гальванометра при різниці температур кінців в 1°C , називається **чутливістю термоустановки**.

Знаючи n , можна використати термопару як термометр. Дійсно, з формули (2.7) маємо:

$$t^\circ = \frac{N}{n} + t_0^\circ. \quad (2.8)$$

Тому, помістивши один кінець термопари в середовище з невідомою температурою t° і зафіксувавши температуру другого кінця t_0° та покази гальванометра, можна визначити, на основі (2.8), невідому температуру.

3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 3.1 Вимірюємо за допомогою вольтметра е.р.с. акумулятора E_1 .
- 3.2 Складаємо електричне коло, як показано на рис. 2.4.
- 3.3 Вимірюємо відхилення стрілки гальванометра N і, користуючись формулою (2.5), визначаємо постійну C в вольтах на одну поділки шкали.
- 3.4 Розбираємо коло.
- 3.5 Під'єднуємо гальванометр в коло термопари відповідно до рис. 2.3.
- 3.6 Відмічаємо початкові покази гальванометра N_0 , коли обидва кінці знаходяться при однаковій температурі (кімнатній).
- 3.7 Один з кінців термопари поміщаємо в посудину Дьюара, яка наповнена водою, температура якої протягом всього досліду залишається сталаю. Другий кінець поміщаємо в посудину з водою, яка може підігріватись за допомогою електроплитки.
- 3.8 Вимірюємо температуру води в посудині Дьюара t_0 термометром з точністю до $0,5^\circ\text{C}$.
- 3.9 Підігріваємо воду в іншій посудині і через кожні 5°C відмічаємо покази гальванометра N_1 і температуру води t_1° з точністю до $0,5^\circ\text{C}$. Вимірювання ведуть до тих пір, поки не закипить вода, і останнє вимірювання проводять при температурі кипіння води.
- 3.10 Результати спостережень заносять в таблицю 3.1:

Таблиця 3.1

$t_1, ^\circ\text{C}$							
N_1							

- 3.11 За результатами вимірювань на міліметровому папері будують графік, відкладвши по осі абсцис різницю температур двох кінців $t_1^{\circ}-t_0^{\circ}$, а по осі ординат зміщення стрілки гальванометра N_1-N_0 .
- 3.12 За формулою (2.7) визначають чутливість термоустановки. Значення $N=N_1-N_0$, що відповідає деякій різниці температур кінців, беруть із одержаного графіка. При цьому для більшої точності потрібно взяти значну різницю температур.
- 3.13 На основі формули $\eta = Cn$ визначають величину η у вольтах на градус. Обчислення η повторюють для декількох температур і розраховують середнє значення η та похибки.

4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 4.1 Сформулювати закони Вольти для контактної різниці потенціалів.
- 4.2 У чому суть ефекту Зеебека? Яка його природа?
- 4.3 Дати означення питомої термо-е.р.с.
- 4.4 Що таке “термопара”? Яке її практичне застосування?
- 4.5 Які переваги і недоліки термопар порівняно з іншими методами вимірювання температур?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Яворський Б.М. Курс фізики. Т.2: Електрика і магнетизм.- М.: Вища школа, 1972.- 344 с.
2. Сивухин Д.Е. Общий курс физики. Т.3: Электричество.- М.: Наука, 1983.- 688 с.
3. Савельев И.Е. Курс общей физики. Т.3.- М.: Наука, 1982.- 304 с.
4. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За ред. І.Т.Горбачука.- Київ: Вища школа, 1992.- 512 с.

МЕТА РОБОТИ: Вивчення механізму провідності електролітів та визначення питомого опору електроліта за допомогою мостикової схеми.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 1) посудина з електролітом;
- 2) магазин опорів MCP-60 М;
- 3) телефон;
- 4) реохорд;
- 5) батарея конденсаторів;
- 6) з'єднувальні провідники;
- 7) ключ;
- 8) джерело змінної напруги.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Більша частина чистих рідин погано проводить електрику. Так, цілком чиста вода, гас, мінеральні масла і т.д. є дуже поганими провідниками. Проте, розчини кислот і лугів у воді і в деяких інших рідинах добре проводять струм. Проходження струму через розчини солей і кислот супроводжується виділенням їх складових частин на електродах. Провідники, в яких при проходженні електричного струму помітне перенесення речовини, мають назву провідників другого роду або електролітів. Електролітична провідність зумовлена наявністю в розчині іонів, тобто заряджених атомів або молекул. Іони в електроліті виникають в результаті дисоціації молекул розчиненої речовини. Молекули дисоціюють в розчині під впливом взаємодії з молекулами розчинника.

Існує залежність між діелектричною сталою речовини і її здатністю викликати дисоціацію, якщо вона використовується як розчинник: чим більша діелектрична стала розчинника, тим більшу ступінь дисоціації він викликає.

При відсутності зовнішнього електричного поля іони в електроліті перебувають в хаотичному тепловому русі, звідки випливає, що результатуючий струм рівний нулю.

При наявності поля позитивні іони набувають додаткову швидкість u_+ в напрямку електричного поля, а негативні іони – додаткову швидкість u_- в протилежному напрямку. На хаотичний тепловий рух накладається спрямований рух іонів і в розчині виникає перенесення заряду в певному напрямку, тобто виникає електричний струм. На іон в електроліті будуть діяти дві сили – електрична сила qE (де E – напруженість електричного поля, q – заряд іона) і сила опору середовища ku (де u – потокова швидкість іона, k – коефіцієнт тертя), оскільки іон щільно оточений нейтральними молекулами розчинника і під дією сили qE рухається цілий комплекс, який носить назву сольватна. При тих швидкостях, якими володіють іони, можна вважати, що сила тертя пропорційна швидкості і, очевидно, спрямована в сторону, протилежну швидкості руху іона.

Таким чином, силу тертя, яка діє на позитивний іон, можна, вважати рівною k_+u_+ , де k_+ – відповідний коефіцієнт тертя. Позначивши масу позитивного іона через m_+ , а його прискорення через a_+ , одержимо рівняння спрямованого руху позитивного іона у вигляді:

$$m_+a_+ = qE - k_+u_+. \quad (2.1)$$

Це рівняння показує, що при невеликих швидкостях більшу роль відіграє електрична сила qE , під дією якої швидкість іона u_+ зростає. Проте із зростанням швидкості u_+ сила тертя k_+u_+ теж зростає і в деякий момент досягає такої величини, що друга частина рівняння (2.1) перетворюється в нуль:

$$qE - k_+u_+ = 0,$$

тоді перетворюється в нуль і прискорення a_+ , тобто швидкість прийме постійне значення і дорівнюватиме:

$$u_+ = \frac{qE}{k_+}. \quad (2.2, a)$$

Звідси ми одержимо, що швидкість усталеного спрямованого руху іона u_+ пропорційна напруженості електричного поля E .

Аналогічне співвідношення отримаємо для швидкості u_- негативного іона:

$$u_- = \frac{qE}{k_-}. \quad (2.2, b)$$

Струм в електроліті створюватиметься рухом іонів обох знаків. Кількість іонів кожного знаку в одиниці об'єму електроліта рівна αn_0 , де α - коефіцієнт дисоціації, n_0 – кількість молекул розчинюваної речовини в одиниці об'єму. Звідси випливає, що густина струму, яка виражається сумою густин струмів, створюваних рухом позитивних іонів за полем і негативних іонів проти поля, буде рівна:

$$j = j_+ - j_- = q\alpha n_0(u_+ + u_-) = q\alpha n_0\left(\frac{q}{k_+} + \frac{q}{k_-}\right)E. \quad (2.3, a)$$

Величина, що дорівнює швидкості іона, коли напруженість поля рівна одиниці, називається рухливістю іона. Ввівши у розгляд рухливість іонів u_+^0 і u_-^0 , рівність (2.3,a) можна записати у вигляді:

$$j = q\alpha n_0(u_+^0 + u_-^0)E, \quad (2.3, b)$$

де $u_+^0 = \frac{q}{k_+}$ і $u_-^0 = \frac{q}{k_-}$.

За законом Ома густина струму

$$j = \sigma E.$$

Порівнюючи останню рівність з виразом (2.3, б), отримаємо:

$$\sigma = q\alpha n_0(u_+^0 + u_-^0), \quad (2.4)$$

де σ - питома електропровідність (коефіцієнт електропровідності). Обернена величина до σ має назву питомого опору ρ :

$$\rho = \frac{1}{\sigma}.$$

Для визначення питомого опору електроліта скористаємося формулою для опору циліндричного провідника:

$$r_x = \rho \frac{l}{S}, \quad (2.5)$$

де r_x – опір провідника в омах, l – довжина провідника в метрах, S – переріз провідника в метрах квадратних, ρ - питомий опір (Ом·м).

З формули (2.5) видно, що питомий опір ρ за величиною є опором циліндричного провідника довжиною 1 м і площею поперечного перерізу 1 м².

3 ОПИС УСТАНОВКИ

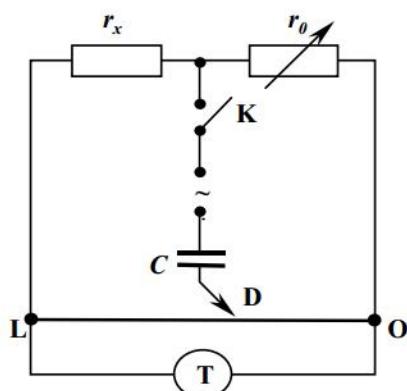


Рисунок 3.1

Для того, щоб визначити питомий опір електроліту, необхідно виміряти значення r_x , I , S і скористатися формулою (2.5). Для вимірювання r_x користуються містком Кольрауша, зібраним за схемою рис. 3.1. На схемі введені позначення: r_x – трубка з електролітом, r_0 – магазин опорів, Т – телефон, LO – реохорд, С – батарея конденсаторів, \odot - джерело змінної напруги, К – ключ, D – повзунок.

Користуються мостиком Кольрауша замість містка Уітстона тому, що місток Уітстона працює на постійному струмі, а це викликає явище електролізу в розчині електроліту, що в свою чергу викликає зміну концентрації електроліту, яка приводить до зміни опору. При використанні змінного струму це явище майже відсутнє.

Процес вимірювання базується на досягненні стану рівноваги містка (вирівнюванні електричного потенціалу точок L та O). Для цього пересувають повзунок D на середину лінійки реохорда і за допомогою магазину r_0 підбирають такий опір, при якому, після замикання кола ключем K, звук в телефоні має мінімальну гучність; потім пересувають рухомий контакт D вздовж реохорда доти, доки в телефоні зовсім не буде чути звуку. Відсутність звуку в телефоні (або його мінімальна гучність) буде умовою балансування містка. З теорії містка відомо, що тоді

$$r_x = r_0 \frac{l_{LD}}{l_{DO}}, \quad (2.6)$$

де r_x – опір електроліту, r_0 – опір магазину, l_{DO} – довжина дільниці реохорда DO, l_{LD} – довжина дільниці реохорда LD. Визначаючи за допомогою містка Кольрауша r_x і знаючи відстань між електродами I, а також площину електрода S, за формулою (2.5) знаходять питомий опір електроліту ρ .

4 ХІД РОБОТИ

- 4.1 Складають електричне коло за схемою рис. 3.1.
- 4.2 Вимірюють відстань I між електродами по осі U-подібної трубки з електролітом за допомогою міліметрової лінійки.
- 4.3 Встановлюють площину поперечного перерізу S трубки з електролітом за відомим діаметром електрода d: $S = \pi d^2 / 4$.
- 4.4 Вмикають живлення. Пересувають повзунок D на середину лінійки реохорда і регулятором магазину опорів r_0 підбирають такий опір, щоб при замкнутому ключі K звук в телефоні мав мінімальну гучність (або його зовсім не було чути). Фіксують значення r_0 , l_{DO} і l_{LD} .
- 4.5 Обчислюють питомий опір електроліту за формулою:

$$\rho = r_0 \frac{l_{LD}}{l_{DO}} \cdot \frac{\pi d^2}{4I}.$$

- 4.6 Вимірювання повторюють для двох інших положень D (зліва і справа від середини лінійки реохорда). Дані записують у звідну таблицю:

Таблиця 4.1

№ досліду	$I, м$	$d, м$	$r_0, Ом$	$I_{LD}, м$	$I_{DO}, м$	$\rho, Ом·м$	$\Delta\rho, Ом·м$	$\varepsilon_\rho, \%$
1								
2								
3								
С.зн.								

4.7 Обчислюють середнє значення питомого опору і середнє значення абсолютної похибки. Кінцевий результат виписують в одиницях Ом·м.

5 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 5.1. Природа провідності електролітів. Які провідники струму називаються провідниками першого роду? Другого роду?
- 5.2. Що називаємо питомим опором електроліту? Питомою електропровідністю? В яких одиницях вони вимірюються?
- 5.3. Чому в даній роботі схема живиться змінним струмом?
- 5.4. Проаналізувати умову рівноваги містка за його електричними характеристиками.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Калашников С.Г. Электричество.- М.: Наука, 1977.- 592 с.
2. Детлаф А., Яворский Б. Курс физики.- М.: Высшая школа, 1989.- 608 с.
3. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За ред. І.Т.Горбачука.- Київ: Вища школа, 1992.- 512 с.

МЕТА РОБОТИ: Визначення ємності невідомих конденсаторів за допомогою містка Сотті.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 1) набір конденсаторів;
- 2) джерело змінної напруги;
- 3) індикатор змінного струму (телефон);
- 4) реохорд;
- 5) з'єднувальні провідники.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Потенціал провідника завжди є пропорційним до його заряду. Фізична величина, вимірюна відношенням заряду відокремленого провідника q до його потенціалу ϕ , називається електроємністю (ємністю) C відокремленого провідника

$$C = \frac{q}{\phi}. \quad (2.1)$$

Таким чином, електроємність відокремленого провідника чисельно рівна заряду, який створює потенціал провідника, прийнятий за одиницю.

Ємність вимірюється у фарадах, однак на практиці використовують піко-, нано-, мікрофаради, оскільки ємність в 1 Ф є дуже великою.

Електроємність рівна 1 Ф, якщо заряд в 1 Кл створює потенціал провідника в 1 В.

Ємність провідника залежить від його лінійних розмірів і геометричної форми, від діелектричних властивостей оточуючого середовища, але не залежить від природи провідника.

Система з двох близькорозміщених протилежно заряджених провідників, розділених діелектриком, для якої лінії індукції електричного поля починаються на одному провіднику та закінчуються на другому, називається простим конденсатором.

Провідники, що утворюють конденсатор, називаються його пластинами (обкладки конденсатора). Конденсатори служать накопичувачами електричного заряду і зосереджують відповідну енергію електричного поля в області простору між обкладками. Заряд конденсатора (абсолютне значення заряду однієї з обкладок) є пропорційним до різниці потенціалів $U = \phi_+ - \phi_-$ між обкладками:

$$q = C \cdot U, \quad (2.2)$$

де C називається ємністю конденсатора.

Площинний конденсатор – це дві паралельні плоскі пластини, заряджені одинаковими за абсолютною значенням, але різноіменними зарядами та розділені діелектриком. Ємність площинного конденсатора в системі СІ обчислюється за формулою:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (2.3)$$

де S – площа кожної обкладки (або меншої з них), d – відстань між пластинами, ϵ_0 – електрична стала, ϵ – діелектрична проникливість речовини між пластинами.

Збільшення ємності досягається паралельним з'єднанням конденсаторів в батарею (рис. 2.1, а). При цьому конденсатори з'єднують одноіменно зарядженими пластинами. Загальна ємність батареї:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (2.4)$$

При послідовному сполученні конденсаторів (рис. 2.1, б) з'єднують їх різноіменні пластини. При цьому ємність батареї визначається рівнянням

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}, \quad (2.5)$$

а загальна ємність завжди менша, ніж найменша ємність конденсатора, що входить в батарею.

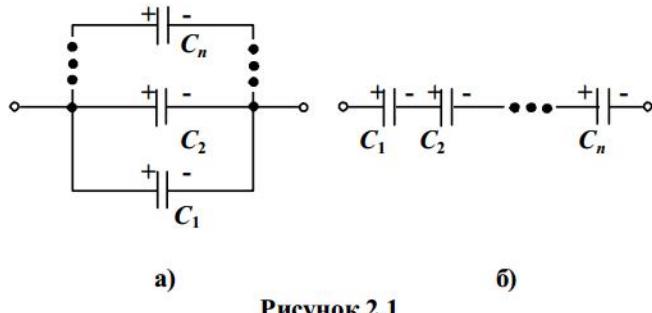


Рисунок 2.1

Для постійного струму конденсатор в колі створює великий опір – постійний струм через конденсатор не проходить (до випадку електричного пробою). Для змінного струму конденсатор створює опір, оберненопропорційний його ємності:

$$R_C = \frac{1}{\omega C}, \quad (2.6)$$

де ω - частота коливань струму. Проходження змінного струму через конденсатор пов'язується з періодичною перезарядкою пластин конденсатора. Кажуть, що коло замкнути завдяки існуванню струмів зміщення між пластинами на відміну від струмів провідності, що течуть по провідниках.

При під'єднанні до джерела змінної е.р.с., напруга U_C на пластинах конденсатора постійно змінюється і коливання U_C та заряду на обкладках конденсатора відбуваються синхронно, але коливання сили струму в колі з ємністю випереджують коливання U_C (зсув фаз дорівнює $\pi/2$).

3 ОПИС УСТАНОВКИ

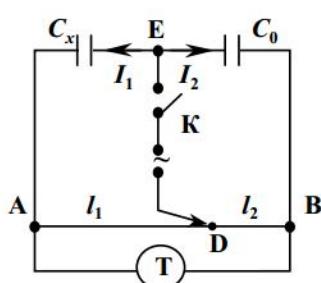


Рисунок 3.1

Для визначення ємності конденсаторів можна скористатися містковою схемою (рис. 3.1): C_0 – набір конденсаторів відомої ємності, C_x – конденсатор невідомої ємності, T – індикатор нуля змінного струму, AB – реохорд, I_1 і I_2 – плечі реохорда. Мосткова схема забезпечує високу точність вимірювання, дає змогу поміряти різні за величиною ємності при наявності лише одного еталонного конденсатора.

Суть вимірювання – в досягненні рівноваги містка (відсутність струму через індикатор).

Змінна напруга 10-20 В подається на діагональ містка **DE** від вторинної обмотки знижувального трансформатора. Коли струм через індикатор дорівнює нулю, то потенціали крайніх точок рівні між собою в кожен момент часу: $\phi_A = \phi_B$. А тоді спади напруг на C_x і на C_0 повинні збігатися як за амплітудою так і за фазою (як і на ділянках реохорда **AD** і **DB**). Тому умова рівноваги містка зводиться до співвідношення

$$R_x \cdot R_2 = R_0 \cdot R_1 \quad (3.1)$$

для повних опорів відповідних плечей містка та окремої умови на зсув фаз між струмом і напругою [2].

Підставляючи $R_x = \frac{1}{\omega C_x}$, $R_0 = \frac{1}{\omega C_0}$ та $R_1 = \rho \frac{l_1}{S}$ і $R_2 = \rho \frac{l_2}{S}$ в (3.1) (ρ - питомий опір провідника, S – переріз провідника у реохорді АВ, l_1 і l_2 – плечі реохорда),

$$C_x = C_0 \frac{l_2}{l_1}. \quad (3.2)$$

4. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 4.1 Збираємо схему містка Сотті, користуючись рис. 3.1.
- 4.2 Пересуваючи повзунок реохорда **D**, добиваємось того, щоб темний сектор індикатора (мінімальне звучання телефону) був максимальний. Записуємо l_1 та l_2 . Знаючи C_0 , по формулі (3.2) обчислюємо C_{x1} . Повторюємо вимірювання для C_{x2} .
- 4.3 Вимірюємо ємність при паралельному і послідовному з'єднанні C_{x1} і C_{x2} .
- 4.4 Обчислюємо похибки для всіх чотирьох вимірювань за формулою похибок непрямих вимірювань

$$\varepsilon_C = \pm \frac{\Delta C_x}{C_x} \cdot 100\% = \pm \left(\frac{\Delta C_0}{C_0} + \frac{\Delta l_1}{l_1} + \frac{\Delta l_2}{l_2} \right) \cdot 100\%$$

і виписуємо кінцеві результати. Врахувати, що $\frac{\Delta C_0}{C_0} \cdot 100\% = 5\%$.

- 4.5 Перевіряємо правильність формул (2.4) і (2.5) для з'єднання конденсаторів на основі даних вимірювань.
- 4.6 Результати вимірювань заносимо у відповідну таблицю.

5 КОНТРОЛЬНИ ПИТАННЯ

- 5.1 Що таке “ємність провідника”? В яких одиницях вона вимірюється.
- 5.2 Що таке “конденсатор”? Як пояснити проходження змінного струму через конденсатор?
- 5.3 Чому в даній роботі місткова схема живиться змінним струмом?
- 5.4 Який зсув фаз між струмом і напругою при проходженні змінного струму через конденсатор?
- 5.5 Як залежить ємнісний опір від частоти змінного струму?
- 5.6 Від яких параметрів залежить ємність плоского конденсатора?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Калашников С.Г. Электричество.- М.: Наука, 1977.- 592 с.
2. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За ред. І.Т.Горбачука.- Київ: Вища школа, 1992.- 512 с.
3. Фізичний практикум. Ч.2. / За ред. В.П.Дущенка.- Київ: Вища школа, 1984.- 256 с.
4. Детлаф А., Яворський Б. Курс фізики.- М.: Вища школа, 1989.- 608 с.

