

Колупаєв Б.С., Бордюк М.А., Шевчук Т.М.

Електрика і

МАГНЕТИЗМ

Практикум
Навчально-методичний посібник

Рівне - 2007

УДК 53(07)

Колупаєв Б.С., Бордюк М.А., Шевчук Т.М. Електрика і магнетизм: Практикум. Навчально-методичний посібник. – Рівне: РДГУ, 2007. – 337 с.

У навчально-методичному посібнику подано матеріал для виконання робіт лабораторного практикуму та проведення практичних занять із розділу загальної фізики "Електрика і магнетизм". Матеріал посібника підібраний відповідно до діючих програм вищих навчальних закладів III-IV рівня акредитації, згідно з рейтингового-модульним підходом. Для кожного змістового модуля розділу курсу загальної фізики запропонований цикл лабораторних робіт і відповідна кількість задач, що розміщені в порядку складності їх розв'язку. Структура кожного розділу посібника дає можливість студентам ознайомитися з теоретичним матеріалом і використати його при виконанні лабораторних робіт і розв'язуванні задач.

Навчально-методичний посібник для викладачів і студентів, учнів та вчителів, які вивчають фізику.

Рецензенти:

Шут М.І., доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри фізики НПУ ім. М.П. Драгоманова, член-кореспондент АПН України.

Касперський А.В., доктор педагогічних наук, професор кафедри фізики НПУ ім. М.П. Драгоманова.

Сусь Б.А., доктор педагогічних наук, професор кафедри загальної фізики і фізики твердого тіла Військового інституту телекомунікацій та інформації НТУ "Київський політехнічний інститут"

Друкується за рішенням Вченої Ради РДГУ, протокол № 9 від 27.04.2007 р.

ISBN 966-7281-03-7 ©Колупаєв Б.С., Бордюк М.А., Шевчук Т.М., 2007
©РДГУ, 2007

Пропозиції та зауваження просимо надсилати на електронну адресу: iryuna1979@mail.ru

Вступ

Лабораторний практикум із розділу “Електрика і магнетизм” дає можливість студентам отримати практичні навички в експериментальній роботі, монтажі електричних схем. Відомості про електричні, радіовимірювальні прилади, техніка вимірювання електричних і магнітних величин, техніка обробки результатів експерименту, а також відповідні теоретичні та практичні знання допоможуть студентам більш осмислено виконувати роботи практикумів із електротехніки, радіотехніки, автоматики і т.д. Більшість лабораторних робіт складено таким чином, що студентам надається можливість виконати невеликі самостійні дослідження, познайомитись із методичними порадами щодо використання цього матеріалу на уроках у середній школі. Студент сам повинен встановити режим роботи приладів, вибрати область вимірювання та спосіб реєстрації, здійснити обробку результатів, порівняти їх із існуючими даними, одержаними іншими методами.

У кожній лабораторній роботі особлива увага надається найбільш повному розкриттю фізичної суті явищ та встановленню закономірностей, якими ці явища описуються. Для аналізу основних закономірностей, що вивчаються в роботі фізичного практикуму, пропонуються задачі для самопідготовки, розв'язок яких дає можливість студенту з'ясувати взаємозв'язок між фізичними величинами, які описують явище, процеси, що досліджують експериментально. Виконання робіт цього фізичного практикуму можуть бути змодельовані з використанням сучасного комп'ютерного забезпечення.

У другій частині навчального посібника подано тексти задач із розділу “Електрика і магнетизм”. Це зумовлено тим, що розв'язок конкретних фізичних задач є необхідною практичною основою при вивченні курсу фізики. Їх розв'язок сприяє самостійній творчій роботі, вчить аналізувати явища, що розглядаються, виділяти головні фактори, що характеризують те чи інше явище, відкидаючи випадкові чи несуттєві деталі. Розв'язок задач дає можливість студентам створити моделі наукового фізичного дослідження.

Задачі, що пропонуються у цьому навчальному посібнику, відповідають програмі курсу загальної фізики для вищих

навчальних закладів і охоплюють усі теми розділу "Електрика і магнетизм". Короткі теоретичні відомості до кожної теми дозволяють студентам швидко зорієнтуватися у розглянутому колі явищ і використати для розв'язку задач основні фізичні закони і закономірності. Проте у процесі розв'язку задач отримуються результати, які потребують більш детального теоретичного узагальнення.

Основна ідея цього навчального посібника полягає у тому, щоб органічно поєднати практику проведення лабораторних робіт і практику розв'язку задач. Такий паралельний підхід дає можливість вивчати теоретичний матеріал за принципами розвитку і доповнення.

Матеріали цього навчального посібника можна використати при вивченні змістових модулів: I. Електростатика. Постійний електричний струм. II. Електромагнетизм. Постійне магнітне поле у речовині. III. Електромагнітна індукція. Квазістаціонарні струми. IV. Електромагнітні поля. Електромагнітні коливання і хвилі.