МЕТА РОБОТИ: Дослідним шляхом перевірити справедливість математичного формулювання закону Ома для ділянки кола змінного струму.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 1) лабораторний стіл;
- 2) котушка індуктивності;
- 3) конденсатор;
- 4) амперметр і вольтметр для постійного і змінного струму;
- 5) джерело змінної та постійної напруги (блок живлення);
- 6) з'єднувальні провідники.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА СХЕМА ЕКСПЕРИМЕНТУ

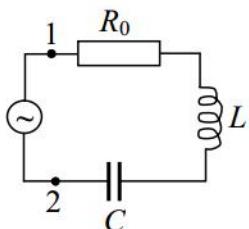


Рисунок 2.1

Розглянемо ділянку кола, де послідовно з'єднані ідеальний опір R_0 , конденсатор ємністю C та котушка індуктивностю L (в реальному колі опір R_0 може бути омічним опором котушки). Під'єднаємо таку ділянку до джерела змінної е.р.с (рис. 2.1). Значення напруги U_{12} між точками 1 та 2 для будь-якого моменту часу є сумаю спадів напруг на окремих елементах RLC -ділянки:

$$U_{12} = U_R + U_L + U_C. \quad (2.1)$$

Нехай під впливом зовнішньої е.р.с. електричний струм на ділянці змінюється за гармонічним законом

$$I = I_0 \sin(\omega t) \quad (2.2)$$

і виконується умова квазістационарності (значення сили струму однакове у всіх ділянках кола в кожний момент часу). Тоді спад напруги на опорі R_0 рівний

$$U_R = IR_0 = U_{0R} \sin(\omega t), \quad (2.3)$$

де $U_{0R} = I_0 R_0$ і струм та напруга коливаються синхронно (в одній фазі).

Спад напруги на конденсаторі U_C можна означити на основі співвідношення

$$U_C = \frac{q}{C}, \quad (2.4)$$

де заряд q на обкладках конденсатора розраховується через силу струму ($I = \frac{dq}{dt}$ за означенням)

$$q = \int Idt = I_0 \int \sin(\omega t) dt = -\frac{I_0}{\omega} \cos(\omega t).$$

Тоді матимемо

$$U_C = -\frac{I_0}{\omega C} \cos(\omega t) = \frac{I_0}{\omega C} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = U_{0C} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (2.5)$$

де $U_{0C} = I_0 R_C$ і $R_C = \frac{1}{\omega C}$ можна назвати ємнісним опором (опором, який створює конденсатор в колі змінного струму). Як випливає з (2.5) та (2.2), напруга на конденсаторі U_C коливається з відставанням за фазою на $\pi/2$ відносно сили струму.

Спад напруги на індуктивності L є противагою е.р.с. самоіндукції ($U_L = -\mathcal{E}_S = L \frac{dI}{dt}$), тому

$$U_L = I_0 \omega L \cos(\omega t) = U_{0L} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad (2.6)$$

де $U_{0L} = I_0 R_L$ і $R_L = \omega L$ можна назвати індуктивним опором (опором, який створює індуктивність в колі змінного струму). Як випливає з (2.6) та (2.2), напруга на індуктивності U_L коливається з випередженням за фазою на $\pi/2$ відносно сили струму.

Тепер амплітудне значення напруги U_0 між точками 1 та 2 (тобто на RLC -ділянці) знайдемо способом додавання гармонічних коливань (рис. 2.2):

$$U_0 = I_0 \cdot \sqrt{R_0^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (2.7)$$

при записові закону коливань напруги у формі

$$U_{12} = U_0 \sin(\omega t + \varphi). \quad (2.8)$$

Співвідношення (2.7) називають законом *Ома для ділянки кола змінного струму*, а вираз

$$Z = \sqrt{R_0^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (2.9)$$

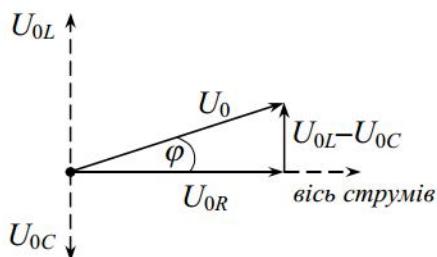


Рисунок 2.2

називають повним опором RLC -ділянки кола. Відповідно розрізняють омічний (або активний) опір R_0 , який забезпечує незворотне перетворення електричної енергії струму в теплову (на основі закону Джоуля-Ленца), та реактивний опір, що пов'язується з індуктивністю та ємністю (веде до виникнення зсуву фаз φ між коливаннями струму та напруги). Зауважимо, що активний і реактивний опори додаються геометрично (з використанням теореми Піфагора відповідно до рис. 2.2).

Перевірка співвідношення (2.7) між амплутідними значеннями сили струму I_0 і напруги U_0 можлива шляхом незалежного встановлення величини Z за формулою (2.9) та за формулою

$$Z = \frac{U_{e\phi}}{I_{e\phi}}, \quad (2.10)$$

де $U_{e\phi}$ та $I_{e\phi}$ – ефективні (або діючі) значення напруги та сили струму, що міряються безпосередньо вольтметром і амперметром. Математично ефективне значення є середньоквадратичним значенням синусоїdalного струму чи напруги; так (T позначає період коливань)

$$U_{e\phi} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \quad (2.11)$$

і аналогічно для сили струму

$$I_{e\phi} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}. \quad (2.12)$$

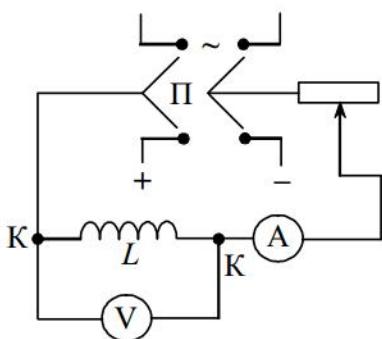


Рисунок 2.3 – Приклад під’єднання в коло катушки індуктивності

живлення).

Можна дати фізичне тлумачення ефективного значення сили струму $I_{e\phi}$ – це таке значення сили постійного струму, що забезпечує одинаковий зі змінним струмом тепловий ефект (виділяється однаюкова кількість тепла Джоуля-Ленца).

Схема електричного кола для визначення повного опору Z , індуктивності катушки L та ємності C конденсатора зображена на рис. 2.3. Тут Π – перемикач, до середніх затискачів якого під’єднується RLC -ділянка (або окремі її елементи), а до крайніх затискачів під’єднується джерело постійної або змінної напруги (блок живлення).

3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

3.1 Скласти коло за схемою, під’єднавши до затискачів КК тільки катушку L . Спочатку подати в коло постійну напругу і за вимірюваннями сили струму і напруги знайти омічний опір катушки R_0 :

$$R_0 = \frac{U_0}{I_0}.$$

3.2 Подати на ділянку кола змінну напругу і знайти повний опір катушки (за показами амперметра і вольтметра):

$$R_1 = \frac{U_{e\phi}^L}{I_{e\phi}^L}.$$

В колі змінного струму катушка виявляє, крім активного (омічного), ще й реактивний опір, тому R_1 відрізняється від R_0 ; $R_L = \sqrt{R_1^2 - R_0^2}$.

3.3 Обчислити індуктивність катушки:

$$L = \frac{\sqrt{R_1^2 - R_0^2}}{\omega};$$

$\omega = 2\pi\nu$, де ν - частота коливань струму (в промисловій мережі $\nu=50$ Гц).

Індуктивність вимірюється в генрі (Гн).

3.4 Замість катушки індуктивністю L увімкнути конденсатор ємністю C . За формулою

$$R_2 = \frac{U_{e\phi}^C}{I_{e\phi}^C}$$

знайти реактивний опір конденсатора, а далі ємність конденсатора C за формулою

$$C = \frac{1}{\omega R_2}.$$

Вимірюється ємність у фарадах (Φ).

3.5 Замість конденсатора C увімкнути послідовно з’єднані катушку L і конденсатор C . За формулою

$$Z_1 = \frac{U_{e\phi}}{I_{e\phi}}$$

знайти повний опір RLC -з’єднання.

3.6 Підставити раніше знайдені значення R_0, L, C у формулу

$$Z_2 = \sqrt{R_0^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$$

і обчислити Z_2 . Порівняти отриману величину зі значенням, знайденим у пункті 3.5.

Проаналізувати це порівняння з врахуванням інтервалу розходжені величини Z_1 .

3.7 Похиби для Z_1 шукати за співвідношенням:

$$\frac{\Delta Z_1}{Z_1} = \frac{\Delta U_{e\phi}}{U_{e\phi}} + \frac{\Delta I_{e\phi}}{I_{e\phi}},$$

де $\Delta U_{e\phi}$ і $\Delta I_{e\phi}$ розраховуються за класом точності приладу.

3.8 Занести результати вимірювань та обчислень у підсумкову таблицю:

Таблиця 3.1

U_0	I_0	R_0	$U^L_{e\phi}$	$I^L_{e\phi}$	R_1	L	$U^C_{e\phi}$	$I^C_{e\phi}$	R_2	C

$U_{e\phi}$	$I_{e\phi}$	Z_1	к.т. 	к.т. 	ΔZ_1	Z_2

3.9 Перед кожним вимірюванням визначити ціну поділки приладу.

4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 4.1 Як формулюється закон Ома для ділянки кола змінного струму?
- 4.2 Якими величинами характеризується змінний струм? Яка відмінність між середніми і діючими (ефективними) значеннями змінного струму?
- 4.3 Як проявляють себе активний та реактивний опори в колі змінного струму?
Записати вирази для індуктивного та ємнісного опорів.
- 4.4 Сформулювати фізичний зміст індуктивності та ємності та назвати одиниці їх вимірювання (за формулами означення цих величин).

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Калашников С.Г. Электричество.- М.: Наука, 1977.- 592 с.
2. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За ред. І.Т.Горбачука.- Київ: Вища школа, 1992.- 512 с.
3. Фізичний практикум. Ч.2 / За ред. В.П.Дущенка.- Київ: Вища школа, 1984.- 256 с.
4. Детлаф А., Яворський Б. Курс фізики.- М.: Вища школа, 1989.- 608 с.

МЕТА РОБОТИ: Вивчення явища термоелектронної емісії. Визначення роботи виходу електронів з вольфраму методом прямих Річардсона.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 1) функціональна група елементів (касета ФПЭ-06);
- 2) блок живлення;
- 3) універсальний вимірювальний прилад (В7-21А);
- 4) лабораторна стійка;
- 5) з'єднувальні проводи та кабель.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Термоелектронною емісією називають явище випускання електронів з поверхні нагрітих твердих тіл у вакуум (або в друге середовище). Явище можна вивчати на прикладі роботи вакуумної діодної лампи (рис. 2.1). Термоелектронна емісія з катода (К) спостерігається при достатньо високих температурах розжарення (для вольфраму вище 1000°C). Це пояснюється тим, що для виходу за межі поверхні металу електрон повинен виконати деяку роботу, названою **роботою виходу**. Остання є наслідком, в основному, двох причин. Перша з них полягає в тому, що електрони, які перебувають в тепловому русі, покидають поверхневий шар металу і формують своєрідну електронну хмару від'ємного заряду. Сама ж поверхня металу стає шаром позитивно заряджених іонів. Біля поверхні металу формується, таким чином, дипольний шар, поле якого протидіє спробам електронів вийти за межі зразка. Другоючиною, яка впливає на роботу виходу, є той факт, що електрон, який вилітає з металу, індукує (наводить) на поверхні останнього заряд протилежного знаку. Виникає сила притягання між електроном і поверхнею металу. На подолання цієї сили і витрачається певна робота.

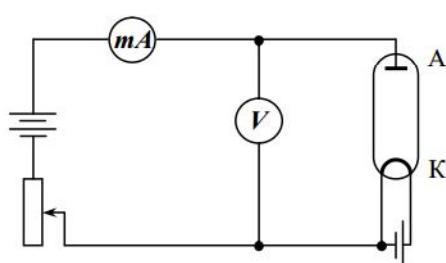


Рисунок 2.1

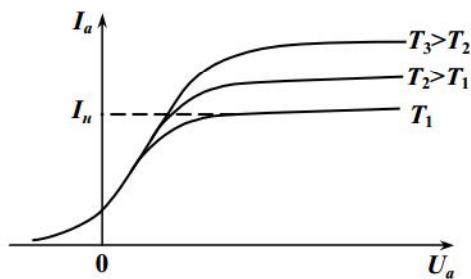


Рисунок 2.2

Сила термоелектронного струму I_a в діоді залежить від величини прикладеної між катодом (К) і анодом (А) напруги U_a і ця залежність є нелінійною (рис. 2.2), тобто закон Ома не виконується в цьому випадку. Характерною ознакою вольт-амперної характеристики (ВАХ) діодної лампи є також досягнення, при певній напрузі, деякого максимального значення сили струму I_h , свого для кожної конкретної температури розжарення катода Т. Сила **струму насичення** I_h задається числом електронів, що покидають поверхню катода за одиницю часу при даній температурі. Тобто, струм насичення характеризує емісійні властивості матеріалу катода. Величина I_h залежить від матеріалу катода, площі його активної поверхні і збільшується при підвищенні його температури.

Значення густини струму насичення j_h для даного матеріалу і температури добре описується законом Річардсона-Дешмана [1]

$$j_n = B \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{A_e}{K_B T}\right), \quad (2.1)$$

де $B = B_0(1 - r)$ і r – коефіцієнт відбиття електронів від поверхні металу, $B_0=120,4$ А/(см²·К²), A_e – позначає роботу виходу електронів з металу. Стала B та робота виходу A_e є дослідними параметрами.

Знаходження величини роботи виходу A_e , яка, фактично, визначає емісійні властивості матеріалів, є важливою задачею експериментальної фізики. На основі формул (2.1) значення роботи виходу A_e можна знайти, знявши ряд ВАХ для діодної лампи при різних температурах розжарення катода. Силу струму насичення I_n міряють безпосередньо міліамперметром під час експерименту, тоді як температуру розжарення катода знаходять шляхом використання градуювальної кривої (залежності розсіяної катодом електричної потужності від його температури для даного матеріалу) [2].

3 ОПИС ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ ТА СПОСОБУ ОБРОБКИ ДАНИХ

В даній роботі використовується стандартна установка, розроблена СКБ „Союзучприбор” [3]. Блок-схема установки подана на рис. 3.1. Характерною особливістю дослідної установки є використання в ній функціональної групи елементів ФПЭ-06 на основі діодної лампи 4Ц14С (принципова схема такої касети подана на рис. 3.2) та стандартного блоку живлення (БЖ), що разом з універсальними вимірювальними приладами (ВП) монтажуються на спеціальній лабораторній стійці.

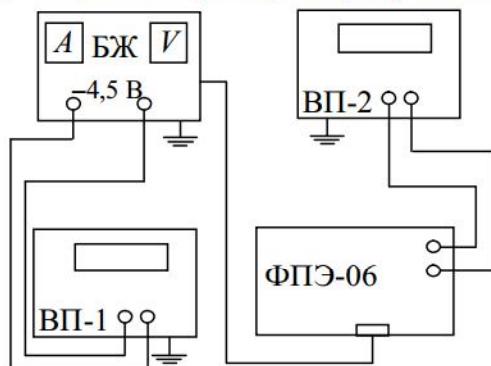


Рисунок 3.1

Блок-схема дослідної установки (ВП-1 – вимірювач напруги в колі розжарення катода, ВП-2 – вимірювач сили анодного струму)

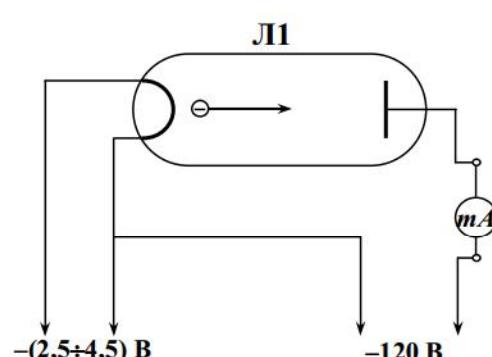


Рисунок 3.2

Принципова схема касети ФПЭ-06
(L1 – діодна лампа)

Спосіб обробки даних експерименту, що використовується в даній роботі, базується на методі лінеаризації рівняння Річардсона-Дешмана (метод прямих Річардсона) [4]. Так, на основі (2.1) записуємо

$$\frac{I_n}{ST^2} = B \cdot \exp\left(-\frac{A_e}{K_B T}\right),$$

де S – площа активної поверхні катода. Далі, після логарифмування, маємо

$$\ln\left(\frac{I_n}{ST^2}\right) = \ln B - \frac{A_e}{K_B T},$$

а після переозначення змінних

$$y = \ln\left(\frac{I_n}{ST^2}\right) \quad \text{та} \quad x = \frac{-1,6 \cdot 10^{-19}}{K_B T} \quad (3.1, a)$$

($K_B=1,4 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана) отримуємо рівняння

$$y = Ax + C \quad (3.1)$$

(тут $C = \ln B$), що характеризує лінійну залежність між змінними x та y . Множник A в рівнянні (3.1) задає тангенс кута нахилу прямої $y = y(x)$ щодо осі x -ів і чисельно рівний роботі виходу A_e , поміряній в електрон-вольтах (eВ). Отже, для визначення роботи виходу A_e достатньо побудувати графік лінії (3.1) за декількома експериментальними точками (y_i, x_i) та встановити нахил прямої транспортиром. Таку процедуру можна реалізувати з використанням ПЕОМ (див. додаток В).

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 4.1 Скласти електричне коло за схемою на рис. 3.1. Регулятори БЖ повинні знаходитися в крайньому лівому положенні, а тумблер «сеть» – в нижньому положенні.
- 4.2 Під'єднати лабораторну стійку до промислової електромережі. Регулятором БЖ виставити напругу розжарення катода U_p рівною 3,0 В за показами ВП-1.
- 4.3 Користуючись іншим регулятором БЖ, зняти вольт-амперну характеристику діодної лампи. Для цього слід збільшувати анодну напругу U_a від 0 до випадку досягнення струму насичення (коли сила анодного струму I_a практично перестає змінюватися) і зафіксувати дані для U_a через кожні 10 В (за показами вольтметра БЖ) та для сили анодного струму I_a (за показами ВП-2).
- 4.4 Повторити виміри п. 4.3 для інших трьох значень U_p в інтервалі від 3 В до 4 В. При цьому для кожної напруги розжарення U_p слід зафіксувати також силу струму розжарення I_p (за показами амперметра БЖ). Дані занести в таблицю 4.1 (для кожної пари значень U_p та I_p).

Таблиця 4.1

$U_a, \text{ В}$	0	10	20	30	40	50	60
$I_a, \text{ mA}$							

- 4.5 За допомогою кривої градуування вольфрамової нитки катода (додається) встановити температуру розжарення катода для кожного з чотирьох пар значень U_p та I_p . Для цього попередньо розраховують розсіяну катодом електричну потужність P , віднесену до одиниці активної поверхні катода:

$$\frac{P}{S} = \frac{I_p U_p}{S}, \quad (4.1)$$

де $S=1,1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$. Точність визначення температури катода T задається масштабом, вибраним при побудові градуувального графіка $\frac{P}{S} = f(T)$.

- 4.6 Скласти підсумкову таблицю даних, встановивши значення сили струму насичення I_n на основі чотирьох відзнятих ВАХ. Для цього на основі формул (3.1, а) розраховують пари точок (x_i, y_i) для побудови графіка y_i-x_i . Залежність $y=y(x)$ апроксимують деякою прямою лінією ($A_e = \operatorname{tg} \alpha$, де α - кут нахилу рівноважної прямої $y = y(x)$ до осі абсцис).

Таблиця 4.2

№ досліду	U_p , В	I_p , А	P/S , Вт/см ²	T , К	I_n , мА	x_i	y_i	A_e , еВ	ε_A , %
1	3,0								
2	3,5								
3	3,75								
4	4,0								

Похибку вимірювань оцінюють за формулою

$$\varepsilon_A = \frac{|A_e - A_w|}{A_w},$$

де $A_w=4,54$ еВ є табличним значенням роботи виходу для вольфраму.

5 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 5.1 В чому фізична суть явища термоелектронної емісії? Як воно проявляється при роботі діодної лампи?
- 5.2 Яка фізична природа роботи виходу A_e електронів з металу?
- 5.3 Якісно пояснити хід ВАХ діодної лампи. Від чого залежить величина сили струму насищення?
- 5.4 В чому полягає зміст методу прямих Річардсона для визначення роботи виходу електронів?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Калашников С.Г. Электричество.– М.: Наука, 1977.– 591 с.
2. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За ред. І.Т.Горбачука.–К.: ВШ, 1992.– 512 с.
3. Оборудование лаборатории “Электричество и магнетизм” / Техническая документация.– Днепропетровск: СКБ „Союзучприбор”, 1993.
4. Практикум по физике: Электричество и магнетизм / Под ред. Николаева Ф.А.– М.: ВШ, 1991.– 150 с.

ДОДАТОК: Залежність розсіяної електричної потужності P від температури T вольфрамової нитки (l – довжина нитки катода, d – її діаметр) [2]

$\frac{P}{ld}$, Вт/см ²	17,3	24,3	33,3	44,5	58,5	75,4	95,7	120
T , К	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200

$\frac{P}{ld}$, Вт/см ²	148	181	219	263	313	369	432	504
T , К	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000

МЕТА РОБОТИ: Визначення відношення заряду електрона до його маси за скидовими характеристиками магнетрона.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 6) функціональна група елементів (касета ФПЭ-03);
- 7) блок живлення;
- 8) універсальний вимірювальний прилад (В7-21А);
- 9) лабораторна стійка;
- 10) з'єднувальні проводи і кабель.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

При визначенні відношення e/m для електрона в даній роботі використовується метод магнетрона. **Магнетрон** – це електронна вакуумна лампа з циліндричним анодом і катодом у вигляді дротини, що розміщена на осі анода. Така система електродів поміщена в однорідне магнетне поле, створене соленоїдом (достатньо довгою котушкою, коаксіальною з системою електродів). Електрони, що вилітають з катода внаслідок термоелектронної емісії, рухаються, таким чином, в перехресному електричному і магнетному полях (напруженість \vec{E} електричного поля між електродами спрямована вздовж радіуса від анода до катода, індукція магнетного поля \vec{B} соленоїда – вздовж осі циліндричної системи електродів). Рух електрона в таких умовах, коли проявляються одночасно електрична і магнетна складові сили Лоренца (\vec{g} – швидкість електрона)

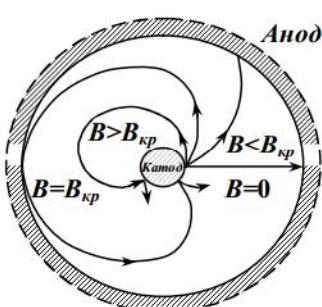


Рисунок 2.1

Траекторія електронів в циліндричному магнетроні при різних значеннях індукції магнетного поля

$$\vec{F}_{\text{Лор}} = -e\vec{E} - e[\vec{g} \times \vec{B}],$$

носить складний характер (рис. 2.1): електрони прискорюються електричним полем в напрямку до анода і одночасно обертаються навколо напрямку силових ліній магнетного поля. При значеннях індукції магнетного поля $B > B_{kp}$ електрони, практично, не доходять до анода і сила анодного струму різко падає. Розрахунок показує [1, 2], що критичне значення величини індукції магнетного поля B_{kp} в такому циліндричному магнетроні задається виразом

$$B_{kp} = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{\frac{e}{m}}} \cdot \frac{\sqrt{U_a}}{r_a \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2} \right)}, \quad (2.1)$$

де U_a – анодна напруга, r_k та r_a – радіуси катода і анода, (e/m) – питомий заряд електрона.

Оскільки магнетне поле в такій установці створюється спеціальною котушкою, надітою на діодну лампу, то індукцію магнетного поля в центрі соленоїда (тобто, в області між катодом і анодом) можна розрахувати за формулою [2]

$$B = \mu_0 I_c n \frac{L}{\sqrt{L^2 + D^2}}, \quad (2.2)$$

де L – довжина катушки, D – її діаметр, $n = \frac{N}{L}$ – лінійна густина витків обмотки (N – загальне число витків в катушці), I_c – сила струму в соленоїді, μ_0 – магнетна стала системи одиниць SI. Тобто, магнетне поле катушки можна визначити незалежним способом (розрахувати за параметрами катушки та значенням сили струму I_c). Знаючи геометричні розміри електродів магнетрона (r_k та r_a) і умови спостереження анодного струму (напругу U_a), з порівняння формул (2.1) та (2.2) легко встановити значення e/m . При цьому B_{kp} визначають за **скідовими характеристиками магнетрона** (різким

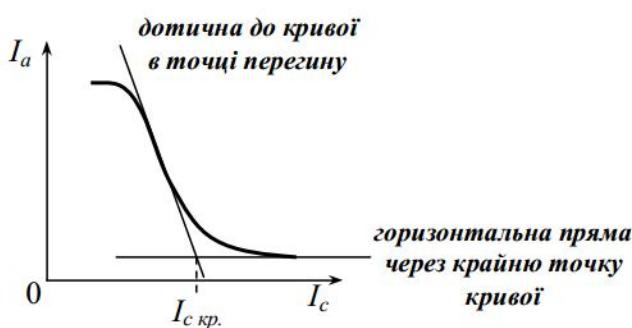


Рисунок 2.2
Скідова характеристика магнетрона

зменшенням сили анодного струму при досягненні певного значення сили струму в соленоїді $I_{c kp}$). В реальних умовах експерименту зміна сили анодного струму в області значення $I_{c kp}$ може виявитися не різкою, а досить плавною. Причинами можуть бути некоаксіальність електродної системи, неоднорідність магнетного поля, недостатньо високий вакуум в лампі, наявність

початкових швидкостей у термоелектронів і т.п. Тому необхідно застосувати певну процедуру встановлення $I_{c kp}$ [2], що ілюструється рис. 2.2.

3 ОПИС ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ

В даній лабораторній роботі використовується дослідна установка, розроблена СКБ „Союзучприбор” [3]. Блок-схема такої установки подана на рис. 3.1, а принципова схема функціональної групи елементів (касети) ФПЭ-03 – на рис. 3.2. Основні складові установки (блок живлення, універсальний вимірювальний прилад, касета) монтаються на спеціальній лабораторній стійці.

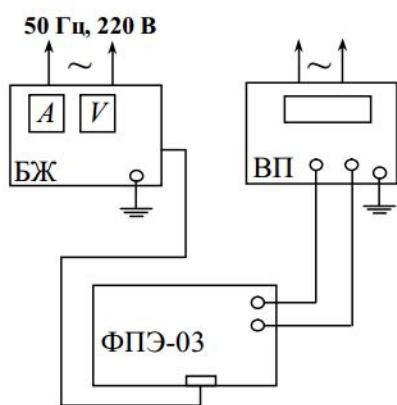


Рисунок 3.1

Блок-схема дослідної установки
(БЖ – блок живлення, ВП – універсальний вимірювальний прилад – міліамперметр, ФПЭ-03 – функціональна група елементів)

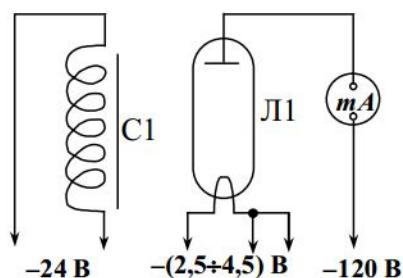


Рисунок 3.2

Приципова схема касети ФПЭ-03 (Л1 – діодна лампа (магнетрон), С1 – соленоїд)

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 4.1 Скласти електричне коло за схемою на рис. 3.1. При цьому спеціальним кабелем з'єднують гнізда на лицевій панелі касети ФПЭ-03 з гніздами блоку живлення (БЖ). У вихідному стані регулятори напруги БЖ повинні бути в крайньому лівому положенні, а тумблер «сеть» – в нижньому положенні.
- 4.2 Подати живлення від промислової електромережі на стійку. Виставити анодну напругу $U_a \approx 50$ В за вольтметром БЖ, користуючись певним регулятором напруги.
- 4.3 Іншим регулятором БЖ змінюють силу струму в соленоїді I_c від мінімального (початкового) значення до максимального 2,2 А і через кожні 0,2 А фіксують значення анодного струму I_a за показами ВП та складають таблицю залежності I_a від I_c (при заданій анодній напрузі):

Таблиця 4.1

I_c, A	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2
I_a, mA												

- 4.4 Повторити досліди п. 4.3 для $U_a = 40$ В та $U_a = 30$ В.
- 4.5 На міліметровому папері побудувати скидові характеристики $I_a = f(I_c)$ для трьох фіксованих значень анодної напруги U_a та встановити в кожному випадку $I_{c kp}$ за процедурою, поясненою рис. 2.2.
- 4.6 Для кожної скидової характеристики розрахувати значення B_{kp} за наближеною формулою, справедливою для довгої котушки (при $L^2 \gg D^2$):

$$B_{kp} = \mu_0 I_{c kp} \left(\frac{N}{L} \right), \quad (4.1)$$

де $N=2700$, $L=168$ мм, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

- 4.7 Для кожного значення B_{kp} розрахувати питомий заряд електрона e/m за наближеною формулою, отриманою з (2.1):

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot U_a}{B_{kp}^2 r_a^2}, \quad (4.2)$$

де $r_a = 1$ мм, а r_k прийнято рівним нулю.

- 4.8 Отримані дані занести в підсумкову таблицю 4.2:

Таблиця 4.2

U_a, V	$I_{c kp}, A$	$B_{kp}, Тл$	$e/m, Кл/кг$	$(e/m)_{cp}, Кл/кг$	$\Delta(e/m), Кл/кг$	$\Delta(e/m)_{cp}, Кл/кг$	$\varepsilon, \%$
30							
40							
50							

- 4.9 Кінцевий результат вписати у формі

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{e}{m} \right)_{cp} \pm \Delta \left(\frac{e}{m} \right)_{cp}$$

та порівняти з табличним значенням

$$\left(\frac{e}{m} \right)_t = 0,176 \cdot 10^{12} \text{ Кл/кг}.$$

Дати пояснення можливим розходженням значень e/m та $(e/m)_t$.

5 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 5.5 Які сили діють на електрон в просторі між катодом і анодом? Як вони спрямовані?
- 5.6 Що таке “скідова характеристика” магнетрона? Дати її якісне пояснення.
- 5.7 В чому полягає метод магнетрона для визначення відношення заряду електрона до його маси (e/m)?
- 5.8 Охарактеризувати магнетне поле соленоїда скінченної довжини. Коли справедливі формули (2.2) та (4.1) для індукції поля?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

5. Калашников С.Г. Электричество.– М.: Наука, 1977.– 591 с.
6. Практикум по физике: Электричество и магнетизм / Под ред. Николаева Ф.А.– М.: ВШ, 1991.– 150с.
7. Оборудование лаборатории “Электричество и магнетизм” / Техническая документация.– Днепропетровск: СКБ „Союзучприбор”, 1993.

МЕТА РОБОТИ: Вивчення роботи релаксаційного генератора та вимірювання його параметрів.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 1) джерело постійного струму;
- 2) неонова лампа;
- 3) набір опорів та ємностей;
- 4) секундомір.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Релаксаційним коливанням називається періодично повторюваний процес, що складається з двох стадій:

1. Повільного нагромадження енергії коливальною системою до певного критичного значення.

2. Наступного вивільнення енергії, що проходить майже раптово.

Релаксаційні коливання широко розповсюджені і можуть відбуватися в різних системах – механічних, електричних і т.д.

Опишемо дію електричного релаксаційного генератора, основною частиною якого є неонова лампа. Неонова лампа складається з скляного балона, в який впаяно два електроди – анод і катод у вигляді металевих пластинок, розташованих на відстані 2-3 мм.

Балон заповнений неоном при низькому тиску (10-15 мм рт.ст.). Основна особливість неонової лампи в тому, що вона починає проводити струм тільки при визначеній різниці потенціалів U_3 між її електродами.

Якщо напруга на електродах лампи $U < U_3$, струм через лампу не проходить, так як неон є діелектриком. В цьому випадку внутрішній опір лампи R_i нескінченно великий. При різниці потенціалів U_3 відбувається пробій діелектрика – через лампу тече струм, при цьому неон світиться помаранчевим світлом, U_3 – називається **потенціалом запалювання** лампи. Потенціал запалювання залежить від відстані між електродами, форми електродів, а також від природи і тиску наповнюючого газу. Після засвічування лампа може горіти вже при більш низькій напрузі U , гасне вона при деякій напрузі U_2 , так званому потенціалі гасіння. Вольт-амперна характеристика неонової лампи має вигляд, показаний на рис. 2.1.

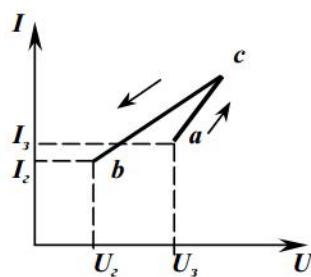


Рисунок 2.1

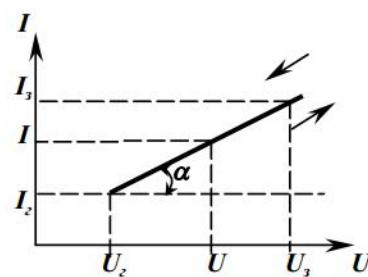


Рисунок 2.2

При малій напрузі на електродах струм через лампу рівний нулю. Після спалаху лампи струм стрибком досягає величини I_3 . При подальшому збільшенні напруги струм

в лампі весь час зростає по прямій *ac*. Якщо зменшити напругу, то струм зменшується по прямій *cb*. Для спрощення математичного опису будемо вважати, що прямі *ac* і *cb* співпадають. Тоді така ідеалізована характеристика буде мати вигляд, як на рис. 2.2.

Коли лампа горить, її внутрішній опір $R_i = \frac{dU}{dI}$ є величиною сталою.

З графіку (рис. 2.2) випливає, що

$$R_i = \frac{dU}{dI} = \operatorname{ctg} \alpha = \frac{U_3 - U_2}{I_3 - I_2}. \quad (2.1)$$

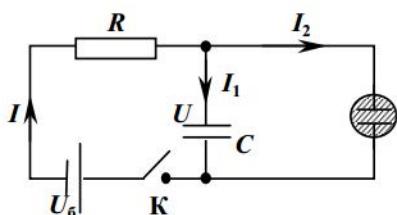


Рисунок 2.3

заряджається знову. Таким чином, лампа буде періодично спалахувати через певні проміжки часу T . Релаксаційний генератор описаного типу буде джерелом пилоподібної напруги (див. рис. 2.4).

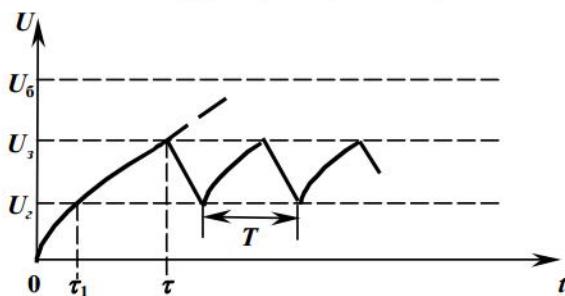


Рисунок 2.4

Розглянемо дію релаксаційного генератора показаного на рис. 2.3. При замиканні ключа **K** конденсатор **C** повільно заряджається від джерела (кажуть, що RC -контур володіє значним часом релаксації), напруга на електродах лампи зростає. В момент, коли напруга на конденсаторі досягає значення U_3 , лампа загоряється і через неї тече струм. При цьому проходить швидкий розряд конденсатора. Коли різниця потенціалів на електродах лампи впаде до значення U_2 , лампа гасне. Конденсатор

Знайдемо залежність між T і параметрами генератора R , C , U_3 і U_2 . Згідно другого та первого правил Кірхгофа, відповідно, маємо

$$IR + U = U_6, \quad (2.2)$$

$$I = I_1 + I_2, \quad (2.3)$$

де IR – спад напруги на опорі R , U – різниця потенціалів між обкладками конденсатора. Виключаючи з даної системи $I_2 = \frac{U}{R_i}$, одержимо

$$I_1 + U \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_i} \right) = \frac{U_6}{R}.$$

Так як $CU = q$, $I_1 = \frac{dq}{dt}$, то

$$I_1 = C \frac{dU}{dt}.$$

Отже, рівняння тепер має вигляд диференціального рівняння для знаходження $U(t)$:

$$C \frac{dU}{dt} + U \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_i} \right) = \frac{U_6}{R}. \quad (2.4)$$

Розв'язком цього диференціального рівняння для проміжку часу від моменту ввімкнення до будь-якого моменту часу, який випереджає загоряння ($0 \leq t < \tau$), тобто при $R_i = \infty$, є

$$U = U_6 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right). \quad (2.5)$$

Нехай $t=\tau$ - проміжку часу, необхідному для запалювання лампи. Тоді $U=U_s$ і

$$\tau = RC \cdot \ln \frac{U_6}{U_6 - U_s}.$$

Аналогічно знайдемо (див. рис. 2.4)

$$\tau_1 = RC \cdot \ln \frac{U_6}{U_6 - U_e},$$

а тоді період коливань $T \approx \tau - \tau_1$, тобто

$$T = RC \cdot \ln \frac{U_6 - U_e}{U_6 - U_s}.$$

Величина $\ln \frac{U_6 - U_e}{U_6 - U_s}$ є постійною для даної неонової лампи. Якщо період коливань T порядку секунди і більше, то будуть спостерігатися короткочасні спалахи світла, розділені більш тривалими паузами.

Коли замість відомого опору R під'єднати невідомий R_x , то період коливань змінюється на

$$T_1 = R_x C \cdot \ln \frac{U_6 - U_e}{U_6 - U_s}.$$

Порівнюючи останні рівняння, одержимо

$$R_x = R \frac{T_1}{T}. \quad (2.6)$$

Аналогічно, якщо замість відомої ємності C під'єднати невідому C_x , то період коливань знову зміниться на

$$T_2 = R C_x \cdot \ln \frac{U_6 - U_e}{U_6 - U_s},$$

звідси

$$C_x = C \frac{T_2}{T}. \quad (2.7)$$

Формули (2.6) і (2.7) є робочими.

3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 3.1 Складаємо електричне коло за схемою (рис. 2.3), де значення R та C відомі з відносною похибкою $\pm 5\%$.
- 3.2 Секундоміром визначають час 25 спалахів неонової лампи і обчислюють період коливань T : $T = t/n$.
- 3.3 Заміняють опір R невідомим R_x , замітивши відому ємність, і повторюють вимірювання. Визначають T_1 .
- 3.4 За формулою (2.6) обчислюють R_x .
- 3.5 Аналогічно обчислюють C_x за формулою (2.7), провівши вимірювання T_2 для невідомої ємності і відомого опору.
- 3.6 Похибки для R_x та C_x розраховують за формулами похибок непрямих вимірювань:

$$\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R}{R_x} + \frac{\Delta T_1}{T_1} + \frac{\Delta T}{T},$$

і аналогічно для C_x . Абсолютну похибку у визначенні періоду коливань прийняти рівною: $\Delta T = \Delta t/n$, де Δt рівне половині ціни поділки секундоміра.

3.7 Результати вимірювань записують у таблицю 3.1.

Таблиця 3.1

R, МОм	C, мкФ	$\frac{\Delta R}{R}$, %	$\frac{\Delta C}{C}$, %	T, с	ΔT, с	T_1, с	ΔT_1, с	T_2, с	ΔT_2, с	R_{xv}, МОм	ε_{R_x}, %	ΔR_{xv}, МОм	C_{xv}, мкФ	ε_{C_x}, %	ΔC_{xv}, мкФ

3.8 Кінцеві результати роботи подають у вигляді:

$$R_x = R_x \pm \Delta R_x \quad \text{та} \quad C_x = C_x \pm \Delta C_x .$$

4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 4.1 Пояснити будову і принцип дії релаксаційного генератора. Привести приклад застосування релаксаційного генератора.
- 4.2 Проаналізувати залежність періоду релаксаційних коливань від величини опору та ємності.
- 4.3 Чому напруга запалювання більша напруги згасання?
- 4.4 Чому в схемі релаксаційного генератора використовують опори з великим значенням?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Кортнев А.В. и др. Практикум по физике.- М.: Высшая школа, 1963.- 516 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3: Электричество.- М.: Наука, 1983.- 688 с.
3. Сірий Є.І. Загальний фізичний практикум. Ч.3.- Вид-во ЛДУ, 1966.- 216 с.
4. Детлаф А., Яворский Б. Курс физики.- М.: Высшая школа, 1989.- 608 с.

МЕТА РОБОТИ: Вимірювання індукції магнітного поля в різних точках на осі соленоїда скінченної довжини за допомогою датчика Холла.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 11) функціональна група елементів (касета ФПЭ-04);
- 12) блок живлення;
- 13) універсальний вимірювальний прилад (В7-21А);
- 14) лабораторна стійка;
- 15) з'єднувальні проводи і кабель.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Для експериментального дослідження інтенсивності магнітного поля на осі соленоїда в даній роботі використовується метод, заснований на ефекті Холла.

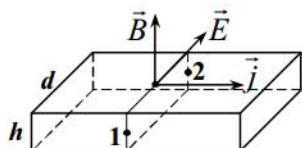


Рисунок 2.1

Розглянемо пластинку провідника, що має площину поперечного перерізу dh в напрямку вектора густини струму \vec{j} , та поміщену в поперечне магнетне поле з індукцією \vec{B} (рис. 2.1). **Ефект Холла** полягає в тому, що в цих умовах перпендикулярно до площини, в якій лежать вектори \vec{B} та \vec{j} , породжується електричне поле з напруженістю \vec{E} . Відповідна різниця потенціалів між точками 1 та 2 рівна

$$\Delta\varphi_x = Ed \quad (2.1)$$

і називається е.р.с. Холла. Фізична природа цього ефекту може бути зведена до дії магнетної складової сили Лоренца на носії заряду [1]

$$\vec{F}_m = q[\vec{\vartheta} \times \vec{B}], \quad (2.2)$$

де $\vec{\vartheta}$ – потокова швидкість носіїв, q – величина заряду одного носія. Під дією такої магнетної сили носії заряду певного знаку зміщуються до однієї з бічних граней пластинки, а біля протилежної грані утворюється надлишковий заряд протилежного знаку, пов’язаний з граткою остатовів (йонів). Між просторово розділеними різноіменними зарядами, а в даному випадку між бічними гранями (точки 1 та 2 на рис. 2.1), і утворюється деяка е.р.с. Холла $\Delta\varphi_x$. Її значення можна знайти з умови рівноваги між магнетною силою Лоренца і породженою електричною силою $\vec{F}_{el} = q\vec{E}$:

$$q\vartheta B = qE. \quad (2.3)$$

Звідси

$$E = \vartheta B \quad \text{та} \quad \Delta\varphi_x = d\vartheta B. \quad (2.4)$$

Оскільки густина струму задається виразом

$$j = qn\vartheta,$$

де n – концентрація носії заряду, то остаточно отримуємо

$$\Delta\varphi_x = d \frac{jB}{qn} = R_x \frac{I_D B}{h}. \quad (2.5)$$

В наших позначеннях $I_D = jS = jhd$ – сила струму, що тече пластинкою, $R_x = \frac{1}{qn}$ – **стала Холла**. Таким чином, подібна пластинка може бути використана як датчик

Холла для вимірювання величини індукції постійного магнітного поля B (якщо поміряти $\Delta\varphi_x$ при відомих значеннях I_D та знати значення сталої Холла R_x). На практиці в ролі датчика Холла використовують пластинку з напівпровідникового матеріалу, коли стала Холла має значно більше значення, аніж в металах (в напівпровідниках концентрація носіїв заряду на декілька порядків менша ніж у металах).

Зауважимо, що на практиці е.р.с. Холла у відсутності магнітного поля може мати ненульове значення (такий результат суперечить формулі (2.5)). Це виникає внаслідок недостатньо точної установки електродів датчика в точках 1 та 2 на одній еквіпотенціальній поверхні. У зв'язку з цим необхідно вносити поправки в поміряні значення $\Delta\varphi_x$ (необхідний зсув значень $\Delta\varphi_x$ проводиться за даними, вказаними в паспорті датчика), або ж похибка усувається шляхом застосування певної методики усереднення даних зі зміною напрямку струму [2].