Розділ I. Статистичний аналіз результатів експерименту

Розглянемо застосування математичної статистики оцінки невідомих фізичних величин за результатами експерименту. Матеріал викладено в найбільш загальному вигляді, що дозволяє використати його для розв'язку найрізноманітніших проблем, інтерпретація яких базується на статистичному аналізі результатів.

1.1. Випадкові величини

Величина x , яка є результатом випадкового дослідження, називається випадковою величиною. Різні результати вимірювань можуть бути пов'язані з наявністю випадкових похибок вимірювань або із статистичною природою вимірюваної величини. Окремі можливі значення випадкової величини позначаються x_i , де $i=1,2,\dots,N$. Будь-яка функція від x_i - також випадкова величина. Важливою характеристикою випадкової величини є: 1) деяке число, навколо якого групуються можливі значення випадкової величини; 2) міра розкидання значень випадкової величини відносно даного числа.

При цьому розрізняють вибірку, що складається із скінченного числа значень випадкової величини, і генеральну сукупність – повний набір усіх можливих значень, які може приймати випадкова величина. В генеральній сукупності важливим є поняття математичного очікування. Математичне очікування функції $g(x)$ визначається наступним чином:

$$\xi[g(x)] = \sum P_i g(x) \quad (1.1.1)$$

у випадку дискретного розподілу:

$$\xi[g(x)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)g(x)dx \quad (1.1.2)$$

у випадку неперервного розподілу.

Завдання математичної статистики – вказати методи, за допомогою яких за результатами вибірки можна було б отримати оцінки невідомих параметрів генеральної сукупності та їх похибок, що є випадковими величинами. Для цього розглянемо деякі характеристики вибірки:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i . \quad (1.1.3)$$

Якщо y – нелінійна функція незалежних випадкових величин $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, то її середнє вибране наближено виразиться як $\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$. Якщо кожному значенню x_i приписати вагу ω_i , то зважене середнє:

$$\bar{x}_\omega = \frac{\sum x_i \omega_i}{\sum \omega_i} . \quad (1.1.4)$$

Розглянемо основні міри розсіювання випадкової величини. Вибране середнє квадратичне відхилення обчислюється як:

$$S = \left\{ \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2 \right\}^{\frac{1}{2}} . \quad (1.1.5)$$

Величина S^2 називається дисперсією.

Якщо випадкова величина y є деякою нелінійною функцією n незалежних випадкових величин $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, яка мало змінюється в невеликих інтервалах зміни аргумента, то для дисперсії $S^2(y)$ справедлива наближена формула:

$$S^2(y) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 S^2(x_1) + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 S^2(x_2) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^2 S^2(x_n) . \quad (1.1.6)$$

Формулою (1.1.6) часто користуються в теорії похибок для визначення випадкової похибки функції за значенням випадкових похибок аргументів.

Мірою розсіювання служить середнє відхилення :

$$d = \frac{1}{n} \sum |x_i - \bar{x}| . \quad (1.1.7)$$

Для вибірки, яка має n пар значень (x_i, y_i) двох випадкових величин x і y , вводиться поняття коефіцієнта кореляції r_n :

$$r_n = \frac{\frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{S_x S_y} \quad (1.1.8)$$

або

$$r_n = \frac{\frac{1}{n} \sum x_i y_i - \bar{x} \bar{y}}{S_x S_y} . \quad (1.1.9)$$

Якщо $r_n=0$, то x і y некорельовані, але ці величини не обов'язково незалежні. Якщо $r_n=\pm 1$, то між x і y існує пряма пропорційність.

1.2. Визначення похибок

Більшість величин, що використовуються при розрахунках, – наближені. Крім того, всі чисто математичні константи, фізичні константи, а також результати математичних операцій є числами, для яких не можна знайти точне значення. Практично в усіх розрахунках ми використовуємо наближені числа.

Для характеристики відхилення наближеного значення будь-якої величини від її істинного значення вводять поняття абсолютної і відносної похибок. Нехай A – точне значення деякої фізичної величини, a – її наближене значення. Тоді абсолютна похибка δ буде дорівнювати :

$$\delta = |\Delta a| = |A - a| \quad \text{або} \quad A = a \pm \delta .$$

Гранична абсолютна похибка $\delta_{гр}$ визначається нерівністю:

$$\delta_{гр} \geq |A - a| \quad \text{або} \quad \delta_{гр} \geq \pm A \mp a ,$$

звідси $A \geq a - \delta_{гр} .$

Таким чином, істинне значення A лежить у межах:

$$a - \delta_{гр} \leq A \leq a + \delta_{гр} . \quad (1.2.1)$$

Для характеристики відносної точності вимірювань вводиться відносна похибка, яка дорівнює:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{|A|} \quad \text{або} \quad \delta = \varepsilon \cdot |A|. \quad (1.2.2)$$

При цьому гранична відносна похибка $\varepsilon_{\text{гр}}$ визначається нерівністю:

$$\varepsilon_{\text{гр}} \geq \frac{\delta}{|A|} \quad \text{або} \quad \delta \leq \varepsilon_{\text{гр}} \cdot |A|. \quad (1.2.3)$$

Цю нерівність можна подати рівнянням виду:

$$\varepsilon_{\text{гр}} \cdot |A| = \delta_{\text{гр}} \quad \text{або} \quad \varepsilon_{\text{гр}} = \frac{\delta_{\text{гр}}}{|A|}. \quad (1.2.4)$$

Очевидно, що в усі формули входить невідома величина A , яка не дає можливості чисельно визначити похибки. Практично можна вважати $A \approx a$, тоді:

$$\varepsilon \cdot |a| \approx \delta \quad \text{і} \quad \varepsilon_{\text{гр}} \cdot |a| \approx \delta_{\text{гр}}.$$

Таке співвідношення використовують для підрахунків, при цьому:

$$A = a(1 + \varepsilon). \quad (1.2.5)$$

Якщо розширити межі, в яких лежить точне значення A , то:

$$A = a(1 + \varepsilon_{\text{зр}}).$$

У загальному випадку, коли знаки похибок відомі, точне значення ε буде:

$$\varepsilon = \frac{\left| \sum^i \Delta a_i \right|}{A} \approx \frac{\left| \sum^i \Delta a_i \right|}{a} \leq \frac{\delta_{\text{зр}}}{a}, \quad (1.2.6)$$

$$\varepsilon_{\text{зр}} = \frac{A_1 \varepsilon_{\text{зр}1} + A_2 \varepsilon_{\text{зр}2} + \dots + A_n \varepsilon_{\text{зр}n}}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}. \quad (1.2.7)$$

Нехай маємо деяку функцію однієї змінної $y = f(x)$, тоді похибка аргумента Δx приведе до похибки функції; $y + \Delta y = f(x + \Delta x)$, а після розкладання в ряд Тейлора:

$$y + \Delta y = f(x) + f'(x)\Delta x \quad \Delta y \approx f'(x)\Delta x.$$

Узявши до уваги, що $|\Delta y| = \delta_y$ і $|\Delta x| = \delta_x$, отримаємо $\delta_y = |f'(x)|\delta_x$. Враховуючи, що для незалежної змінної x справедлива рівність $\Delta x = dx$, отримаємо:

$$\varepsilon_y = \frac{\delta_y}{|y|} = \frac{|\Delta y|}{y} \approx \frac{|df(x)|}{|f(x)|} = |d \ln f(x)| = \left| \frac{d}{dx} \ln f(x) \right| \Delta x = \left| \frac{d}{dx} \ln f(x) \right| \delta_x. \quad (1.2.8)$$

У випадку, коли $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ і змінні визначені наближено, тоді, поклавши $|\Delta y| = \delta_y$ і $|\Delta x| = \delta_x$ і нехтуючи членами, що містять Δx_i в степенях вище першого, матимемо:

$$y + \Delta y = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n)$$

або

$$y + \Delta y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \Delta x_i.$$

Звідки:

$$\Delta y \approx \sum \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) \Delta x_i. \quad (1.2.9)$$

Якщо всі похибки мають однаковий знак, то:

$$\delta_{zp} = \sum \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| |\Delta x_i| = \sum \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \delta_{x_i}.$$

Значення похідних $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ беруть у точках, які відповідають

вимірним значенням x_i або середнім арифметичним \bar{x}_i (якщо проводиться серія вимірювань). Гранична відносна похибка буде такою:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\delta_{zp}}{y} \approx \sum \left| \frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \Delta x_i = \sum \left| \frac{\partial}{\partial x_i} \ln f \right| |\Delta x_i| = \sum \left| \frac{\partial}{\partial x_i} \ln f \right| \cdot \delta x_i = \\ &= \sum \left| \frac{\partial}{\partial x_i} \ln f \right| |\Delta x_i| = \partial \ln(x_1, x_2, \dots, x_n). \end{aligned}$$

За допомогою цих формул отримаємо вирази для розрахунків похибок різноманітних функціональних залежностей.

Таблиця 1.