3 ОПИС ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ ТА СПОСОБУ ВИМІРЮВАНЬ

В роботі використовується стандартна дослідна установка, створена СКБ „Союзучприбор” [3]. Блок-схема такої установки зображена на рис. 3.1, а принципова схема функціональної групи елементів (касети) ФПЭ-04 – на рис. 3.2. Всі складові елементи кола монтажуються на спеціальній лабораторній стійці.

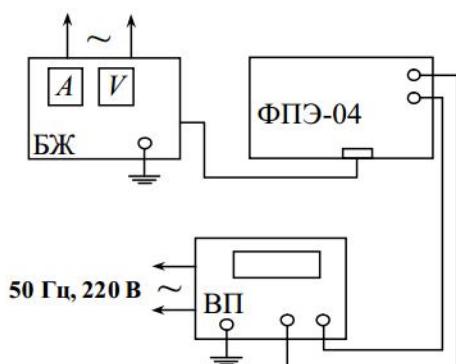


Рисунок 3.1

Блок-схема дослідної установки
(БЖ – блок живлення, ВП –
універсальний вимірювальний пристрій)

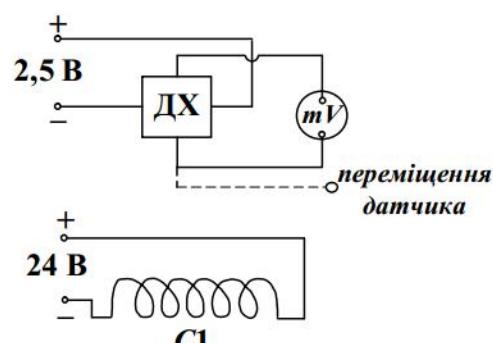


Рисунок 3.2

Принципова схема касети ФПЭ-04 (ДХ – датчик Холла, С1 – соленоїд)

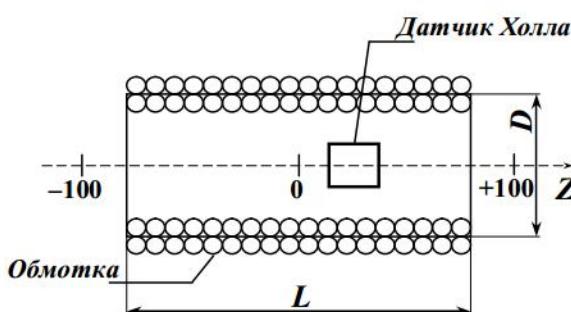


Рисунок 3.3

Положення датчика в геометрії соленоїда
його осі (всередині обмотки і за її краями).

Особливістю дослідної установки є те, що напівпровідниковий датчик Холла ДХГ-2 закріплений на спеціальному штоці і може контролювано пересуватися експериментатором вздовж осі соленоїда – циліндричної катушки певної довжини і діаметра. Для фіксації положення датчика на штоці зроблені насічки в межах (-100 мм, +100 мм) через кожні 10 мм (рис. 3.3). Тобто, пристрій дозволяє поміряти інтенсивність магнітного поля соленоїда вздовж

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 4.10 Скласти електричне коло за схемою на рис. 3.1. Регулятори блоку живлення повинні бути в крайньому лівому положенні, а тумблер «сеть» – в нижньому положенні.
- 4.11 Під'єднати лабораторну стійку до промислової електромережі. Регуляторами БЖ встановити деяку силу струму в обмотці соленоїда I_c в межах від 0,4 А до 2,0 А та напругу на датчику U_D рівною 2,5 В (остання контролюється вольтметром з панелі БЖ за виходом „2,5–4,5 В”).
- 4.12 Встановити ДХ в крайнє положення (наприклад $Z=-100$ мм) і поміряти $\Delta\varphi_x$ за допомогою універсального вимірювального приладу (вольтметра).
- 4.13 Пересуваючи ДХ вздовж осі соленоїда, встановити значення $\Delta\varphi_x$ для всіх фіксованих точок в межах спостереження (в межах лінії насічок на штоці). Дані занести в таблицю:

Таблиця 4.1

$$I_c = \underline{\hspace{2cm}}, \quad I_D = \underline{\hspace{2cm}}.$$

$Z, \text{мм}$	-100	-90	...	-10	0	+10	...	+90	+100
$\Delta\varphi_x, \text{мВ}$									
$B, \text{Тл}$									

- 4.14 Розрахувати значення індукції магнітного поля $B(Z)$ для кожної фіксованої точки з координатою Z за формулою

$$B = \frac{h\Delta\varphi_x}{R_x I_D}, \quad (4.1)$$

де $R_x = (1,75 \pm 0,15) \cdot 10^{-2} \text{ В}\cdot\text{м}/(\text{Тл}\cdot\text{А})$, $h=0,4 \text{ мм}$, I_D – попередньо розрахувати на основі закону Ома за відомим значенням електричного опору пластинки датчика в напрямку струму ($r_x=300 \text{ Ом}$) та значенням напруги U_D . Сила робочого струму датчика I_D не повинна перевищувати 0,13 А [3]. Дані занести в таблицю 4.1.

- 4.15 На міліметровому папері побудувати графік залежності $B = B(Z)$ в межах переміщення датчика.

- 4.16 Зробити якісний аналіз магнітного поля соленоїда за отриманими результатами. Провести порівняння з даними, наведеними в [4, с. 209]. Замалювати поле соленоїда скінченної довжини за допомогою силових ліній.

- 4.17 Порівняти встановлене на експерименті значення $B(Z=0)$ з розрахунковим, що обчислюється за формулою [2]:

$$B = \mu_0 I_c \left(\frac{N}{L} \right) \frac{L}{\sqrt{L^2 + D^2}}, \quad (4.2)$$

де число витків в обмотці $N=2630$, $L=168 \text{ мм}$, $D=85 \text{ мм}$, $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн}/\text{м}$ – магнетна стала системи одиниць SI, та вказати причини можливих розходжень. Похибку дослідного значення B ($Z=0$) оцінити за формулою:

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta(\Delta\varphi_x)}{\Delta\varphi_x} + \frac{\Delta r_x}{r_x} + \frac{\Delta U_D}{U_D} + \frac{\Delta R_x}{R_x} + \frac{\Delta h}{h}, \quad (4.3)$$

де параметри датчика (r_x та h) контролюються з точністю 5%, а за похибку вольтметра прийняти похибку відліку.

5 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 5.9 В чому суть ефекту Холла?
- 5.10 Чому стверджують, що стала Холла R_x є характеристикою матеріалу провідника? Порівняти випадки металевого провідника і напівпровідника.
- 5.11 Які переваги та недоліки використання датчика Холла для вимірювання величини індукції магнітного поля?
- 5.12 Який фізичний зміст індукції магнітного поля \vec{B} ? Її одиниці вимірювання?
- 5.13 Як відрізняється магнетне поле соленоїда скінченної довжини від поля подібного, але дуже довгого, соленоїда? (Для довгого соленоїда у формулі (4.2) слід покласти $L^2 \gg D^2$).

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

8. Калашников С.Г. Электричество.– М.: Наука, 1977.– 591 с.
 9. Практикум по физике: Электричество и магнетизм / Под ред. Николаева Ф.А.– М.: ВШ, 1991.– 150с.
 10. Оборудование лаборатории “Электричество и магнетизм” / Техническая документация.– Днепропетровск: СКБ „Союзучприбор”, 1993.
 11. Парселл Э. БКФ: Электричество и магнетизм.– М.: Наука, 1975.– 439 с.
-

ДОДАТОК: Характеристика типового блоку живлення

Блок живлення (БЖ) призначений для живлення електричною напругою типового обладнання лабораторії „Електрика і магнетизм”, створеного СКБ „Союзучприбор”.

БЖ формує стабілізовану напругу постійного струму 12 В, регульовану напругу постійного струму в діапазонах 2,5÷4,5; 5÷25; 12÷120 В зі стабілізацією встановленого значення і змінну напругу 6,3 В з частотою промислової мережі. Для контролю регульованих напруг та струмів служить вольтметр і амперметр. Ціна поділки вольтметра $C_V=5$ В/под, амперметра – $C_A=0,2$ А/под.

Вихідну напругу по каналах можна контролювати з панелі БЖ універсальним вимірювальним пристроям.

БЖ забезпечений захистом електричної схеми від короткого замикання і перевантаження каналів вихідної напруги за величиною сили струму навантаження.

При кожному під’єднанні БЖ до мережі, його необхідно прогрівати струмом 2–3 хв.

Під’єднання касети ФПЭ лабораторної установки до БЖ здійснюється спеціальним кабелем.

МЕТА РОБОТИ: Визначити горизонтальну складову напруженості та індукції магнітного поля Землі за допомогою котушки Гельмгольца.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 1) акумулятор (ВСШ-6);
- 2) котушка Гельмгольца;
- 3) бусоль;
- 4) міліамперметр;
- 5) реостат;
- 6) двополюсний перемикач;
- 7) лінійка;
- 8) набір провідників.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Земля є величезним магнітом. Існування магнітного поля Землі безпосередньо підтверджується відхиленням магнітної стрілки при її вільному підвісі. При цьому остання встановлюється у напрямку дотичної до лінії індукції магнітного поля Землі. Значення індукції \vec{B} магнітного поля Землі невеликі і змінюються від $0,42 \cdot 10^{-4}$ Тл на екваторі до $0,70 \cdot 10^{-4}$ Тл поблизу магнітних полюсів. Можливим джерелом поля Землі є розподіл струмів в земній корі.

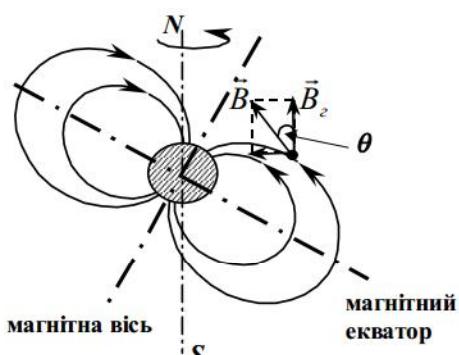


Рисунок 2.1

Індукція магнітного поля \vec{B} – це фізична величина, що чисельно рівна силі, з якою магнітне поле діє на провідник одиничної довжини, по якому тече струм, рівний одиниці сили струму. Напрями магнітного поля і струму взаємно перпендикулярні. Тобто,

$$B = \frac{F}{I},$$

де F – діюча магнітна сила, I – сила струму в провіднику, I – довжина провідника. Вимірюється індукція магнітного поля в теслах: $1 \text{ Тл} = 1 \text{ Н/(А}\cdot\text{м)}$.

Основними параметрами магнітного поля Землі є [1]: магнітне нахилення θ (кут між напрямком вектора \vec{B} і площею горизонту), магнітне схилення ϕ (кут між горизонтальною складовою вектора \vec{B} і площею географічного меридіана) і горизонтальна складова індукції магнітного поля Землі B_z (рис. 2.1).

На магнітному екваторі $\theta=0$ і $B=B_z$, (магнітна стрілка встановиться горизонтально), на магнітних полюсах $B_z=0$ (магнітна стрілка встановиться вертикально).

Горизонтальну складову B_z звичайно визначають за допомогою котушки Гельмгольца, яка складається з двох плоских круглих котушок, розміщених в паралельних площиніах. Віддала між серединами обмоток дорівнює радіусу котушки. Розміри обмоток малі в порівнянні з радіусом котушки, причому товщина кожної обмотки приблизно дорівнює її ширині.

Якщо котушку Гельмгольца розмістити так, щоб її вісь OO_1 була перпендикулярно до площини магнітного меридіану (рис. 2.2), то магнітне поле струму \vec{B}_0 намагатиметься повернути магнітну стрілку, розміщену в центрі котушки, в напрямку осі OO_1 , а магнітне поле Землі – вздовж площини магнітного меридіана. Завдяки дії обох полів магнітна стрілка встановлюється так, що утворює деякий кут α з площею магнітного меридіану. Величина цього кута визначається співвідношенням

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_0}{B_e}. \quad (2.1)$$

Магнітне поле колового витка на його осі OO_1 (маємо на увазі вектор \vec{B}_0) спрямоване вздовж цієї осі, оскільки є результатом накладання полів $d\vec{B}$ від кожної елементарної діляки dl . Напрям цього поля визначається правилом правого свердлика: якщо повернати його в напрямку струму, то поступальний рух свердлика збігається з напрямом лінії поля (рис. 2.3).

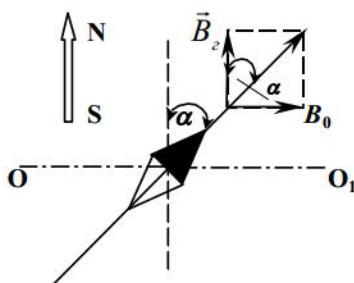


Рисунок 2.2

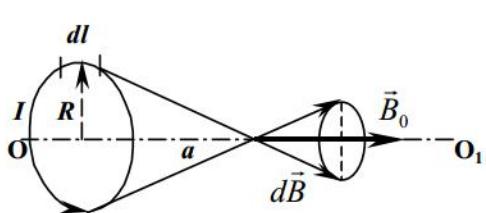


Рисунок 2.3

Магнітне поле котушки первинно охарактеризуємо напруженістю цього поля H . Вимірюється напруженість магнітного поля в А/м.

Величина напруженості поля H короткої котушки на її осі визначається за формулою

$$H = \frac{I \cdot n \cdot R^2}{2(R^2 + a^2)^{3/2}}, \quad (2.2)$$

де R – радіус котушки, a – віддала від центра котушки до точки спостереження на осі котушки, n – число витків. Формулу (2.2) можна отримати, виходячи з закону Біо-Савара-Лапласа та скориставшись принципом суперпозиції для поля [2]. Індукція магнітного поля \vec{B}_0 пов’язана з напруженістю цього поля H_0 співвідношенням

$$\vec{B}_0 = \mu \mu_0 H_0, \quad (2.3)$$

де μ_0 – магнітна стала (в системі СІ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м), μ – магнітна проникність середовища (для повітря $\mu \approx 1$). Лінії магнітної індукції, за допомогою яких графічно зображують магнітне поле (силові лінії), є завжди замкнутими і проводяться так, що дотичні до них в кожній точці збігаються за напрямком з вектором \vec{B} (рис. 2.1).

Котушка Гельмгольца складається з двох одинакових плоских котушок, розміщених паралельно на віддалі R (тобто рівній радіусу кожної з них). Їхні поля накладаються, тому поле в центрі котушки Гельмгольца з одним напрямком струму в обох її частинах рівне (для повітря)

$$H_0 = \frac{I \cdot n \cdot R^2}{(R^2 + R^2/4)^{3/2}} = \frac{8}{5\sqrt{5}} \cdot \frac{I \cdot n}{R} = 0,7156 \cdot \frac{I \cdot n}{R}, \quad (2.4)$$

$$B_0 = 8,988 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{I \cdot n}{R}. \quad (2.5)$$

Для горизонтальної складової магнітного поля Землі тепер маємо на основі (2.1) такі розрахункові формули

$$H_z = \frac{0,7156}{\operatorname{tg}\alpha} \cdot \frac{I \cdot n}{R}, \text{ (А/м)} \quad (2.6)$$

$$B_z = \frac{8,988 \cdot 10^{-7}}{\operatorname{tg}\alpha} \cdot \frac{I \cdot n}{R}, \text{ (Тл)} \quad (2.7)$$

що передбачають дослідне вимірювання кута α в умовах протікання струму через катушку.

3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

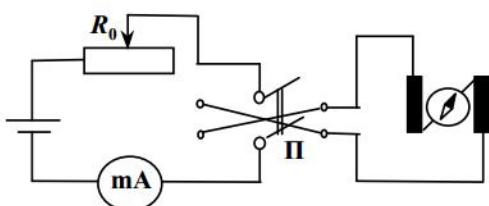


Рисунок 3.1

- 3.1 Складаємо електричне коло за схемою, зображену на рис. 3.1.
- 3.2 Обмотки катушки Гельмгольца сполучають так, щоб напрям струму в них був однаковим (кінець першої обмотки з'єднують з початком другої).
- 3.3 Повертаючи катушку, розміщують її так, щоб вісь, яка проходить через центри обмоток, була перпендикулярно до площини магнітного меридіана: в цьому положенні один з кінців стрілки повинен знаходитись проти нульової поділки шкали.
- 3.4 Замкнувши коло за допомогою перемикача **П**, пересувають повзунок реостата **R₀** до тих пір, поки стрілка магніта буде показувати 30° . Відмічають цей кут з точністю до 1° , а відповідне йому значення струму **I** по шкалі міліамперметра з точністю до 5 мА.
- 3.5 Перемикачем **П** змінюють напрям струму в катушці і знову виставляють кут $\alpha=30^\circ$ та вимірюють нове значення струму **I**. З одержаних результатів обчислюють середнє значення.
- 3.6 За допомогою лінійки вимірюють в декількох місцях радіус катушки **R** і з одержаних результатів обчислюють його середнє значення.
- 3.7 Підставивши значення величини струму **I** в амперах, радіуса **R** в метрах, а також **n** і $\operatorname{tg}\alpha$ у формули (2.6) і (2.7), обчислюють величину **H_z** і **B_z** в одиницях системи СІ.
- 3.8 Знаходимо ще по два значення для **H_z** і **B_z** при кутах відхилення магнітної стрілки 45° і 60° .
- 3.9 За відомими правилами для серії вимірювань визначають абсолютну і відносну похибку. Результати вимірювань і обчислень зводять в таблицю, яку накреслюють відповідно до формул (2.6) і (2.7).

4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 4.1 Магнітне поле Землі: які основні параметри земного магнетизму?
- 4.2 Характеристики магнітного поля: дати поняття напруженості та індукції поля, силової лінії.
- 4.3 Сформулювати принцип суперпозиції для поля.

- 4.4 Замалювати магнітне поле колового витка зі струмом за допомогою силових ліній.
- 4.5 Дати означення однорідного і неоднорідного магнітного поля. Яким є поле котушки?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За ред. І.Т.Горбачука.- Київ: Вища школа, 1992.- 512 с.
2. Савельєв И.В. Курс общей физики. Т.2.- М.: Наука, 1982.- 496 с.
3. Сірий Є.І. Загальний фізичний практикум. Ч.3.- вид. ЛДУ, 1966.- 216 с.
4. Детлаф А., Яворский Б. Курс фізики.- М.: ВШ, 1989.- 608 с.

МЕТА РОБОТИ: Встановлення основної кривої намагнічення феромагнетика, розрахунок магнетної проникності, вимірювання коерцитивної сили та оцінка роботи перемагнічування за петлею гістерезиса.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 1) лабораторна стійка;
- 2) функціональна група елементів (касета) ФПЭ-07;
- 3) осцилограф С1-73;
- 4) генератор синусоїdalьних електричних коливань ГЗ-118;
- 5) з'єднувальні провідники.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА СХЕМА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Будь-яка речовина в магнетному полі намагнічується (набуває характерних ознак, властивих постійним магнетам). Це пов'язується з впорядкуванням магнетних моментів атомів і молекул. Усі речовини за магнетними властивостями можна поділити на дві групи – сильномагнетні та слабомагнетні. До сильномагнетних належать феромагнетики, феримагнетики (або ферити) і антиферомагнетики. До слабомагнетних належать парамагнетики та діамагнетики.

Феромагнетиками називають речовини, які володіють самочинним (спонтанним) намагніченням, тобто є намагніченими уже при відсутності магнетного поля. Таке спонтанне намагнічення пов'язується з впорядкуванням власних магнетних моментів електронів (спінів) за рахунок так-званих обмінних сил, що проявляються між атомами. Феромагнетизм – це особливий стан речовини магнетика, який зникає з підвищенням температури зразка вище деякої характеристичної температури (температури Кюрі), своєї для кожної речовини. При цьому феромагнетик переходить в стан звичайного парамагнетика і втрачає властивість сильного намагнічення. Типовими представниками феромагнетиків є залізо, нікель, кобальт, сплави на основі марганцю та хрому. Характерною особливістю феромагнетиків є складна нелінійна залежність намагніченості від величини зовнішнього магнетного поля.

Ферити – хемічні сполуки оксиду заліза з оксидами інших металів, які поєднують в собі феромагнетні та напівпровідникові (або діелектричні) властивості.

Зовнішнє магнетне поле прийнято описувати напруженістю магнетного поля H , тоді як поле в магнетиках – індукцією магнетного поля B , що враховує, поряд із зовнішнім, магнетне поле породжене магнетиком. Між цими величинами можна встановити феноменологічний зв'язок у формі

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad (2.1)$$

де μ – магнетна проникність середовища, μ_0 – магнетна стала. Для феромагнетиків $\mu \sim 10^4$ і є функцією поля H . Для парамагнетиків μ дещо більша за одиницю і є сталою величиною.

Крива намагнічування феромагнетика (залежність $B=f(H)$) має вигляд петлі, що називається *петлею гістерезису* (рис. 2.1). Якщо феромагнетик попередньо був розмагніченим ($B=0$ при $H=0$), то його

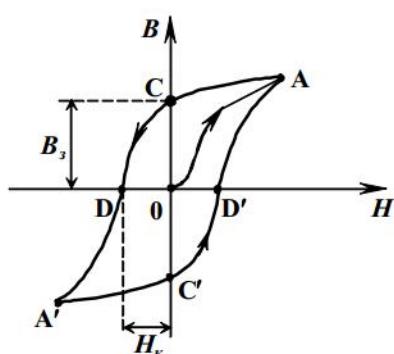


Рисунок 2.1

намагнічування відбувається по основній кривій **ОА**. Поняття магнетної проникності μ застосовується лише до основної кривої намагнічування. Далі розмагнічування феромагнетика вже відбувається вздовж кривої **ACDA'**, що є виявом магнетної пам'яті (попередньої магнетної історії зразка). На ній B_s – залишкова намагніченість, H_k – коефіцієнт намагніченості (величина зворотного поля, що забезпечує всередині магнетика значення індукції $B=0$). Якщо $H_k \sim (10^3 - 10^4)$ А/м, феромагнетик прийнято вважати магнетожорстким, в іншому випадку, коли $H_k \leq 80$ А/м (таке значення H_k характерне для чистого заліза) – магнетом'ягким. Повернення у точку **A** при перемагнічуванні зразка йде вже іншим шляхом **A'C'D'A** і ми отримуємо замкнутий цикл перемагнічування у вигляді характерної петлі. Повне розмагнічування зразка тепер можливе шляхом поступового стягування петлі в точку **O**. Площа петлі відображає роботу на перемагнічування одиниці об'єму магнетика впродовж одного циклу.