Функціональні залежності	Абсолютна похибка	Відносна похибка
$y = x_1 + x_2$	$\pm(\Delta x_1 + \Delta x_2)$	$\pm \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{x_1 + x_2}$
$y = x_1 - x_2$	$\pm(\Delta x_1 + \Delta x_2)$	$\pm \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2}{x_1 - x_2}$
$y = x_1 x_2$	$\pm(x_1 \Delta x_2 + \Delta x_1 x_2)$	$\pm \left(\frac{\Delta x_1}{x_1} + \frac{\Delta x_2}{x_2} \right)$
$y = \frac{x_1}{x_2}$	$\pm \frac{x_1 \Delta x_2 + x_2 \Delta x_1}{x_2^2}$	$\pm \left(\frac{\Delta x_1}{x_1} + \frac{\Delta x_2}{x_2} \right)$
$y = x^n$	$\pm n x^{n-1} \Delta x$	$\pm n \frac{\Delta x}{x}$
$y = \sqrt[n]{x}$	$\pm \frac{1}{n} x^{1/n-1} \Delta x$	$\pm \frac{\Delta x}{n x}$
$y = \sin x$	$\pm \Delta x \cos x$	$\pm \Delta x \operatorname{ctg} x$
$y = \cos x$	$\pm \Delta x \sin x$	$\pm \Delta x \operatorname{tg} x$
$y = \operatorname{tg} x$	$\pm \Delta x \sec^2 x$	$\pm 2 \left(\frac{\Delta x}{\sin 2x} \right)$
$y = \operatorname{ctg} x$	$\pm \Delta x \operatorname{cosec} x$	$\pm 2 \left(\frac{\Delta x}{\cos 2x} \right)$
$y = \ln x$	$\pm \frac{\Delta x}{x}$	$\pm \frac{\Delta x}{x \ln x}$

1.3. Обробка результатів експерименту

Оцінюючи достовірність отриманого значення вимірюваної величини, потрібно враховувати обмеженість точності вимірювального приладу, а також систематичні і випадкові похибки. Розглянемо співвідношення між випадковими і

систематичними похибками і "дозволяючою" можливістю шкали приладу.

У розглянутих лабораторних роботах дозволяюча здатність вимірною приладу і систематична похибка виступають як величини, що не залежать від числа вимірювань. Випадкові похибки можна зробити як завгодно малими шляхом збільшення числа вимірювань. Якщо всі три види похибок взаємозв'язані, то результуючу похибку можна визначити як:

$$\delta_{рез} = \delta_{инк.н} + \delta_{сист.} + \delta_{ван.}, \quad (1.3.1)$$

де $\delta_{инк.н} + \delta_{сист.} = \Delta$ - характеризує обмежену точність вимірювального приладу і систематичну похибку. Величина Δ обмежує число значущих цифр у результаті експерименту, а також впливає на проведення статистичних розрахунків. Як правило, Δ - мала величина в порівнянні з виміряною. Обмежену точність вимірювального приладу і наявність систематичних похибок можна взяти до уваги, розрахувавши абсолютні похибки у вимірній величині за формулою:

$$\delta_{гр} \approx \sum_i \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| |\Delta x_i| = \sum_i \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \delta_{xi}. \quad (1.3.2)$$

оскільки в процесі експериментів вони суттєво не змінюються. Величина Δ визначає також кількість значущих цифр величини, яку шукають.

Нехай є n величин x_1, x_2, \dots, x_n , отриманих при безпосередньому вимірюванні деякої величини x . Наявність випадково діючих факторів приводить до того, що результати окремих вимірювань є випадкові величини, значення яких коливаються навколо деякого середнього. Таким чином, урахування дії випадкових факторів на вимірювану величину зводиться до визначення деякої оптимальної оцінки генерального середнього величини, що вимірюється, тобто:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i$$

і степені близькості цієї оцінки до генерального середнього вимірної величини. Степінь близькості визначається довірчим

інтервалом, а ймовірність потрапляння у нього генерального середнього – довірчою ймовірністю (α). Довірча ймовірність задається експериментатором в залежності від бажаного ступеня надійності оцінки, рівній 0,95 (може бути $\alpha=0,975$; 0,99; 0,999). Довірчий інтервал для генерального середнього вимірюваної величини за заданою ймовірністю потрапляння в нього можна побудувати, користуючись випадковою величиною t і функцією розподілу Стюдента, оскільки число вимірювань обмежене. Тоді випадкова похибка $\delta(x)$ для заданого числа ступнів вільності $f=n-1$:

$$\delta_{\text{вин}}(x) = \frac{t_{1-\alpha}(f)S(x)}{\sqrt{n}}, \quad (1.3.3)$$

де n – число вимірювань; ймовірності α знаходять за допомогою таблиць. З урахуванням тільки випадкових похибок записують результат вимірювання деякої величини x :

$$x = \bar{x} \pm \delta_{\text{вин}}(x) = \bar{x} \pm \frac{t_{1-\alpha}(f)S(x)}{\sqrt{n}}. \quad (1.3.4)$$

При цьому результат вимірювання функції з урахуванням тільки випадкової похибки вирачається як:

$$y = \bar{y} \pm \frac{t_{1-\alpha}(f)S(y)}{\sqrt{n}}. \quad (1.3.5)$$

Якщо $f(x)$ – складна функція і обчислення y_i за x_i складне, то можна рекомендувати визначити спочатку за даними вимірювань x_i величини x і $S^2(x)$, а потім один раз перерахувати відповідні величини \bar{y} і $S(y)$:

$$\bar{y} = f(x)S(x) = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=\bar{x}} \cdot S(x). \quad (1.3.6)$$

При непрямих вимірюваннях функції декількох змінних $y=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ розв'язок задачі ще більш ускладнюється. Тому точна оцінка похибки практично неможлива і в ряді випадків не має рації. Використовують спрощений підхід для оцінки випадкової похибки вимірювань. Дисперсія обчислюється за формулою:

$$S^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_{x_i = \bar{x}_i}^2 ; \quad S^2(y) = \delta^2(y) . \quad (1.3.7.)$$

Це дає можливість оцінити величину випадкової похибки:

$$\delta_{\text{вип}}(y) = u_{1-\alpha} S(\bar{y}) , \quad (1.3.8.)$$

де $u_{1-\alpha}$ -- величина, що визначається функцією нормального розподілу для довірчої ймовірності α , яку знаходять за допомогою таблиць $t_p(f)$. Тоді :

$$y = \bar{y} \pm \delta_{\text{вип}}(y) .$$

Будемо вважати, що фізичні характеристики підлягають нормальному закону розподілу. Причому деяку нормально розподілену величину y обчислюють за допомогою непрямих вимірювань функції $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ (в експериментах безпосередньо вимірюють величини x_1, x_2, \dots, x_n без систематичних похибок). Виходячи із закону накопичення випадкових похибок непрямих вимірювань, дисперсію $S^2(y) = \delta^2(y)$ можна виразити наступним чином :

$$S^2(y) = \delta^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)_{x_i = \bar{x}_i}^2 \cdot S^2(\bar{x}_i) . \quad (1.3.9.)$$

Отже, розв'язок задачі полягає у визначенні дисперсії $S^2(\bar{x}_i) = \delta^2(\bar{x}_i)$. Оскільки нам відомі тільки значення $S(\bar{y})$ та $\partial f / \partial x_i$, то безпосередньо із рівняння (1.3.9) ці дисперсії визначити не можна. Тому будемо вважати, що всі похибки непрямих вимірювань рівні, тобто:

$$\frac{\partial f}{\partial x_1} S(\bar{x}_1) = \frac{\partial f}{\partial x_2} S(\bar{x}_2) = \dots = \frac{\partial f}{\partial x_n} S(\bar{x}_n) . \quad (1.3.10)$$

Тоді з рівнянь (1.3.9) і (1.3.10) отримаємо:

$$\delta(\bar{x}_i) = \frac{\delta(y)}{\sqrt{k} \frac{\partial f}{\partial x_i}} . \quad (1.3.11)$$

Через те що похибки вимірювань підлягають нормальному закону розподілу, то з ймовірністю $\alpha=0,95$, $u_{1-\alpha} = u_{0,05} \approx 2$.

Вираз для випадкової величини (1.3.8) переходить у:

$$\delta_{\text{вун}}(y) = 2S(\bar{y}) = 2\delta(\bar{y}) . \quad (1.3.12)$$

Тепер за конкретними значеннями $\delta(y)$ вибирають вимірювальні прилади відповідного класу точності. Орієнтовно клас точності приладу, тобто допустиму припущену похибку, визначають як:

$$\varepsilon_{xi} = \frac{\delta_{\text{вун}}(y)}{x_i} \cdot 100 . \quad (1.3.13)$$

Тоді з виразів (1.3.12) і (1.3.13) знаходимо:

$$\delta(\bar{y}) = S(\bar{y}) = \frac{\varepsilon_{xi} x_i}{200} ; \quad \delta(\bar{y}) = \frac{\varepsilon_{\text{вун}}(y) \bar{y}_i}{200} . \quad (1.3.14)$$

Підставляючи значення (1.3.14) у вираз (1.3.11), отримаємо:

$$\delta(x_i) = \frac{\varepsilon_{\text{вун}}(y) \cdot \bar{y}}{\sqrt{k} \frac{\partial f}{\partial x_i} 200} . \quad (1.3.15)$$

Виходячи із значень (1.3.14), обчислимо величину δ_{xi} і отримаємо основну розрахункову формулу для визначення допустимої припущеної відносної похибки вимірюваної величини \bar{x}_i :

$$\varepsilon_{xi} = \frac{\varepsilon_{\text{вун}}(y) \cdot \bar{y}}{\sqrt{k} \frac{\partial f}{\partial x_i} 200} . \quad (1.3.16)$$