Відсутність намагнічення у вихідному стані більшості феромагнетиків нижче точки Кюрі пояснюється дробленням об'єму зразка за магнетними властивостями на окремі макроскопічні області (домени), що характеризуються самочинним магнетним впорядкуванням з різною орієнтацією в просторі сумарного магнетного моменту доменів. Для всього зразка це веде до взаємної компенсації їхніх моментів і зразок в цілому виглядає ненамагніченим. Подальше намагнічення зразка у зовнішньому магнетному полі пояснюється розростанням одних доменів і знищеннем інших (тих, які не відповідають за напрямком свого магнетного моменту вибраному напрямку поля). При повному усуненні енергетично невигідних доменів наступає стан насищення в намагніченні феромагнетика. Оскільки намагнічення (і розмагнічення) зразка пов'язується з необоротними процесами перебудови структури доменів, то виникають явища магнетної пам'яті (характер намагнічення феромагнетика залежить від попередньої магнетної історії зразка – явище гістерезису).

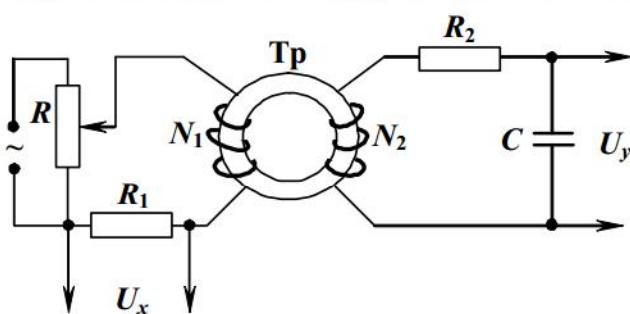


Рисунок 2.2: Принципова схема касети ФПЭ-07

матеріалу, створюється змінне магнетне поле напруженості [2]

$$H = \frac{N_1}{2\pi r} I_1, \quad (2.2)$$

де r – середній радіус тороїда, N_1 – число витків первинної обмотки, I_1 – сила струму в ній. Значить, якщо напругу U_x

$$U_x = I_1 \cdot R_1 = \frac{2\pi r}{N_1} R_1 \cdot H \quad (2.3)$$

подати з резистора R_1 на горизонтальні відхиляючі пластини ЕПТ осцилографа, то відхилення "x" електронного променя на екрані буде пропорційне до величини напруженості H магнетного поля:

$$U_x = b_1 \cdot x \quad (2.4)$$

$$H = \frac{N_1 \cdot b_1}{2\pi r \cdot R_1} \cdot x. \quad (2.5)$$

Е.р.с. індукції у вторинній обмотці рівна

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \frac{dB}{dt} \cdot S, \quad (2.6)$$

де S – площа поперечного перерізу тороїда, N_2 – число витків у вторинній обмотці, Φ – позначає магнетний потік, що пронизує обмотку. За другим правилом Кірхгофа для контура вторинної обмотки можна записати

$$\varepsilon_i = U_C + I_2 R_2, \quad (2.7)$$

де зазначено самоіндукцію вторинної обмотки; I_2 – сила струму у вторинній обмотці, R_2 – опір ділянки кола,

$$U_C = \frac{q}{C}$$

(C – ємність конденсатора, q – заряд на обкладках). При $I_2 R_2 \gg U_C$ маємо

$$I_2 = -\frac{N_2 S}{R_2} \cdot \frac{dB}{dt}. \quad (2.8)$$

Якщо напругу з обкладок конденсатора

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t I_2 dt = -\frac{N_2 S}{R_2 C} \int_0^t \frac{dB}{dt} dt = -\frac{N_2 S}{R_2 C} B \quad (2.9)$$

подати на вертикальні відхиляючі пластини ЕПТ осцилографа ($U_y = U_C$), то отримаємо з (2.9) $U_y \sim B$. Ця напруга пропорційна відхиленню “ y ” електронного променя по вертикалі:

$$U_y = b_2 \cdot y. \quad (2.10)$$

Тому маємо (опускаючи знак мінус)

$$B = \frac{R_2 b_2 C}{N_2 S} \cdot y, \quad (2.11)$$

тобто відхилення “ y ” пропорційне до величини індукції магнетного поля B , що пронизує вторинну обмотку. Тепер, змінюючи силу струму в первинній обмотці трансформатора, можна спостерігати зміни петлі гістерезису на екрані осцилографа.

Координати (n_x , n_y) електронного променя на сітці екрану осцилографа можна пов’язати з напругою (U_x , U_y) на відхиляючих пластинах у формі:

$$U_x = n_x U_x^0 \quad \text{та} \quad U_y = n_y U_y^0,$$

де величини U_x^0 і U_y^0 зображають (для координатної сітки) ціну поділки по горизонталі та по вертикалі, відповідно. Тоді

$$H = \frac{N_1}{2\pi r \cdot R_1} U_x^0 \cdot n_x = k_x \cdot n_x \quad (2.12)$$

та

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_y^0 \cdot n_y = k_y \cdot n_y \quad (2.13)$$

і ми можемо будувати криву $B=f(H)$, знаходячи координати точок (n_x , n_y) за картинкою на екрані осцилографа.

3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 3.1 Виконати монтаж дослідної установки на лабораторній стійці згідно схеми на рис.
3.1. Під'єднати установку до джерела живлення.

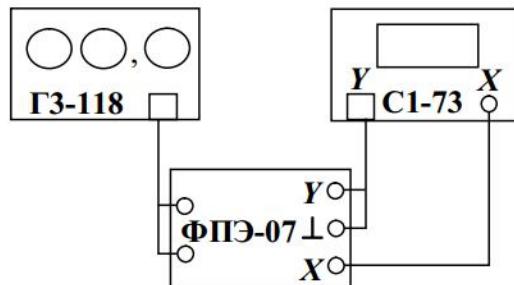


Рисунок 3.1: Блок-схема дослідної установки

- 3.2 Виконати процедуру калібрування осцилографа (за інструкцією).
3.3 Встановити частоту звукового генератора в інтервалі $700 \div 800$ Гц, а діюче значення напруги на виході генератора в інтервалі $2 \div 5$ В.
3.4 За допомогою ручки керування осцилографа „усиление”, а також дискретного регулятора амплітуди сигналу на виході генератора „db”, добитися спостереження петлі гістерезису на екрані осцилографа (при повороті плавного регулятора величини сигналу на виході генератора петля повинна змінюватися в межах розмірів екрану осцилографа). Рекомендовані положення перемикача „db” – „0” для з’єднання $\textcircled{I} \rightarrow \text{II}$ та „1” для з’єднання $\textcircled{I} \rightarrow \text{I}$. Рекомендовані положення перемикача „V/дел” на панелі осцилографа – 0,01 В/под або 0,02 В/под.
3.5 Визначити координати (n_x , n_y) вершини А максимальної петлі гістерезису за координатною сіткою екрану осцилографа (необхідно прослідкувати за тим, аби петля гістерезису стягувалася в початок координат при зменшенні величини поданого від генератора сигналу).
3.6 Зменшуючи напругу на виході генератора, одержати на екрані осцилографа сім’ю петель гістерезису. Визначити для кожної з них координати вершини. Виміри провести до тих пір, поки петля не стягнеться в точку.
3.7 Обчислити значення k_x і k_y за формулами (2.12) і (2.13), скориставшись заданими параметрами установки:

$$k_x = \frac{N_1 U_x^0}{2\pi r \cdot R_1} \quad \text{та} \quad k_y = \frac{R_2 C U_y^0}{N_2 S}. \quad (3.1)$$

Величини U_x^0 та U_y^0 беруть відповідно до налаштування осцилографа (за показами перемикача „V/дел”, приймаючи $U_x^0 = U_y^0$). За паспортними даними [1]: $R_1 = 10^2$ Ом, $R_2 = 2,4 \cdot 10^4$ Ом, $C = 2,2 \cdot 10^{-8}$ Ф, $S \approx 4,4 \cdot 10^{-5}$ м², $r = 1,24 \cdot 10^{-2}$ м, $N_1 = 200$, $N_2 = 50$.

- 3.8 Обчислити значення $B = k_y n_y$ та $H = k_x n_x$ для координат вершин всіх одержаних петель гістерезису та занести їх в таблицю:

Таблиця 3.1

№ петлі	n_x , под.	n_y , под.	U_x^0 , В/под	U_y^0 , В/под	k_x , А/м	k_y , Тл	H , А/м	B , Тл	μ	H_k , А/м
			.	.						

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

3.9 За одержаними даними на міліметровому папері побудувати графік залежності $B=f(H)$. Апроксимують цю залежність прямою лінією. Тангенс кута α нахилу цієї прямої до осі H рівний (за формулою (2.1))

$$\operatorname{tg}\alpha = \mu\mu_0, \quad (3.2)$$

де $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м (магнетна стала). Виміряти значення кута α транспортиром, або встановити значення $\operatorname{tg}\alpha$ за формулою

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\Delta B}{\Delta H}, \quad (3.3)$$

де ΔB і ΔH – перепад величин B і H для заданого інтервалу змін, і розрахувати значення магнетної проникності матеріалу сердечника μ (середнє значення для інтервалу спостережень).

3.10 Замалювати характерний вигляд основної петлі гістерезису для досліджуваного матеріалу і встановити групу феримагнетика (м'який чи жорсткий) за величиною коерцитивної сили H_k . Для цього необхідно встановити координати т. D максимальної петлі гістерезису (рис. 2.1) і розрахувати H_k на основі (2.12). Значення μ та H_k занести в таблицю 3.1.

4 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

- 4.1 Які основні властивості феромагнетиків?
- 4.2 Що означає досягнення стану насыщення для феромагнетика?
- 4.3 Який фізичний зміст має площа петлі гістерезису? Що таке “коерцитивна сила”?
- 4.4 Що таке “температура Кюрі” для феромагнетика?
- 4.5 Чим відрізняються діа- та парамагнетики від феромагнетиків?
- 4.6 Оцінити роботу перемагнічування A_n одиниці об’єму сердечника за один цикл на основі співвідношення [2]:

$$A_n = k_x k_y S_n, (\text{Дж}/\text{м}^3)$$

де S_n – площа петлі гістерезису на екрані осцилографа (в поділках шкали). Чому відносно мала робота перемагнічування феритів є одним з визначальних аргументів їх широкого застосування в радіотехніці?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Оборудование лаборатории „Электричество и магнетизм” / Техническая документация.- Днепропетровск: СКБ „Союзучприбор”, 1993.
2. Практикум по физике: Электричество и магнетизм / Под ред. Ф.А.Николаева.- М.: Высшая школа, 1991.- 151 с.
3. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики.- М.: Высшая школа, 1989.- 608 с.
4. Калашников С.Г. Электричество.- М.: Наука, 1977.- 592 с.
5. Кортнев А.В. Практикум по физике.- М.: Высшая школа, 1963.- 516 с.

МЕТА РОБОТИ: Визначити швидкість поширення електромагнітних хвиль в повітрі методом стоячих хвиль, використовуючи лінію Лехера.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 1) генератор ультракоротких електромагнітних хвиль;
- 2) індикатор електромагнітних хвиль;
- 3) двопровідна лінія зі шкалою;
- 4) джерело живлення зі шкалою.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

У вільному від провідників однорідному середовищі електромагнітні хвилі поширяються у всіх можливих напрямках. Процес поширення електромагнітної хвилі можна пояснити так: якщо в деякому місці простору утворилося змінне магнітне поле (наприклад, від змінного струму), то згідно з законом електромагнітної індукції воно створить у найближчих точках вихрове електричне поле, також змінне у часі; вихрове електричне поле, в свою чергу, теж створить вихрове магнітне поле і цей процес, повторюючись, приведе до поширення електромагнітного поля, тобто утворення електромагнітної хвилі. Деяке уявлення про характер електромагнітного поля може бути подане зображенням його у вигляді ланцюга петель – замкнених (вихрових) електричних і магнітних силових ліній, що чергуються між собою (рис. 2.1).

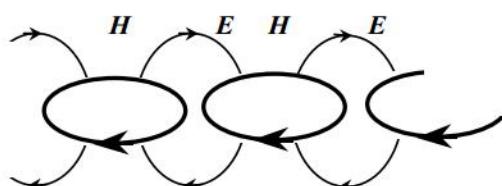


Рисунок 2.1

радіостанціях лінії служать для передачі електромагнітної енергії від передавача до антени, у зв'язку – для передачі сигналів на великий відстані.

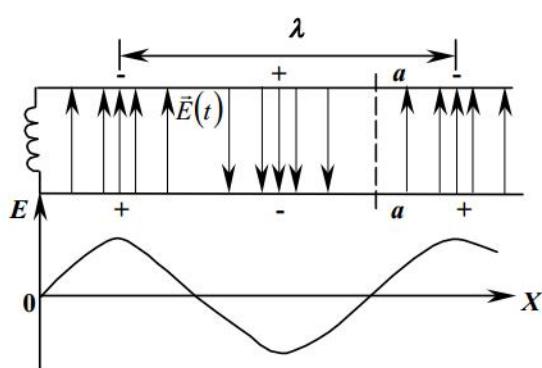


Рисунок 2.2

Найпростішою спрямованою системою для електромагнітних хвиль є двопровідна лінія, що складається з двох близькорозміщених циліндрических провідників без ізоляції. Двопровідні лінії широко застосовуються у сучасній техніці. У вимірювальній апаратурі їх використовують для визначення довжини хвиль електромагнітних коливань.

Двопровідна лінія (система Лехера) може бути розімкненою і замкненою (закороченою провідником). Незалежно від цього в ній виникають стоячі електромагнітні хвилі. Розглянемо двопровідну лінію з вільними кінцями, яка індуктивно зв'язана з генератором електромагнітних коливань (рис. 2.2).

Двопровідна лінія є системою з розподіленими параметрами – омічним опором, індуктивністю і ємністю. При під'єднанні до синусоїdalного джерела е.р.с. з частотою коливань ν , вздовж цієї лінії поширюватиметься електромагнітна

хвиля, довжина якої $\lambda = \frac{\vartheta}{v}$, де ϑ - швидкість поширення хвилі.

Біжуча електромагнітна хвиля спричиняє в провідниках коливання струму і напруги. Миттєві значення напруги U_x і струму I_x в момент часу t в деякому перерізі $a-a$ (рис. 2.2) з координатою x визначається рівнянням хвилі

$$\left. \begin{aligned} U_x &= U_0 \sin 2\pi(vt - x/\lambda) \\ I_x &= I_0 \sin 2\pi(vt - x/\lambda) \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Швидкість поширення електромагнітних хвиль ϑ вздовж проводів досягає значення $0,95c \div 0,98c$, де c – швидкість електромагнітної хвилі у вакуумі;

$$\vartheta = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}},$$

де ϵ, μ - діелектрична і магнітна проникності середовища між проводами.

Перше рівняння системи визначає розподіл вздовж лінії енергії електричного поля хвилі, друге – її магнітного поля. Як видно з наведених вище рівнянь, коливання напруги і струму у біжучій хвилі однакові по фазі. Електромагнітне поле хвилі (його енергія) зосереджене, в основному, між провідниками. Проводи у даному випадку виконують для електромагнітної хвилі таку саму роль, як рейки для поїзда чи трамваю.

Процес утворення стоячих електромагнітних хвиль у розімкненій двопровідній лінії відбувається так: біжуча електромагнітна хвиля доходить до кінця проводів і відбивається; внаслідок інтерференції прямої і відбитої хвилі у лінії виникають стоячі хвилі. Рівняння миттєвих значень напруги U_x і струму I_x у стоячій хвилі в момент часу t в деякому перерізі з координатою x , відрахованою від початку лінії (рис. 2.3), має вигляд (враховано, що магнітна складова хвилі при відбиванні від вільного кінця лінії змінює свою фазу на π):

$$\left. \begin{aligned} I_x &= 2I_0 \cos(2\pi x/\lambda) \sin(2\pi v t) \\ U_x &= 2U_0 \sin(2\pi x/\lambda) \cos(2\pi v t) \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

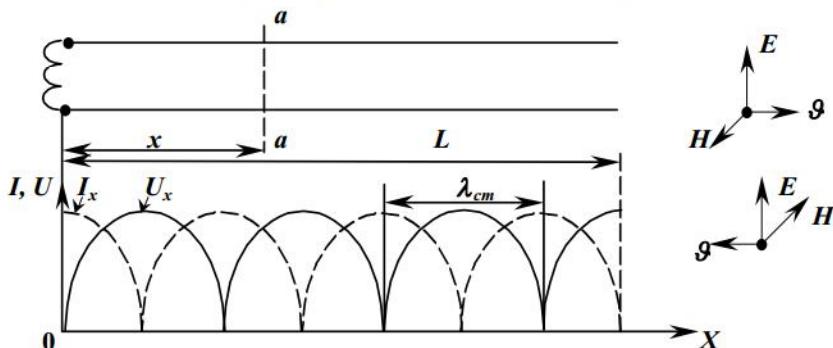


Рисунок 2.3

З двох останніх рівнянь випливає, що:

- 1) частота у стоячій хвилі збігається з частотою коливань біжучої хвилі;
- 2) амплітуда коливань величин U та I залежить від координати лінії x , змінюючись від нуля (узол) до подвоєного значення (пучність) U_0 чи I_0 ;
- 3) фази коливань струму і напруги зміщені в часі на чверть періоду, а вздовж проводів - на чверть хвилі.

Положення пучностей струму визначається умовою

$$\cos(2\pi x/\lambda) = 1,$$

звідки

$$x_k = 2k\lambda / 4, (k=0, 1, 2, 3\dots). \quad (2.3)$$

Положення пучностей напруги визначається умовою

$$\sin(2\pi x / \lambda) = 1,$$

звідки

$$x_k = (2k+1)\lambda / 4. \quad (2.4)$$

У місцях пучностей напруги лежать вузли струму і навпаки, у місцях пучностей струму – вузли напруги. При цьому слід мати на увазі, що в кінці розімкнутої лінії ($x=L$) завжди знаходиться пучність напруги і вузол струму. В кінці короткозамкненої лінії завжди знаходиться пучність струму і вузол напруги.

Таким чином, в обмежений двопровідній лінії можливі тільки такі стоячі хвилі, які відповідають умовам на границях лінії (власні коливання лінії). В нашому випадку (рис. 2.3)

$$L = (2k+1)\lambda / 4, (k=0, 1, 2, 3\dots) \quad (2.5)$$

що дає для власних частот коливань

$$\nu_k = \frac{9}{4L} (2k+1). \quad (2.6)$$

Щоб створити в лінії одне з власних коливань, необхідно генератор, що живить лінію, налаштувати на одну з частот ν_k .

Отримавши стоячу хвиллю і вимірювши відстань між сусідніми пучностями або вузлами (довжину стоячої хвилі λ_{cm}), можна знайти довжину біжучої хвилі $\lambda=2\lambda_{cm}$. Знаючи частоту генератора ν , можна знайти швидкість поширення хвиль в лінії

$$v = 2\lambda_{cm}\nu. \quad (2.7)$$

3 ОПИС УСТАНОВКИ

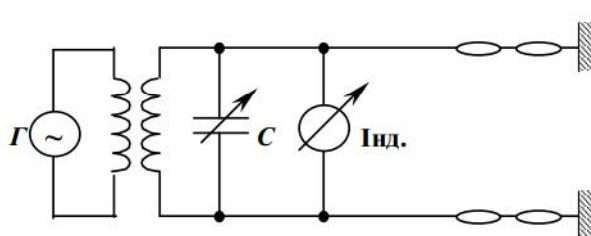


Рисунок 3.1

Дві товсті мідні дротини діаметром ~3 мм і довжиною декілька метрів, натягують паралельно на віддалі декількох см одна від другої. Вздовж проводів може пересуватися рухомий індикатор, обидва кінці якого ковзають по проводах. Пересуваючи індикатор, відмічають по шкалі, розміщений вздовж лінії проводів,

положення вузлів або пучностей стоячої хвилі (рис. 3.1). Лінія індуктивно зв'язана з генератором УВЧ коливань (з одної сторони) і ізольована від кріплень (з другої). Конденсатор, який може бути під'єднаний в лінію, служить для настроювання коливань контура в резонанс з коливаннями генератора.

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 4.1 Вмикають живлення генератора і добиваються його нормальної роботи. Частота генератора задається або може регульуватися.
- 4.2 Встановлюють індикатор біля початку лінії (кінець біля генератора). Поступово пересувають індикатор до другого кінця лінії і відмічають положення, при яких спостерігається максимальна реакція індикатора. Змінюючи ємність конденсатора,

настроюють двопровідну лінію в резонанс з коливаннями генератора. При резонансі індикатор – лампочка в пучностях напруги електричного поля світиться особливо яскраво.

- 4.3 Пересуваючи індикатор, міряють по шкалі відстань λ_{cm} між сусідніми пучностями напруги (вузлами струму).
- 4.4 Змінивши ємність генератора, або поставивши другу катушку індуктивності, повторюють ті самі вимірювання довжини стоячих електромагнітних хвиль.
- 4.5 За даними вимірювань обчислюють довжину електромагнітної хвилі в двопровідній лінії.
- 4.6 Обчислити швидкість поширення хвиль по формулі (2.7).
- 4.7 Результати звести в таблицю та обчислити похибку для швидкості \mathfrak{v} за формулою похибки непрямих вимірювань.