Для розрахунків максимальної абсолютної похибки вимірюваних величин x_i із рівнянь (1.3.13) і (1.3.14) знаходимо:

$$\delta_{\text{вун}}(x_i) = \frac{\varepsilon_{\text{вун}}(y) \cdot \bar{y}}{\sqrt{k} \frac{\partial f}{\partial x_i} 100} . \quad (1.3.17)$$

1.4. Аналітичні та графічні методи обробки дослідних даних

При обробці експериментальних даних широко застосовують чисельні аналітичні та графічні методи. Сукупність отриманих експериментальних даних можна описати за допомогою емпіричних формул, параметри яких не мають фізичного змісту. Як правило, ці формули справедливі на певному, вказаному експериментатором, інтервалі вимірювань змінної величини. Однак знаходження емпіричних формул досить громіздке завдання. Підбір формул для аналітичного опису дослідних даних починається з побудови графіка, на основі якого можна зробити ряд висновків: чи є крива монотонною, чи має максимуми, мінімуми і точки перегину; чи збігається характер кривої з теоретичною залежністю.

Бажано підібрати відповідні координати таким чином, щоб залежність стала лінійною (хоча б на деякому інтервалі). Таке її спрямування дозволяє одночасно отримати емпіричну формулу та визначити її параметри. За допомогою емпіричних формул можна перевірити теоретичні передбачення, а також визначити величини, які принципово не можна отримати дослідним шляхом, але які мають важливе теоретичне і практичне значення. Коли функціональна залежність, що спостерігається, зберігається і за межами розглядуваного інтервалу, в ряді випадків за допомогою графічної екстраполяції можна отримати такі дані, які принципово не можна отримати безпосереднім вимірюванням.

Досить часто виникає необхідність у використанні методів чисельного інтегрування. Найбільш зручний метод чисельного інтегрування, якщо відомі значення підінтегральної функції при рівновідстаючих значеннях аргумента. Тому часто чисельні методи інтегрування доводиться розв'язувати з графічною інтерполяцією. Чисельне інтегрування в ряді випадків найбільш зручно проводити за допомогою формули трапеції або формули Сімпсона.

При використанні формули трапеції криву, яка обмежує шукану площу, замінюють ламаною лінією, проведеною через точки з відомими ординатами. В такому випадку чинять так, щоб ордината відповідала рівновідстаючим абсцисам, і якщо t – крок за

віссю абсцис, то площа смуги від x_i до x_i+t (обмежена зверху не кривою, а прямою), тобто площа трапеції буде дорівнювати:

$$\frac{y(x_i + t) - y(x_i)}{2} = \frac{y_{i+1} - y_i}{2} . \quad (1.4.1)$$

Площу під кривою від x_0 до x_n отримуємо сумуванням площ n трапецій. При цьому формула трапеції має вигляд:

$$\int_a^b f(x)dx \approx t \left(\frac{1}{2} y_0 + y_1 + \dots + \frac{1}{2} y_n \right) . \quad (1.4.2)$$

і задача інтегрування зводиться до сумування ординат. Однак для швидко змінюваних періодичних функцій ця формула практично не застосовна.

При використанні формули Сімпсона кожний відрізок інтегрованої кривої, що проходить через три сусідні ординати, замінюють відрізком параболи $y=a+bx+cx^2$, де a, b, c – постійні, які визначаються за трьома значеннями ординат із системи рівнянь:

$$\begin{cases} y_1 = a + bx_1 + cx_1^2 \\ y_2 = a + bx_2 + cx_2^2 \\ y_3 = a + bx_3 + cx_3^2 \end{cases} \quad (1.4.3)$$

Отримання надійних результатів визначається не тільки високим рівнем експерименту, але і високим рівнем математичної обробки матеріалу з метою отримання максимально достовірної інформації.

Розділ II. Електричні величини і їх вимірювання

2.1. Одиниці вимірювання електричних величин (система СІ)

В інтернаціональній системі одиниць (СІ) базисною електричною величиною є одиниця сили струму. Вона визначається через взаємодію двох провідників зі струмом: 1А - це незмінна в часі сила електричного струму, який, протікаючи у вакуумі по двох прямолінійних нескінченних і паралельних один до одного провідниках дуже малого колового поперечного перерізу, що знаходяться у вакуумі один від одного на відстані 1м, створює електродинамічну силу, яка діє на ці провідники, що дорівнює $2 \cdot 10^{-7}$ Н на кожен метр їх довжини. Величина дії сили досить мала, але вона легко піддається вимірюванню і, крім того, може бути без особливих труднощів збільшена.

В основі такого визначення лежить зафіксований Ампером факт (1820 р.), що два провідники зі струмом діють один на одного з силою, яка змінює свій знак, якщо напрям одного із струмів замінити на зворотній. Ця сила трактується як результат дії магнітного поля, що оточує кожний провідник зі струмом (закон Ерстеда), на рухомі носії заряду в другому провіднику (сила Лоренца).