5 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

- 5.1 Чим відрізняється процес поширення електромагнітних хвиль в лінії Лехера від їх поширення у вільному просторі?
- 5.2 Як залежить швидкість поширення електромагнітної хвилі від властивостей середовища, в якому вона знаходиться?
- 5.3 Записати рівняння прохідної хвилі і пояснити його.
- 5.4 Пояснити процес утворення стоячої хвилі у скінченній двопровідній лінії, поняття пучності та вузла. Пов'язати ці поняття для струму і напруги, магнітного і електричного поля.
- 5.5 В чому полягає суть даного методу?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За ред І.Т.Горбачука.- Київ: Вища школа, 1992.- 512 с..
2. Калашников С.Г. Электричество.- М.: Наука, 1977.- 592 с.
3. Сірий Є.І. Загальний фізичний практикум. Ч.3.- Вид. ЛДУ, 1966.- 216 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т.3: Электричество.- М.: Наука, 1983.- 688 с.
5. Детлаф А., Яворский Б. Курс физики.- М.: Высшая школа, 1989.- 608 с.

МЕТА РОБОТИ: Побудова резонансної кривої для сили струму в контурі, вимірювання резонансної частоти, розрахунок добротності контура.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 6) лабораторна стійка;
- 7) функціональна група елементів (касета) ФПЭ-11;
- 8) генератор гармонічних електрических коливань ГЗ-118;
- 9) електронний осцилограф С1-73;
- 10) магазин опорів та магазин ємностей;
- 11) з'єднувальні проводи.

2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Вимушенні коливання в RLC-контурі

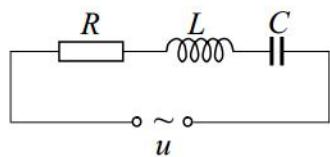


Рисунок 2.1

струму) [1]:

Розглянемо ділянку кола, яка містить послідовно з'єднані резистор R (активний або омічний опір), індуктивність L (котушку індуктивності) та ємність C (конденсатор). При під'єднанні такої RLC -ділянки до джерела періодично змінної напруги (рис. 2.1) в контурі виникають вимушенні електричні коливання, які задовільняють (при не надто високих частотах коливань) співвідношенню (закон Ома для ділянки кола змінного

$$i_0 = \frac{u_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad (2.1)$$

де u_0 – амплітудне значення напруги на клемах джерела, i_0 – амплітудне значення сили струму, $\omega = 2\pi\nu$ – циклічна частота вимушених коливань (ν – звичайна частота). При цьому сила струму $i(t)$ та напруга $u(t)$ коливаються зі зсувом фаз φ , що задається рівнянням

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}, \quad (2.2)$$

якщо закон коливань задано у формі $i = i_0 \sin(\omega t)$ та $u = u_0 \sin(\omega t + \varphi)$. Рівняння (2.1) та (2.2) ілюструється графіками на рис. 2.2 та рис. 2.3 (при $R \neq 0$). З них видно, що: 1) сила струму i_0 досягає максимума при $\omega = \omega_0$, де $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – власна частота коливань в LC -контурі (явище резонансу); 2) в точці резонансу зсув фаз $\varphi = 0$ (напруга і струм коливаються синхронно) і ділянка кола веде себе як чисто активний опір, тобто

$$i_{0m} = \frac{u_0}{R}. \quad (2.3)$$

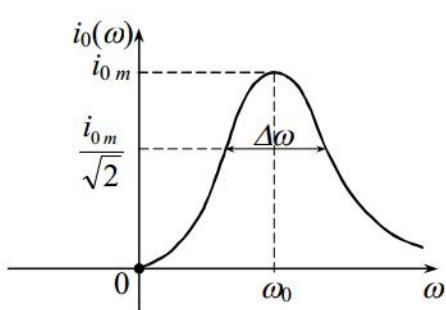


Рисунок 2.2

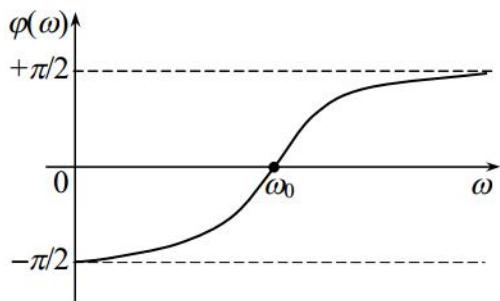


Рисунок 2.3

2.2 Добротність контура

Швидкість розпорощення електричної енергії в RLC-контурі (перетворення частини енергії в теплоту) характеризується добротністю Q [2, 3]:

$$Q = \frac{2\pi W}{\Delta W}, \quad (2.4)$$

де W – енергія, запасена в контурі, ΔW – зменшення енергії за один період коливань. В іншому варіанті означення добротності [1]

$$Q = \frac{\pi}{\delta} \rightarrow Q = \frac{\omega L}{R}, \quad (2.5)$$

де δ – логарифмічний декремент згасання коливань ($\delta = \frac{1}{N_e}$, де N_e – число повних коливань, під час яких амплітуда коливань зменшується в e -раз).

Добротність контура Q є важливою характеристикою власних та вимушених коливань в контурі і її можна визначити також на основі кривої резонансу (рис. 2.2) (Q задає гостроту резонансної кривої) [2, 3]:

$$Q \approx \frac{\omega_p}{\Delta\omega}, \quad (2.6)$$

де ω_p – резонансна частота, $\Delta\omega$ – ширина резонансної кривої на висоті $\frac{i_{0m}}{\sqrt{2}}$. Для коливального контура з малим згасанням $Q \gg 1$.

2.3 Додавання взаємно перпендикулярних коливань однакової частоти

Зміну величини зсуву фаз ϕ між струмом та напругою в RLC-контурі при зміні частоти вимушених коливань ω можна ілюструвати фігурами Ліссажу на екрані ЕПТ (електронно-променевої трубки), якщо коливання напруги на відхиляючих пластинах ЕПТ синхронізовані з досліджуваними двома коливаннями. Фігурами Ліссажу називають траєкторії узагальнюючого руху при накладанні двох взаємно перпендикулярних коливань. Таким способом, зокрема, можна вимірювати резонансну частоту ω_p .

Нехай зміщення електронного пучка ЕПТ по горизонталі задається рівнянням $x = x_0 \sin(\omega t + \varphi)$, а по вертикалі – рівнянням $y = y_0 \sin(\omega t)$. Тоді на екрані ЕПТ світна пляма буде описувати траєкторію, що задається рівнянням еліпса [3]

$$\left(\frac{x}{x_0}\right)^2 + \left(\frac{y}{y_0}\right)^2 - \frac{2xy}{x_0 y_0} \cos \varphi = \sin^2 \varphi. \quad (2.7)$$

При $\varphi=0$ рівняння (2.7) переходить в рівняння прямої, що перетинає початок координат (0,0):

$$\frac{x}{x_0} - \frac{y}{y_0} = 0. \quad (2.8)$$

Тому випадок $\omega=\omega_0$ (випадок досягнення резонансу в RLC-контурі) можна виявити за трансформацією еліпса на екрані ЕПТ у пряму лінію при плавній зміні частоти ω .

3 ОПИС ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ

Принципова схема вимірювань зображена на рис. 3.1 (коло складено на основі касети ФПЭ-11, що містить елементи схеми – котушку індуктивності L та опір R_1).

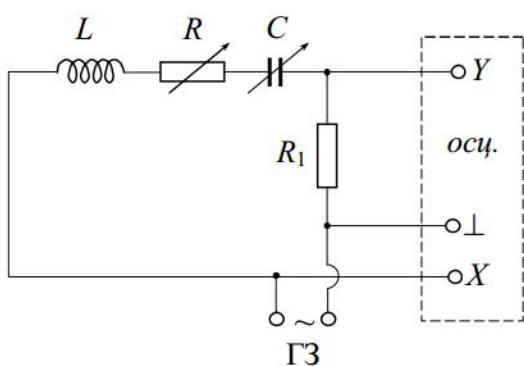


Рисунок 3.1 – Принципова електрична схема установки

на вхід „Y” осцилографа, в залежності від частоти v вихідної напруги звукового генератора. Вимірювання резонансної частоти можна виконати як на основі побудови резонансної кривої, так і шляхом спостереження фігур Ліссажу, коли на вхід „X” осцилографа подають напругу з RLC-ділянки (як зображене на рис. 3.1).

Схема монтажу дослідної установки подана на рис. 3.2.

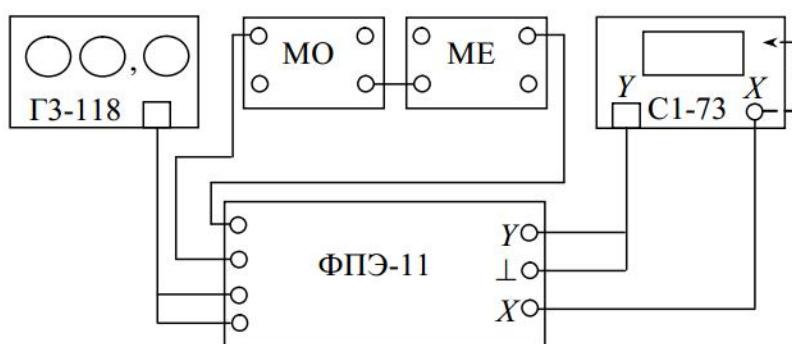


Рисунок 3.2 – Блок-схема дослідної установки

Касета ФПЭ-11, магазин опорів (МО), магазин ємностей (МЕ) і лабораторна стійка є стандартними елементами устаткування, розробленого СКБ „Союзучприбор” [4].

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 3.11 Виконати монтаж дослідної установки на лабораторній стійці за схемою на рис.
- 3.2. Під'єднати лабораторну стійку до електромережі.
- 3.12 Провести процедуру калібрування осцилографа (згідно інструкції).
- 3.13 Підготовити осцилограф до роботи в режимі вимірювання сигналу. Для цього на вхід „X” осцилографа подати напругу розгортки.
- 3.14 Виставити на МО значення опору $R=0$, на МЕ – значення ємності C в межах 1-10 нФ (за вказівкою викладача). Оцінити значення резонансної частоти v_0 за формулою:

$$v_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (4.1)$$

де покласти $L=0,1$ Гн [4].

- 3.15 Виставити амплітудне значення напруги u_0^r на виході генератора ГЗ $\square 1,5$ В. (В наших умовах цю напругу можна контролювати осцилографом або цифровим вольтметром.) Добитися спостереження сигналу на екрані осцилографа таким чином, щоби при плавній зміні частоти генератора v (в області, яка охоплює v_0) амплітуда сигналу u_0 переходила через максимум. Далі напруга u_0^r на виході генератора залишається сталою.
- 3.16 Провести вимірювання u_0 при різних частотах v в діапазоні значень 1-20 кГц (з інтервалом 1-2 кГц, а в області максимума – з інтервалом 0,2 кГц). Розрахувати амплітудне значення сили струму i_0 для кожної частоти v за формулою

$$i_0 = \frac{u_0}{R_1}, \quad (4.2)$$

де $R_1=75$ Ом [4]. Дані занести в таблицю:

Таблиця 4.1

$$R= \underline{\hspace{2cm}}, \quad C= \underline{\hspace{2cm}}.$$

v , кГц							
u_0 , В							
i_0 , мА							

- 3.17 При тій же ємності C повторити виміри п. 4.6 для одного з опорів магазину в інтервалі значень $R=100-500$ Ом. Дані занести у відповідну таблицю.
- 3.18 На міліметровому папері побудувати графіки залежності $i_0=f(v)$ для обох випадків спостережень.
- 3.19 Встановити за графіками резонансну частоту v_p (частоту, при якій u_0 досягає максимума) та ширину резонансної кривої Δv , як це показано на рис. 2.2. Розрахувати в обох випадках добротність контура Q за формулою

$$Q = \frac{v_p}{\Delta v}. \quad (4.3)$$

Дані занести в таблицю:

Таблиця 4.2

R , Ом	C , нФ	v_p , кГц	Δv , кГц	Q	Q_h

3.20 Провести додаткові вимірювання v_p за допомогою фігур Ліссажу при цих же значеннях R і C . Для цього осцилограф необхідно підготувати до роботи в режимі спостереження фігур Ліссажу (на вхід „Х” подається напруга з RLC-ділянки, як це показано на рис. 3.1). Значення v_p відповідає випадкові, коли еліпс перетворюється в пряму лінію. Обговорити причини розходження в значеннях v_p , знайдених двома способами.

3.21 Порівняти знайдені значення добротності Q з розрахованими Q_h за наближеною формулою (випливає з (2.5) при $\omega=\omega_0$)

$$Q_h \approx \frac{1}{R_k} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (4.4)$$

де опір контура $R_k = R + R_1 + R_{aux}^{\Gamma}$ (R_{aux}^{Γ} – вихідний опір генератора); $L=0,1$ Гн, R та C відповідають вибраним під час експерименту значенням опору та ємності магазинів, $R_1=75$ Ом, а R_{aux}^{Γ} виписати з панелі ГЗ-118 відповідно до використаного з'єднання .

5 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 5.1 Сформулювати закон Ома для дільниці кола змінного струму. Коли він справедливий?
- 5.2 При якій частоті амплітудне значення сили струму в RLC-контурі досягає максимуму?
- 5.3 Що характеризує добротність контура? Як значення добротності пов’язане з опором контура?
- 5.4 Що таке „фігура Ліссажу”? Як можна використати фігури Ліссажу для вимірювання резонансної частоти?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

6. Калашников С.Г. Электричество.- М.: Наука, 1977.- 592 с.
7. Парселл Э. Электричество и магнетизм.- М.: Наука, 1975.- 439 с.
8. Практикум по физике: Электричество и магнетизм / Под ред. Ф.А.Николаева.- М.: Высшая школа, 1991.- 151 с.
9. Оборудование лаборатории „Электричество и магнетизм” / Техническая документация.- Днепропетровск: СКБ „Союзучприбор”, 1993.
10. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За ред. І.Т.Горбачука.- К.: ВШ, 1992.- 512 с.

МЕТА РОБОТИ: Вимірювання коефіцієнта взаємоіндукції двох співосних котушок при різних відстанях між їх центрами.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 12) лабораторна стійка;
- 13) функціональна група елементів (касета) ФПЭ-05;
- 14) генератор гармонічних електрических коливань ГЗ-118;
- 15) електронний осцилограф С1-73;
- 16) з'єднувальні проводи.

2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Явище електромагнетної індукції

Якщо потік магнетної індукції Φ , що пронизує деякий електричний контур l змінюється з часом, то, згідно закону Фарадея-Максвелла, в цьому контурі наводиться електрорушійна сила (е.р.с.), яка пропорційна швидкості зміни з часом магнетного потоку:

$$\mathcal{E}_l = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.1)$$

де

$$\Phi = \int_{(S)} B_n dS \quad (2.2)$$

та інтеграл (2.2) береться по поверхні S , що спирається на контур l . Знак „–“ у формулі (2.1) відображає правило Ленца: індукційний струм завжди спрямований так, щоби протидіяти причині, яка його викликає.

Якщо по контуру тече змінний з часом струм $i(t)$, то породжений ним змінний магнетний потік наводить у цьому ж контурі е.р.с.-самоіндукції (завдяки $\Phi = L \cdot i$)

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{di}{dt}, \quad (2.3)$$

де L – індуктивність контура ($L=const$ у відсутності феромагнетиків).

Розглянемо два контури 1 і 2, розміщених на деякій відстані один від другого (рис. 2.1). Якщо по контуру 1 пропустити струм силою i_1 , то він створює магнетиний потік крізь контур 2, що задовільняє співвідношенню

$$\Phi_{21} = M_{21} \cdot i_1. \quad (2.4)$$

Коефіцієнт пропорційності M_{21} називають коефіцієнтом взаємої індукції контурів (взаємною індуктивністю контурів). Він залежить від форми і взаємного розміщення контурів 1 та 2, а також від

магнетних властивостей оточуючого середовища. У випадку змінного з часом струму $i_1(t)$, в другому контурі наводиться е.р.с.-індукції (у відсутності феромагнетиків)

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -M_{21} \frac{di_1}{dt}. \quad (2.5)$$

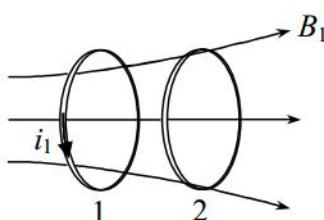


Рисунок 2.1

Якщо поміняти місцями контури 1 та 2 і повторити всі попередні міркування, то отримаємо, відповідно,

$$\mathcal{E}_2 = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -M_{12} \frac{di_2}{dt}, \quad (2.6)$$

де (теорема взаємності)

$$M_{21} = M_{12}. \quad (2.7)$$

2.2 Розрахунок коефіцієнта взаємоіндукції двох котушок

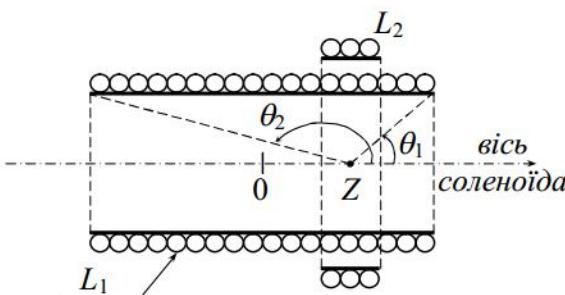


Рисунок 2.2 – Взаємне розміщення двох соленоїдів

Розглянемо дві циліндричні котушки (два соленоїди), які розміщені так, що їх осі співпадають (рис. 2.2). Одна котушка (L_2) є короткою, а друга (L_1) – довгою. Нехай струм силою i_1 тече обмоткою довгої котушки. Тоді індукція магнетного поля на осі соленоїда задається співвідношенням [1, 3]

$$B_z = \frac{\mu_0 i_1 N_1}{2l_1} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2), \quad (2.8)$$

де l_1 – довжина котушки L_1 , N_1 – число витків обмотки L_1 , а $\cos \theta_1$ і $\cos \theta_2$ визначаються на основі геометрії рис. 2.2. Тепер потік, що пронизує L_1 , рівний

$$\Phi_{21} \cong B_z S_2 N_2, \quad (2.9)$$

де S_2 – поперечний переріз соленоїда L_2 (близький до перерізу соленоїда L_1), N_2 – число витків обмотки L_2 . Далі, для M_{21} отримуємо

$$M_{21} \cong \mu_0 \frac{N_1}{l_1} \cdot \varphi(Z) \cdot S_2 N_2, \quad (2.10)$$

де характеристична функція ($\varphi(Z) \rightarrow 1$ для безмежно довгої котушки L_1)

$$\varphi(Z) \equiv \frac{1}{2} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\frac{l_1}{2} - Z}{\sqrt{\left(\frac{l_1}{2} - Z\right)^2 + r_1^2}} + \frac{\frac{l_1}{2} + Z}{\sqrt{\left(\frac{l_1}{2} + Z\right)^2 + r_1^2}} \right\} \quad (2.11)$$

задає Z -координатну залежність коефіцієнта $M_{21}(Z)$; r_1 – радіус котушки L_1 . Функція $\varphi(Z)$ приймає значення < 1 при Z , що лежать в межах довжини котушки L_1 , і прямує до нуля при Z , що лежать за межами соленоїда L_1 .

3 ОПИС ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ

В роботі використовується стандартне устаткування, спроектоване СКБ „Союзучприбор” [2]. Основним елементом дослідної установки є касета ФПЭ-05, яка складається з двох співосно розміщених котушок як зображеного на рис. 2.2, одна з яких (L_2) є рухомою і положення якої Z на осі довгої котушки (L_1) фіксується спеціальним

штоком (в установці координата Z відраховується від одного краю довгої катушки і змінюється в межах її довжини – від $Z=0$ до $Z=100$ мм).

Принципова електрична схема касети ФПЭ-05 зображена на рис. 3.1.

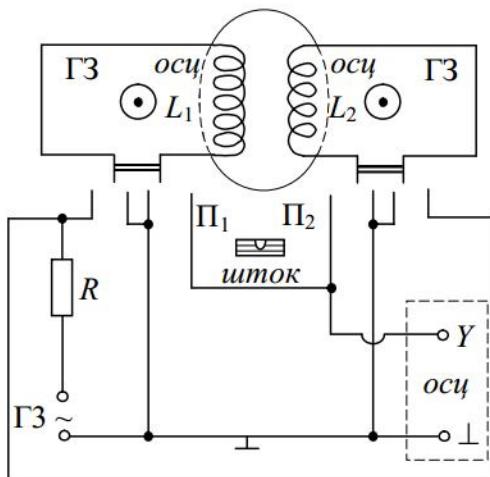


Рисунок 3.1 – Електрична схема касети ФПЭ-05

(Π_1 , Π_2 – перемикачі почергового під'єднання генератора і осцилографа в коло катушок L_1 та L_2)

Нехай генератор звукової частоти ГЗ подає напругу

$$u = u_0 \cos(\omega t) \quad (3.1)$$

в коло катушки L_1 через резистор R . Якщо R вибралі достатньо великим (значно більшим за омічний та реактивний опір катушки L_1), то струм, що тече через катушку L_1 , можна розрахувати за формулою

$$i_1 = \frac{u}{R} = \frac{u_0}{R} \cos(\omega t). \quad (3.2)$$

Тоді е.р.с., яка наводиться в катушці L_2 , рівна

$$\mathcal{E}_2 = -M_{21} \frac{di_1}{dt} = M_{21} \frac{u_0}{R} \omega \sin(\omega t). \quad (3.3)$$

Амплітудне значення цієї е.р.с., яке міряється безпосередньо за допомогою осцилографа, тепер подається у формі ($\omega = 2\pi\nu$)

$$\mathcal{E}_{02} = M_{21} \frac{u_0}{R} 2\pi\nu, \quad (3.4)$$

де ν – частота сигналу звукового генератора. Для коефіцієнта взаємоіндукції M_{21} маємо розрахункову формулу

$$M_{21} = \frac{\mathcal{E}_{02} R}{2\pi\nu \cdot u_0}. \quad (3.5)$$

Аналогічно можна отримати вираз для M_{12} .