Одиниці всіх інших електричних величин є похідними одиницями системи СІ (таблиця 2).

Таблиця 2.1. Електричні величини і одиниці їх вимірювання

Величина	Розмірність	Одиниця	Відношення до інших од.СІ
Робота, енергія	$L^2 \cdot M \cdot T^{-2}$	Джоуль (Дж)	$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$
Потужність	$L^2 \cdot M \cdot T^{-3}$	Ватт (Вт)	$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1}$
Електричний заряд	$T \cdot I$	Кулон (Кл)	$1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot \text{с}$
Густина електр. струму	$L^{-2} \cdot I$	Ампер на м.кв. ($\text{А} \cdot \text{м}^2$)	$1 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} = 1 \text{ Кл} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$
Густина заряду	$L^{-3} \cdot T \cdot I$	Кулон на м.куб. ($\text{Кл} \cdot \text{м}^{-3}$)	$1 \text{ Кл} \cdot \text{м}^{-3} = 1 \text{ А} \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-3}$

Електричний потенціал ЕРС, напруга	$L^2 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-1}$	Вольт (В)	$1В = 1В \cdot A^{-1}$
Напруженість електр. поля	$L \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-1}$	Вольт на м. ($В \cdot м^{-1}$)	$1В \cdot м^{-1} = 1В \cdot A^{-1} \cdot м^{-1}$
Електрична індукція	$L^{-2} \cdot T \cdot I$	Кулон на м. кв. ($Кл \cdot м^{-2}$)	$1Кл \cdot м^{-2} = 1А \cdot с \cdot м^{-2}$
Електрична ємність	$L^{-2} \cdot M^{-1} \cdot T^4 I^2$	Фарада (Ф)	$1Ф = 1Кл \cdot В^{-1}$
Електричний опір	$L^2 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-2}$	Ом (Ом)	$1Ом = 1В \cdot A^{-1}$
Питомий ел. опір	$L^3 \cdot M \cdot T^{-3} \cdot I^{-2}$	Ом·м	$1Ом \cdot м = 1В \cdot A^{-1} \cdot м$
Електрична провідність	$L^{-2} \cdot M^{-1} \cdot T^3 \cdot I^2$	Сименс (См)	$1См = 1Ом^{-1}$
Магнітна індукція	$MT^{-2} \cdot I^{-1}$	Тесла (Тл)	$1Тл = 1Вб \cdot м^{-2}$
Магнітний потік	$L^2 \cdot M \cdot T^{-2} \cdot I^{-1}$	Вебер (Вб)	$1Вб = 1В \cdot с$
Намагніченість	$L^{-1} \cdot I$	Ампер на м. ($А \cdot м^{-1}$)	$1А \cdot м^{-1} = 1Кл \cdot с^{-1} \cdot м^{-1}$
Індуктивність	$L^2 \cdot M \cdot T^{-2} \cdot I^{-2}$	Генрі (Гн)	$1Гн = 1Вб \cdot A^{-1}$

2.2. Прилади для вимірювання електричних величин

Природа наділила людину органами чуття, які сприймають навколишній світ в обмеженій фізичній області. Вивчення закономірностей розвитку світу та законів трансформації матерії з одного виду в інший поставили людину перед потребою у створенні штучних пристроїв, які розширили б межі її сприйняття. Такими пристроями є прилади, які допомагають спостерігати, вимірювати, обробляти і перетворювати інформацію, передавати її на відстань із метою впливу на об'єкти досліджень, для управління і регулювання процесами. Прилад – посередник між людиною і природою, людиною і технікою, між природними чи технічними об'єктами та іншими технічними пристроями.

Прилади класифікують за тією чи іншою ознакою. Ми будемо розглядати прилади за їх функціональними ознаками.

Вимірювальним приладом будемо вважати пристрій, який дозволяє кількісно оцінити, порівняти вимірювану величину з еталоном з деякою точністю. Принцип дії таких пристроїв залежить

від фізичної природи вимірюваної величини. В курсі вивчення розділу “Електрика і магнетизм” для вимірювання фізичних величин використовують електровимірювальні прилади.

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

У приладах безпосередньої оцінки вимірювана величина визначається стрілочним 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 із відомою однорідною величиною.

Для вимірювання електричних величин у приладах безпосередньої оцінки використовують фізичні явища, на основі яких створюються обертальний момент і наступне переміщення рухливої системи приладу. Обертальний момент утворюється внаслідок взаємодії постійного магніту і струму в котушці, магнітного поля котушки зі струмом і феромагнетиком, взаємодії магнітних полів котушок із струмами, взаємодії заряджених тіл. Залежно від використовуваного в приладі принципу взаємодії розрізняють такі системи електровимірювальних приладів: магнітоелектричну, електромагнітну, електродинамічну, індукційну, електростатичну, термоелектричну, детекторну, вібраційну. Прилади різних систем реагують на різні значення вимірюваної величини (середні, діючі, амплітудні і т.д.).