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

3.22 Скласти дослідну установку згідно схеми рис. 4.1. Під'єднати живлення через лабораторну стійку.

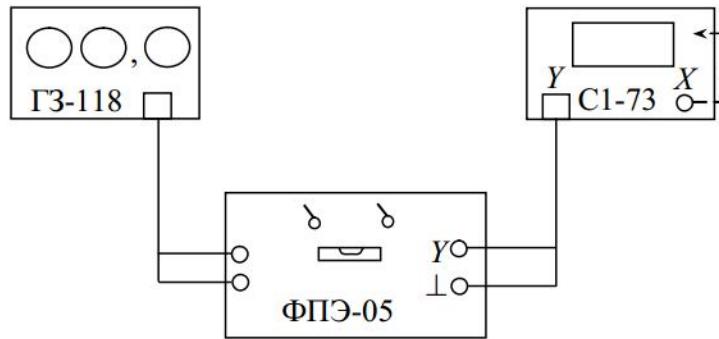


Рисунок 4.1 – Блок-схема дослідної установки

- 3.23 Відкалибрувати осцилограф (див. інструкцію). Підготувати осцилограф до режиму вимірювання сигналу (на вхід „X” подається напруга розгортки).
- 3.24 Виставити напругу u_0 сигналу, що подається зі звукового генератора на вхід касети ФПЭ-05, в діапазоні 2÷5 В, а його частоту v – в межах 2÷20 кГц. (Контроль напруги u_0 здійснюється додатково осцилографом або цифровим вольтметром.) Напруга u_0 і частота v дальше залишаються фіксованими.
- 3.25 За допомогою висувного штока касети ФПЭ-05 встановити котушку L_2 в положення $Z=0$ (за шкалою, що вказана на штоці).
- 3.26 Встановити перемикачі Π_1 та Π_2 в положення, коли сигнал від ГЗ подається в контур котушки L_1 , а осцилографом міряється е.р.с. в контурі котушки L_2 .
- 3.27 Поміряти E_{02} в положенні котушки $Z=0$ і далі при різних допустимих значеннях Z (через кожні 10 мм). Дані занести в таблицю:

Таблиця 4.1

$$u_0 = \text{_____}, v = \text{_____}, R = 10^4 \text{ Ом}$$

$Z, \text{мм}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$E_{02}, \text{В}$											
$M_{21}, \text{мГн}$											

- 3.28 Повторити виміри п. 4.6 у випадку, коли сигнал ГЗ подається в контур L_2 , а е.р.с. міряється в контурі L_1 . Переконатися у співпаданні амплітудних значень е.р.с. для різних Z в обох випадках. При розходженнях, розрахувати середнє значення е.р.с. для кожного Z .
- 3.29 Обрахувати значення M_{21} за формулою (3.5) для кожного значення Z і результати занести в таблицю 4.1.
- 3.30 На міліметровому папері побудувати графік залежності $M_{21}=f(Z)$.
- 3.31 Дати тлумачення отриманого графіку на основі формул (2.10) та (2.11).

5 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 5.5 В чому полягає явище електромагнетної індукції? Самоіндукції? Взаємоіндукції?
- 5.6 Сформулювати закон Фарадея-Максвелла для е.р.с.-індукції.
- 5.7 Сформулювати правило Ленца для індукційних струмів.
- 5.8 Від чого залежить коефіцієнт взаємоіндукції M_{21} ? Що він характеризує?
- 5.9 В чому суть теореми взаємності для коефіцієнта взаємоіндукції?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

11. Практикум по физике: Электричество и магнетизм / Под ред. Ф.А.Николаева.- М.: Высшая школа, 1991.- 151 с.
12. Оборудование лаборатории „Электричество и магнетизм” / Техническая документация.- Днепропетровск: СКБ „Союзучприбор”, 1993.
13. Парселл Э. Электричество и магнетизм.- М.: Наука, 1975.- 439 с.
14. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За ред. І.Т.Горбачука.- К.: ВШ, 1992.- 512 с.

МЕТА РОБОТИ: Ознайомлення з будовою та принципом роботи електронного осцилографа. Вимірювання за допомогою осцилографа амплітуди і частоти синусоїdalnoї напруги, встановлення шпаруватості прямокутних імпульсів та спостереження фігур Ліссажу.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 17) електронний осцилограф С1-73;
- 18) генератор синусоїdalних електричних коливань ГЗ-118;
- 19) перетворювач імпульсів (касета ФПЭ-ПИ);
- 20) стандартний блок живлення;
- 21) лабораторна стійка;
- 22) з'єднувальні проводи.

2 ОПИС ЕЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛОГРАФА

Електронний осцилограф – прилад, що використовується для дослідження швидкозмінних процесів, які відбуваються з електричними на неелектричними величинами (після їх перетворення в електричні сигнали).

Основними елементами осцилографа є електронно-променева трубка (ЕПТ), генератор розгортки, блок синхронізації, підсилювачі відхиляючих пластин, блок живлення.

2.1 Електронно-променева трубка

ЕПТ називають скляну колбу, відпомповану до високого вакууму (рис. 2.1). Всередині трубки розміщені електронна гармата 1, дві пари відхиляючих пластин 2 та флуоресцентний екран 3.

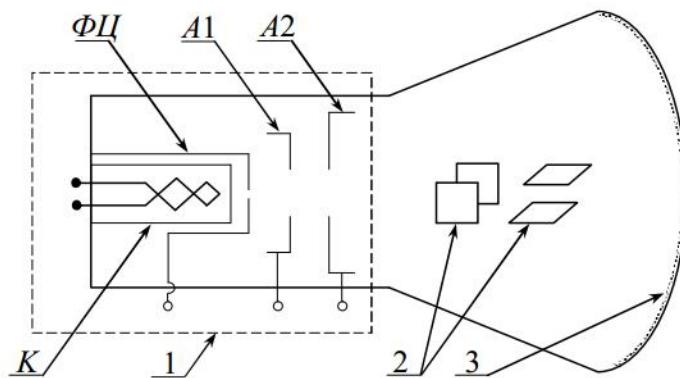


Рисунок 2.1 – Будова електронно-променевої трубки

Електронна гармата призначена для створення сфокусованого електронного пучка і складається з наступних елементів: катода непрямого розжарення *K*, який випускає при нагріванні електрони; фокусуючого циліндра *ФЦ*, що має від'ємний відносно катода потенціал і стискає електронний пучок (змінюючи цей потенціал, можна регулювати кількість випущених електронів, тобто яскравість плями на екрані

трубки); першого фокусуючого $A1$ і другого прискорюючого $A2$ анодів. Принцип дії останніх базується на законах руху електронів в електричних полях спеціальної конфігурації [1, 2].

2.2 Відхиляючі пластини

На шляху до екрану електронний пучок проходить між двома полями відхиляючих пластин. Напруга, прикладена до пластин, створює між ними електричне поле, яке відхиляє електронний пучок і це приводить до зміщення світлої плями на екрані. Горизонтально розміщені пластини відхиляють промінь по вертикалі (вздовж осі „ Y ”), а розміщені вертикально – по горизонталі (вздовж осі „ X ”).

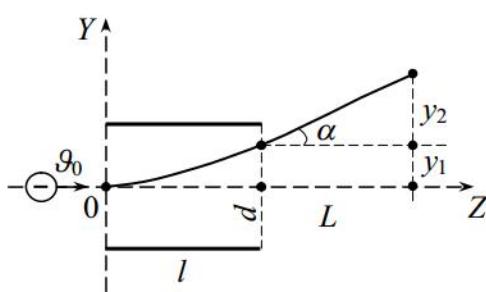


Рисунок 2.2 – Траєкторія руху електрона в електричному полі пластин

Встановимо зв’язок між напругою на відхиляючих пластинах і зміщенням плями на екрані (рис. 2.2) [2].

Нехай електрон влітає в однорідне електричне поле пластин E_y зі швидкістю $v_0 = v_z$. Рух електрона вздовж осі „ Z ” є рівномірним, а вздовж осі „ Y ” – рівноприскореним. Тому рівняння руху електрона в області між пластинами мають вигляд:

$$z = v_0 t \quad \text{та} \quad y = \frac{at^2}{2},$$

де

$$a = \frac{F_y}{m} = \frac{e \cdot E_y}{m} = \frac{eU}{md}$$

(U – напруга між пластинами). Приймаючи умову (початкова кінетична енергія електрона є наслідком його прискорення полем анода $A2$)

$$\frac{mv_0^2}{2} = eU_0,$$

де U_0 – потенціал другого анода відносно катода, отримуємо рівняння траєкторії для електрона у формі параболи

$$y = \frac{1}{2} \cdot \frac{eU}{md} \left(\frac{z}{v_0} \right)^2 \Rightarrow y = \frac{1}{4} \cdot \frac{U}{U_0 d} \cdot z^2.$$

Тепер, зміщення електрона по-вертикалі y_1 (в момент виходу за межі пластин) рівне

$$y_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{Ul^2}{U_0 d},$$

а повне зміщення $y = y_1 + y_2$ (див. рис. 2.2)

$$y = y_1 + L \cdot \tan \alpha$$

де (v_y – компонента швидкості електрона вздовж осі Y)

$$\tan \alpha = \frac{v_y}{v_0} \rightarrow \tan \alpha = \frac{a \tau}{v_0} \rightarrow \tan \alpha = \frac{eU \cdot l}{md \cdot v_0^2} \rightarrow \tan \alpha = \frac{Ul}{2dU_0}.$$

Остаточно (при $\frac{l}{2} \ll L$), отримуємо

$$y = \frac{1}{2} \cdot \frac{U \cdot l}{U_0 \cdot d} \left(\frac{l}{2} + L \right) \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{UIL}{U_0 d}. \quad (2.1)$$

Тобто, *відхилення світної плями на екрані є пропорційним до напруги між пластинами.* Коефіцієнт пропорційності

$$S = \frac{y}{U} = \frac{1}{2} \cdot \frac{IL}{U_0 d} \quad (2.2)$$

називають *чутливістю трубки* (S рівне відхиленню плями на екрані ЕПТ (в міліметрах) при напрузі 1 В на відхиляючих пластинах). Чутливість S залежить як від віддалі між пластинами і екраном, так і від потенціалу другого анода.

2.3 Генератор розгортки

Для того, щоби на екрані осцилографа побачити, як в рамках деякого фізичного процесу величина у змінюється в залежності від зміни іншої фізичної величини x , тобто візуалізувати залежність $y = f(x)$, необхідно на горизонтально відхиляючі пластини подати напругу U_x , пропорційну до x , а на вертикально відхиляючі пластини одночасно подати напругу U_y , пропорційну до y . Тоді електронний промінь буде на екрані зображати лінію, яка відповідає залежності $y = f(x)$.

Якщо тепер змусити промінь неодноразово повторити той самий шлях на екрані, то внаслідок інерційності ока спостерігач побачить на екрані нерухомий графік залежності $y = f(x)$.

На практиці часто приходиться спостерігати зміни різних фізичних величин з часом, тобто $y = f(t)$. При цьому на вертикально відхиляючі пластини необхідно подати напругу, пропорційну до значення досліджуваної величини y , а на горизонтально відхиляючі пластини – напругу, яка змінюється пропорційно часові. Для створення останньої осцилограф містить генератор розгортки.

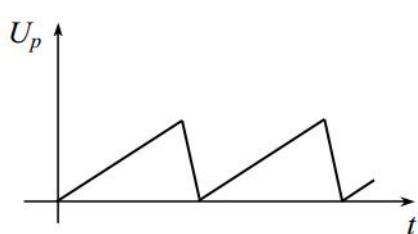


Рисунок 2.3

Генератор розгортки формує *пиловидну напругу* (рис. 2.3), яка забезпечує зміщення плями на екрані ЕПТ зліва направо пропорційно до плинності часу, відрахованого від початку руху, та миттєвий перехід променя у вихідне положення для повторного відтворення фізичного процесу. Для отримання стійкої картинки на екрані необхідно, аби частота пиловидної напруги співпадала (або була меншою в ціле число раз) з частотою повторення фізичного процесу, що вивчається. Для таких цілей осцилограф містить блок синхронізації.

2.4 Підсилювачі відхиляючих пластин

Чутливість ЕПТ, як правило, є невеликою, тому на відхиляючі пластини напруга подається після підсилення. Характеристики підсилювачів відхиляючих пластин (лінійність та діапазон частот, що пропускаються) переважно визначають можливості осцилографа.

3 ПОРЯДОК ВИМІРЮВАНЬ

Лабораторна установка складається з осцилографа С1-73, генератора синусоїдальних електрических коливань ГЗ-118, перетворювача імпульсів ФПЭ-ПИ та стандартного блоку живлення (БЖ), які під'єднуються до лабораторної стійки [3]. Перед початком виконання роботи необхідно ознайомитися з ручками керування осцилографа та звукового генератора, а також з порядком їх підготовки до роботи. Виконати процедуру калібрування осцилографа, використовуючи перемикач „V/дел” в положенні „5 дел” (див. інструкцію).

3.1 Дослідження синусоїдального сигналу

- 3.1.1 Скласти електричну схему установки за рис. 3.1. Під'єднати пристрії до мережі через лабораторну стійку.
- 3.1.2 Ввімкнути осцилограф і звуковий генератор, отримати стійку картину сигналу від генератора на екрані осцилографа для деякої фіксованої частоти сигналу (наприклад, $v_f=100$ Гц).
- 3.1.3 В поділках сітки екрану осцилографа встановити відстань l між еквівалентними точками А і В перетину синусоїди з горизонтальною віссю (рис. 3.2) і розрахувати період сигналу, помноживши відстань l на тривалість розгортки τ_p (за показами перемикача „ms/дел” або „μs/дел”):

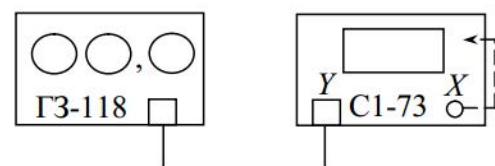


Рисунок 3.1

$$T = l(\text{под}) \cdot \tau_p \left(\frac{c}{\text{под}} \right).$$

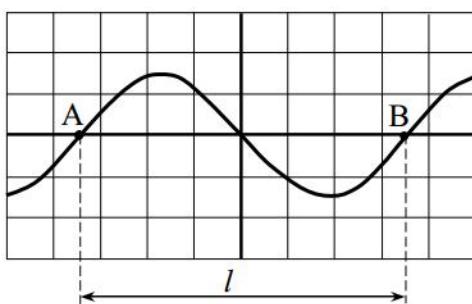


Рисунок 3.2

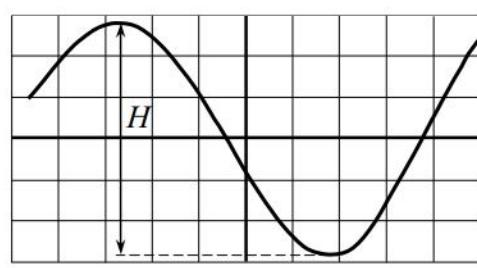


Рисунок 3.3

Обрахувати частоту сигналу

$$v = \frac{1}{T}$$

та порівняти її з частотою v_f за шкалою генератора.

- 3.1.4 Повторити виміри для 4-5 різних частот v_f і дані занести в таблицю:

Таблиця 3.1

№ досліду	v_T , Гц	τ_p , с/под	l , под	T , с	v , Гц

- 3.1.5 Для деякої частоти генератора v_T виміряти подвійну амплітуду сигналу H в поділках сітки за рис. 3.3 та розрахувати амплітудне значення U_0 у вольтах, використовуючи ціну поділки C_U (за показами перемикача „В/дел”):

$$U_0 = \frac{1}{2} \cdot H(\text{под}) \cdot C_U \left(\frac{\text{В}}{\text{под}} \right).$$

- 3.1.6 Встановити ефективне значення напруги $U_{\text{еф}}^R$ вихідного сигналу за показами вольтметра на панелі генератора (в наших умовах необхідно додатково використати цифровий вольтметр) та розрахувати амплітуду сигналу $U_0^R = U_{\text{еф}}^R \cdot \sqrt{2}$. Порівняти U_0^R з вимірюним значенням U_0 за сіткою осцилографа.

- 3.1.7 Виміри повторити 4-5 раз для інших частот v_T сигналу звукового генератора. Дані занести в таблицю:

Таблиця 3.2

№ досліду	v_T , Гц	C_U , В/под	H , под	U_0 , В	U_0^R , В

3.2 Дослідження імпульсного сигналу

- 3.2.1 Скласти електричну схему за рис. 3.4. При такому з'єднанні елементів установки синусоїdalний сигнал подається від генератора на перетворювач імпульсів, а далі, прямокутний сигнал подається на вхід „Y” осцилографа, де і спостерігається на екрані.

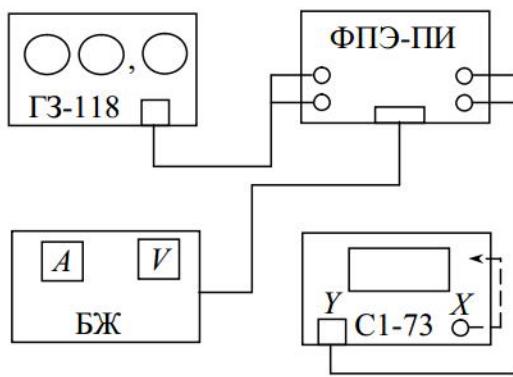


Рисунок 3.4

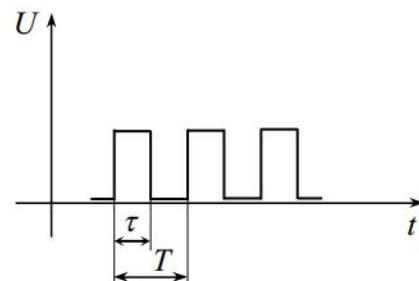


Рисунок 3.5

- 3.2.2 Отримати на екрані осцилографа стійку картину прямокутних імпульсів для фіксованої частоти генератора (наприклад, $v_T=500$ Гц). Виміряти період T і

тривалість прямокутних імпульсів τ за рис. 3.5 при різних положеннях регулятора касети „Скважноть” (див. п. 3.1.3).

- 3.2.3 Розрахувати шпаруватість Q прямокутних імпульсів за формулою:

$$Q = \frac{T}{\tau}.$$

- 3.2.4 Повторити виміри та розрахунки для 3-4 інших частот генератора v_T . Дані занести в таблицю:

Таблиця 3.3

№ досліду	v_T , Гц	τ_p , с/под	τ , с	T , с	Q

3.3 Спостереження фігур Ліссажу

Фігурами Ліссажу називають замкнуті траєкторії, що описує точка, яка одночасно здійснює два взаємно перпендикулярних гармонічних коливання. Такі фігури можна отримати на екрані осцилографа, якщо подавати синусоїdalну напругу різної частоти одночасно на горизонтально і вертикально відхиляючі пластини ЕПТ. При цьому промінь буде знаходитися під дією двох взаємно перпендикулярних відхиляючих сил. В залежності від амплітуди, частоти і фази поданих напруг фігури Ліссажу будуть мати різний вигляд [4, 5].

- 3.3.1 Скласти електричне коло за схемою на рис. 3.6.

- 3.3.2 Змінюючи частоту звукового генератора v_T , отримати і зарисувати фігури Ліссажу при різних співвідношеннях частот двох сигналів

$$v_T: v = 3:1, 3:2, 2:1, 1:1, 1:2 \text{ і т.п.}$$

Частота сигналу v , що подається на осцилограф з БЖ, рівна 50 Гц.

- 3.3.3 Встановити відповідність між відношенням частот сигналів і відношенням числа дотиків фігури Ліссажу з прямими, паралельними осям X та Y . Дані занести в таблицю:

Таблиця 3.4

№ досліду	v_T , Гц	v , Гц	Вигляд фігури Ліссажу	Співвідношення частот, встановлене за виглядом фігури

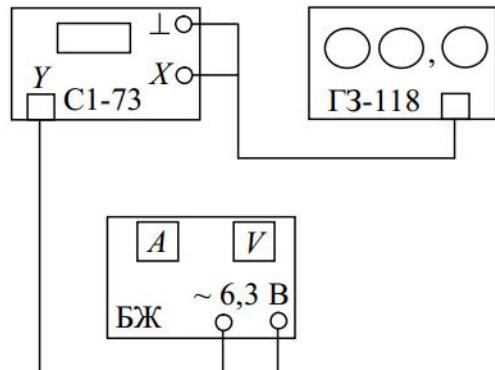


Рисунок 3.6

4 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

- 5.10 Яке призначення осцилографа?
- 5.11 Описати принцип дії електронно-променевої трубки.
- 5.12 Від чого залежить чутливість трубки осцилографа?
- 5.13 Яке призначення та принцип дії генератора розгортки?
- 5.14 Як за допомогою осцилографа знайти істинне значення амплітуди вимірюваного сигналу?
- 5.15 Як за виглядом фігури Ліссажу встановити співвідношення частот двох сигналів, що формують таку фігуру?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

- 15. Портис А. БКФ: Физическая лаборатория.- М.: Наука, 1978.- 320 с.
- 16. Практикум по физике: Электричество и магнетизм / Под ред. Ф.А.Николаева.- М.: Высшая школа, 1991.- 151 с.
- 17. Оборудование лаборатории „Электричество и магнетизм” / Техническая документация.- Днепропетровск: СКБ,,Союзучприбор”, 1993.
- 18. Кнойбюль Ф.К. Пособие для повторения физики.- М.: Энергоиздат, 1981.- 253 с.
- 19. Загальна фізика: Лабораторний практикум / За ред. І.Т.Горбачука.- К.: ВШ, 1992.- 512 с.
- 20. Метрологія та вимірювальна техніка / За ред. Є.Поліщук.- Львів: Бескид-Біт, 2003.- 543 с.

МЕТА РОБОТИ: Зняти вольт-амперну характеристику газонаповненої лампи. Встановити параметри такої характеристики.

1 ПРИЛАДИ І МАТЕРІАЛИ:

- 8) функціональна група елементів (касета ФПЭ-12);
- 9) блок живлення;
- 10) універсальний вимірювальний прилад (В7-21А);
- 11) магазин опорів;
- 12) лабораторна стійка;
- 13) з'єднувальні проводи і кабель;

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Газ в природному стані складається з електрично нейтральних атомів і молекул та не містить вільних зарядів. Отже, при нормальніх умовах гази є ізоляторами. Газ стає провідником, якщо частина його атомів (чи молекул) зіонізована, тобто розщеплена на позитивні йони і негативно заряджені електрони. Йонізація може відбуватися під впливом різних зовнішніх дій: сильного розігріву, рентгенівського, радіоактивного і космічного випромінень, бомбардування атомів газу прискореними електронами та йонами тощо. Поряд з процесами йонізації в газі відбувається і рекомбінація йонів, тобто їх з'єднання з вільними електронами з утворенням нейтральних атомів. Внаслідок йонізації і рекомбінації в газі встановлюється рівноважний стан, коли число пар йонів, що утворюється при йонізації, рівне числу пар рекомбінованих йонів.

При рекомбінації позитивного йона і електрона звільняється певна енергія, рівна енергії, затраченої на йонізацію. Частково вона випромінюється у вигляді світла і тому рекомбінація йонів супроводжується світінням (світіння рекомбінації). Якщо концентрація позитивних і негативних йонів велика, то і число актів рекомбінації буде великим, і світіння рекомбінації може бути достатньо сильним. Випромінювання світла при рекомбінації є однією з причин світіння багатьох форм газового розряду (струму в газах).

Розглянемо електричне коло, що складається з джерела напруги, газового проміжку та регулятора напруги, яка подається на газовий проміжок (рис. 2.1).

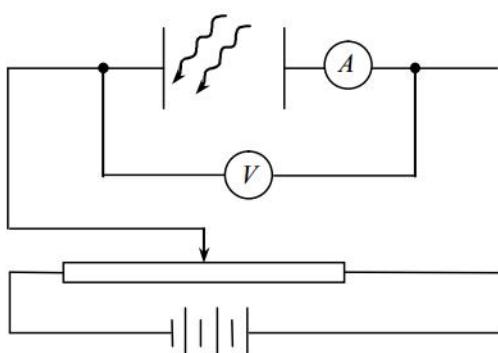


Рисунок 2.1: Принципова схема для встановлення ВАХ газового проміжку.

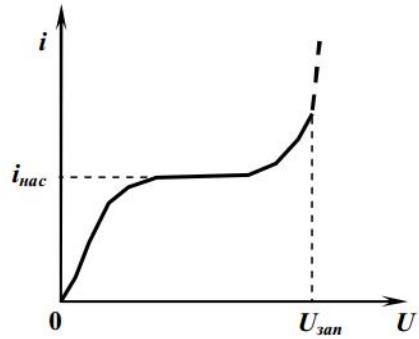


Рисунок 2.2: ВАХ несамостійного газового розряду.

Припустимо спочатку, що на газовий проміжок діє який-небудь іонізатор (наприклад, ультрафіолетове випромінення). Від цього газ набуває деяку електропровідність і в колі з'явиться струм. Напруга на газовому проміжку U та сила струму в ньому i

контролюються вимірювальними приладами. Залежність між силою струму і напругою називають вольт-амперною характеристикою (ВАХ) провідника, що є важливою його ознакою. Типова ВАХ газового проміжку подана на рис. 2.2. При малих значеннях напруги U практично виконується закон Ома (сила струму пропорційна до напруги). При досягненні деякої проміжної напруги всі породжені йонізатором носії заряду тут же досягають електродів і сила струму більше не змінюється з ростом напруги (струм насищення). При подальшому збільшенні напруги на газовому проміжку наступає момент, коли сила струму різко зростає в сотні і тисячі разів внаслідок лавиноподібного розмноження носіїв заряду (наприклад, внаслідок йонізації атомів та молекул при їх зіткненнях з пришвидшеними електронами; пунктирна лінія на рис. 2.2). В газі з'являються сильно виражені світлові і теплові ефекти. Якщо на попередніх двох ділянках ВАХ розряд має несамостійний характер (струм припиняється при усуненні дії йонізатора внаслідок повної рекомбінації йонів і електронів), то на останній ділянці розряд вже має самостійний характер. Це означає, що усунення дії йонізатора не веде до припинення струму в газовому проміжку (носії заряду самостійно розмножуються за одним із внутрішніх механізмів – ударна йонізація, термоелектронна емісія, фотоелектронна емісія тощо). В залежності від переважаючого механізму розмноження носіїв заряду, що реалізується для заданого тиску газу, форми електродів, самостійний газовий розряд класифікують на тліючий, іскровий, дуговий, коронний. Ці форми газового розряду відрізняються один від одного властивостями і зовнішнім виглядом [1].

Напруга $U_{зан}$, при якій виникає самостійний розряд, називається напругою пробою газового проміжку або напругою запалювання газового розряду.

3 ОПИС ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ

Основним елементом дослідної установки є неонова лампа низького тиску МТХ-90, в якій реалізується тліючий розряд. Лампа Л1 під'єднується до джерела постійної напруги через обмежуючий опір R_1 та магазин опорів R (рис. 3.1). Напруга живлення E , яка подається на елементи схеми, контролюється вольтметром V блоку живлення, а сила струму в лампі міряється універсальним вимірювальним приладом mA (цифровим вольтметром, який використовується в режимі амперметра). Блок-схема такої дослідної установки подана на рис. 3.2. Стандартні елементи електричної схеми виготовлені СКБ „Союзучприбор” [2].

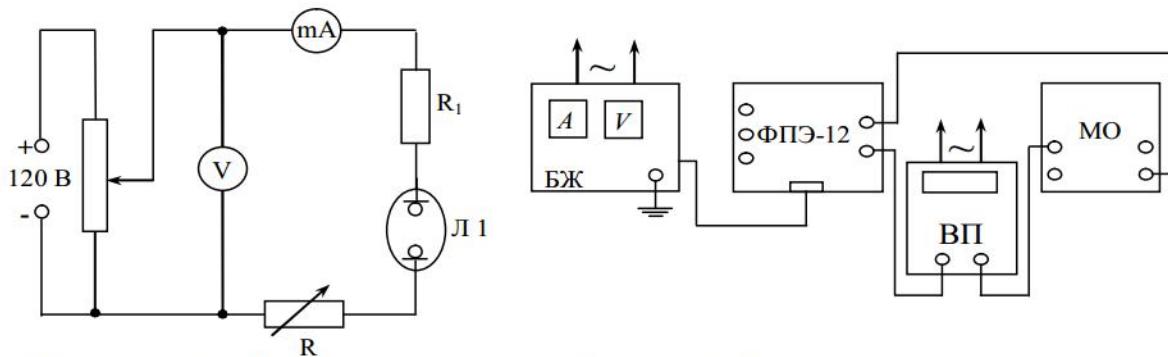


Рисунок 3.1: Принципова схема дослідної установки.

Рисунок 3.2: Блок-схема дослідної установки (БЖ – блок живлення, ФПЭ-12 – касета функціональних елементів, ВП – універсальний вимірювальний прилад, МО – магазин опорів).

За теорією [3], ВАХ тліючого розряду має вигляд S-подібної характеристики. Однак характеристика, знята за схемою рис. 3.1, має вигляд петлеподібної кривої, як це схематично подано на рис. 3.3, що називають **гістерезисом розряду**.

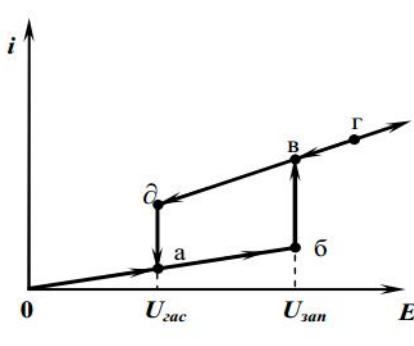


Рисунок 3.3: Петля гістерезису газового розряду ($U_{зап}$ – напруга запалювання, $U_{гас}$ – напруга гасіння).

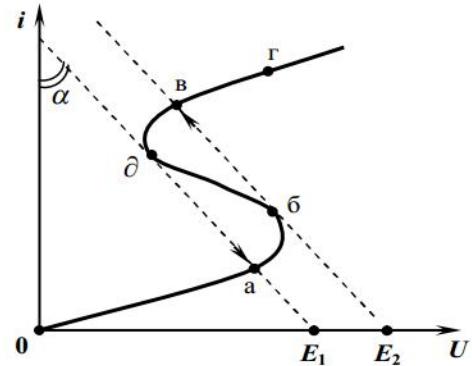


Рисунок 3.4: Вольт-амперна характеристика S-типу.

Пояснення цьому можливе за рис. 3.4 [1, 4], де пунктирні лінії зображають так звані лінії навантаження (значення напруги, що задаються законом Ома для замкнутого кола)

$$U = E - i \cdot r, \quad (3.1)$$

а суцільна лінія зображає **S-подібну істинну ВАХ газонаповненої лампи**

$$U = f(i). \quad (3.2)$$

В наших позначеннях: E – напруга на виході БЖ, U – напруга на лампі, r – додатковий опір, під'єднаний послідовно до лампи для обмеження сили струму. Таким чином, при заданих значеннях E та r в неоновій лампі є можливими лише такі стани розряду, при яких U та i одночасно задовільняють обидвом рівнянням (3.1) та (3.2). Знаходження відповідних станів розряду зручно виконати графічним способом (за перетином двох ліній). Так, нехай стан розряду описується точкою характеристики „а”. Зростом E лінія навантаження пересувається вверх паралельно сама собі і розряд плавно змінює свій стан відповідно до ділянки аб. При дальньому зростанні E розряд стрибком переходить в новий стійкий стан „в” за пунктирним відрізком бв. При цьому сила струму теж зростає стрибком (відповідає стрибкові сили струму при $U_{зап}$ на рис. 3.3). Далі стан розряду плавно змінюється за ділянкою вг. Якщо починати з точки „г” на характеристиці і поступово зменшувати E , то стан розряду змінюється наступним чином – плавно за ділянкою гвд, далі стрибком в новий стійкий стан „а” за пунктиром ∂ а (відповідає стрибкоподібному спадові сили струму при $U_{гас}$ на рис. 3.3), і далі плавно за ділянкою ао. Таким чином, спостережується на досліді залежність i від E не буде відтворювати істинну вольт-амперну характеристику газового проміжку, а буде мати вигляд петлеподібної кривої, зображену на рис. 3.3. При деяких значеннях напруги, різних при прямому і зворотньому ході, сила струму стає нестійкою і стрибком змінює свою величину.

Зі сказаного видно, що для стійкості струму потрібно аби лінія навантаження при будь-якому значенні E перетинала вольт-амперну характеристику тільки один раз, а це значить, що вона повинна йти пологіше, ніж характеристика (пунктирна лінія на рис. 3.4 повинна йти пологіше ділянки ∂ б). Оскільки $\alpha = \arctg r$, а нахил ВАХ задається $R_i = \frac{dU}{di}$ (R_i називають диференціальним опором провідника в даній точці характеристики), то умова відсутності нестійких станів струму на графіку залежності i від E зводиться до вимоги, аби зовнішній опір r був більший абсолютноного значення R_i в будь-якій точці характеристики:

$$r > |R_i|. \quad (3.3)$$

4 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

- 3.8 Провести монтаж дослідної установки на лабораторній лаві за схемою рис. 3.2. Тумблери блоку живлення (БЖ) та вимірювального приладу (ВП) початково встановити у вимкнути положення. Регулятор напруги БЖ виставити в крайнє ліве положення. На ВП встановити межі вимірювання сили струму в діапазоні ~ 1 мА. Кнопка „режим” на касеті ФПЭ-12 відпущена. На магазині опорів (МО) виставити мінімальний опір (наприклад 1 Ом).
- 3.9 Подати живлення в електричне коло дослідної установки. За допомогою регулятора напруги БЖ змінювати значення напруги E через 5-10 В в межах від 10 В до 120 В і зняти залежність $i-E$ спочатку в напрямку зростання напруги E , а потім в напрямку її зменшення. Дані занести в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1

$R_1=68 \text{ кОм} \pm 10\%, R=$			
$E, \text{ В}$	10	$E, \text{ В}$	120
$i, \text{ мА}$		$i, \text{ мА}$	

- 3.10 Побудувати графіки залежностей $i-E$ на міліметровому папері при обох напрямках зміни E в одній системі відліку.
- 3.11 Виставити на магазині опорів значення опору $R \geq 1$ МОм і повторити вимірювання п. 4.2 та побудувати відповідні графіки. Порівняти нові графіки з графіками п. 4.3 і зробити якісні висновки про присутність чи відсутність на них нестабільних станів струму газового розряду. Увага! Діапазон вимірювань сили струму на ВП тепер необхідно змінити на ~ 1 мКА.
- 3.12 Встановити значення напруги запалювання розряду $U_{\text{зап}}$ та напруги гасіння $U_{\text{гас}}$ за графіками. Визначити область значень напруги E , при яких реалізується від'ємне значення диференціального опору R_i на ВАХ газонаповненої лампи.

5 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 4.7. При яких обставинах для струму в газах реалізується випадок самостійної провідності?
- 4.8. Що таке напруга запалювання газового розряду? напруга гасіння?
- 4.9. Чому на дослідній установці не спостерігається повністю істинна ВАХ газового проміжку? Як пояснити походження петлі гістерезису газового розряду?
- 4.10. Який фізичний зміст диференціального опору R_i ? Порівняти його з поняттям електричного опору ділянки провідника.
- 4.11. Які Ви знаєте практичні використання газових розрядів?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

- С.Г.Калашников. Электричество.- М.: Наука, 1977.
- Оборудование лаборатории „Электричество и магнетизм” / Техническая документация.- Днепропетровск: СКБ „Союзучприбор”, 1993.
- А.М.Ховатсон. Введение в теорию газового розряда.- М.: Атомиздат, 1980.
- А.Портис. БКФ: Физическая лаборатория.- М.: Наука, 1978.

Додаток А**ОДИНИЦІ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ І МАГНЕТНИХ ВЕЛИЧИН
В СИСТЕМІ СІ****Таблиця А.1**

Назва величини	Одиниці вимірювання	Додаткова інформація
Сила електричного струму (потік електричного заряду)	1 А	
Густина струму	1 А·м ⁻²	
Електричний заряд	1 Кл = 1 А·с	
Електричний дипольний момент	1 Кл·м	
Поляризованість (вектор поляризації)	1 Кл·м ⁻²	
Поверхнева густина електричного заряду	1 Кл·м ⁻²	
Електричний потенціал та напруга	1 В = 1 Дж·Кл ⁻¹	
Електрорушійна сила джерела струму	1 В = 1 Дж·Кл ⁻¹	
Напруженість електричного поля	1 В·м ⁻¹	
Потік вектора напруженості	1 В·м	
Індукція електричного поля (зміщення)	1 Кл·м ⁻²	
Потік вектора зміщення	1 Кл	
Робота електричних сил	1 Дж = 1 Вт·с	1 еВ ≈ 1,6·10 ⁻¹⁹ Дж
Потужність електричного струму	1 Вт = 1 А·В	
Питома теплова потужність електричного струму	1 Вт·м ⁻³	
Електрична ємність	1 Ф = 1 Кл·В ⁻¹	
Електричний опір струмові	1 Ом = 1 В·А ⁻¹	
Питомий електроопір	1 Ом·м	
Питома електропровідність	1 Ом ⁻¹ ·м ⁻¹	
Рухливість носіїв заряду	1 м ² ·с ⁻¹ ·В ⁻¹	
Магнетна індукція	1 Тл = 1 Н·А ⁻¹ ·м ⁻¹ = = 1 В·с·м ⁻²	1 Гс = 10 ⁻⁴ Тл
Потік вектора магнетної індукції (магнетний потік)	1 Вб = 1 Дж·А ⁻¹ = 1 В·с	1 Мкс = 10 ⁻⁸ Вб
Напруженість магнетного поля	1 А·м ⁻¹	1 Е = $\frac{10^3}{4\pi}$ А·м ⁻¹
Циркуляція вектора магнетної напруженості (магнеторушійна сила)	1 А	
Магнетний момент електричного струму	1 А·м ²	
Намагніченість (вектор намагнічування)	1 А·м ⁻¹	
Індуктивність	1 Гн = 1 Вб·А ⁻¹	
Об'ємна густина електромагнетної енергії	1 Дж·м ⁻³ = 1 Па	
Вектор Пойнтінга (густина потоку електромагнетної енергії)	1 Вт·м ⁻²	
Швидкість електромагнетних хвиль у вакуумі (електродинамічна стала)	1 м·с ⁻¹	$\mathfrak{g}_c \approx 3,0 \cdot 10^8$ м·с ⁻¹
Магнетна стала	1 Гн·м ⁻¹	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн·м ⁻¹
Електрична стала	1 Ф·м ⁻¹	$\varepsilon_0 = (\mu_0 \cdot \mathfrak{g}_c^2)^{-1} \approx$ $\approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф·м ⁻¹
Елементарний заряд (заряд електрона)	1 Кл	$e \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Стала Фарадея	1 Кл·моль ⁻¹	$F = N_A e \approx 9,6 \cdot 10^4$ Кл·моль ⁻¹

Додаток В

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ НАЙМЕНШИХ КВАДРАТІВ ПРИ АПРОКСИМАЦІЇ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МІЖ ФІЗИЧНИМИ ВЕЛИЧИНAMI

При виконанні сумісних вимірювань двох (або більше) фізичних величин в певному інтервалі їх значень (наприклад, при знятті вольт-амперної характеристики провідника, залежності опору провідника від температури, кривої градуування для термопар тощо) виникає задача побудови рівноважної кривої, що відтворює залежність між величинами та поширення (екстраполяції) встановленого закону взаємозалежності величин на суміжні області значень цих величин. Таку двоєдину задачу можна розв'язати на основі апроксимації (наближеного представлення) дослідної залежності між парою величин „ Y ” та „ X ”, поданої у вигляді таблиці результатів вимірювань (X_i , Y_i), функцією $y=y(x)$ методом найменших квадратів (МНК). Суть методу полягає у мінімізації суми квадратів відхилення S експериментальних точок (Y_i) від розрахункових значень для цієї величини на основі апроксимуючої функції $y=y(x)$:

$$S = \sum_{i=1}^N [y_i - y(x_i)]^2 \Rightarrow \min,$$

де N – число сумісних вимірювань, тобто число пар значень (Y_i , X_i).

Так, нехай апроксимуючою функцією є пряма $y = a + bx$. Мінімізація виразу

$S(a, b) = \sum_{i=1}^N [y_i - (a + b \cdot x_i)]^2$ зводиться до вимоги $\frac{\partial S}{\partial a} = 0$ та $\frac{\partial S}{\partial b} = 0$. Розв'язком системи

двох алгебраїчних рівнянь, що утворюються,

$$\begin{cases} b \sum_{(i)} x_i + a \cdot N = \sum_{(i)} y_i, \\ b \sum_{(i)} x_i^2 + a \sum_{(i)} x_i = \sum_{(i)} x_i y_i, \end{cases}$$

є вирази для невідомих коефіцієнтів „ a ” та „ b ”:

$$a = \frac{\left(\sum_{(i)} x_i^2 \right) \left(\sum_{(i)} y_i \right) - \left(\sum_{(i)} x_i \right) \left(\sum_{(i)} x_i y_i \right)}{N \sum_{(i)} x_i^2 - \left(\sum_{(i)} x_i \right)^2};$$

$$b = \frac{N \sum_{(i)} x_i y_i - \left(\sum_{(i)} x_i \right) \left(\sum_{(i)} y_i \right)}{N \sum_{(i)} x_i^2 - \left(\sum_{(i)} x_i \right)^2}.$$

Середньоквадратичні похибки при визначенні коефіцієнтів „ a ” і „ b ” оцінюються за даними вимірювань на основі теорії кореляцій (ρ - коефіцієнт лінійного кореляційного зв'язку між величинами „ X_i ” та „ Y_i ”, який лежить в межах $0 \leq \rho \leq 1$):

$$\sigma_a = \sigma_b \sqrt{\frac{\sum_{(i)} X_i^2}{N}};$$

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{(1-\rho) \left[N \sum_{(i)} y_i^2 - \left(\sum_{(i)} y_i \right)^2 \right]}{(N-2) \left[N \sum_{(i)} x_i^2 - \left(\sum_{(i)} x_i \right)^2 \right]}};$$

$$\rho = \frac{N \sum_{(i)} x_i y_i - \left(\sum_{(i)} y_i \right) \left(\sum_{(i)} x_i \right)}{\sqrt{\left[N \sum_{(i)} y_i^2 - \left(\sum_{(i)} y_i \right)^2 \right] \left[N \sum_{(i)} x_i^2 - \left(\sum_{(i)} x_i \right)^2 \right]}}.$$

Ілюструємо застосування МНК для обробки даних лабораторної роботи № 40 „Визначення роботи виходу електронів з металу” з використанням програмованих електронно-обчислювальних машин (ЕОМ). Так, в цій роботі побудову **прямої Річардсона**, що встановлює взаємозв’язок між струмом насичення I_h та температурою катода T , можна організувати на основі викладеної вище процедури лінеаризації з обрахунками на ЕОМ. При цьому, обчислення коефіцієнтів апроксимуючої прямої дозволяє відразу отримати значення роботи виходу A_a та величини середньоквадратичної похибки для неї σ_A .

ЛІТЕРАТУРА

1. Фізика з використанням обчислювальної техніки: Практичний курс / Казанський В.М. та ін.– Київ: Либідь, 1993.– 222 с.