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

Чутливістю електровимірювальних приладів називають фізичну величину, яка вимірюється відношенням лінійного або кутового зміщення покажчика приладу $\Delta\alpha$ до зміни вимірюваної величини Δx , яка зумовила це зміщення:

$$S = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x} . \quad (2.2.1)$$

Величина $C = 1/S$, обернена до чутливості, дістала назву ціни поділки приладу.

Для характеристики точності електровимірювальних приладів використовують так звані зведені похибки:

$$\gamma_{зв} = \left(\frac{\pm \Delta x}{x_n} \right) \cdot 100\% , \quad (2.2.2)$$

де Δx — абсолютна похибка вимірюваної величини; x_n — верхня межа вимірювань (шкали) приладу (його номінальне значення).

Електровимірювальні прилади відповідно до величини їх зведеної похибки поділяються на вісім класів точності: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. За покажчиком класу точності, нанесеним на шкалу вимірювального приладу, визначають абсолютну похибку вимірювання:

$$\Delta x = \frac{\gamma_{зв} \cdot x_n}{100} . \quad (2.2.3.)$$

Прилади класів точності 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 використовуються головним чином для точних лабораторних вимірювань і називаються прецизійними, прилади класів 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 мають назву технічних.

Прилади магнітоелектричної системи складаються з двох основних частин: постійного магніту і котушки, що має вигляд рамки. Принцип дії цих приладів заснований на взаємодії сильного

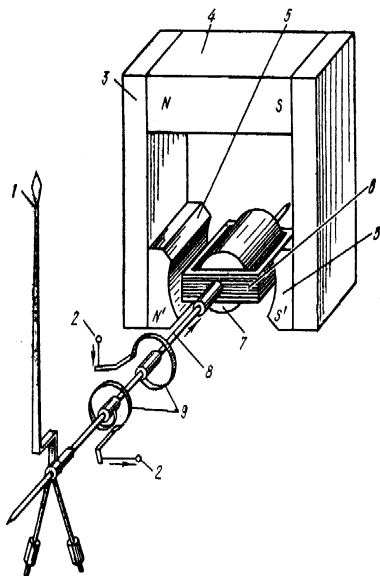


Рис.2.2.1.

магнітного поля постійного магніту зі слабким магнітним полем рамки, по якій проходить вимірюваний струм. Схему струмовимірювача магнітоелектричної системи зображено на рис. 2.2.1. Магнітна система вимірювального механізму складається з сильного постійного магніту 4 з висококоерцитивної сталі, магнітопроводу 3, полюсних наконечників 5 і нерухомого осердя 7. Магнітопровід, полюсні наконечники і осердя виготовляються з м'яких магнітних матеріалів. Полюсні, наконечники і циліндр дають змогу в малій щілині між ними дістати однорідне радіальне магнітне поле. Між полюсними наконечниками і осердям розміщується рухома рамка (катушка) 6, що є легеньким алюмінієвим каркасом прямокутної форми, на який намотано тонкий мідний або алюмінієвий дріт діаметром від 0,03 до 0,2 мм. За рамкою з обох боків скріплені півосі 8. Ця система забезпечує вільне обертання рамки навколо осердя, а отже, і відхилення скріпленої з нею стрілки 1 відносно шкали. Струм до рамки підводиться через затискачі 2 і дві спіральні пружини 9, які створюють протидіючий момент. При проходженні струму I через рамку на неї діє обертальний момент:

$$\vec{M}_1 = [\vec{p}_m \times \vec{B}]; \quad M_1 = nISB \sin \alpha = K_1 I, \quad (2.2.4)$$

де $p_m = nIS$ - магнітний момент струму; α - кут між \vec{p}_m і \vec{B} , у цьому випадку дорівнює $\frac{\pi}{2}$; n - кількість витків рамки; B - магнітна індукція; S - площа рамки; K_1 - коефіцієнт пропорційності. Цей момент зрівноважується протидіючим моментом деформації спіральних пружин при повертанні рамки на кут φ , тобто:

$$M_2 = K_2 \varphi, \quad (2.2.5)$$

де K_2 - стала деформації крутіння пружини. Якщо $M_1 = M_2$, стрілка струмовимірювача фіксується на якійсь поділці шкали. Тоді $K_1 I = K_2 \varphi$, звідки:

$$\varphi = \frac{K_1}{K_2} I = KI. \quad (2.2.6)$$

Отже, кут повороту рамки пропорційний силі струму. Коефіцієнт пропорційності K залежить від конструкції приладу.

З рівняння (2.2.6) безпосередньо випливає, що амперметр магнітоелектричної системи придатний для вимірювань тільки постійного струму і його шкала є рівномірною. Чутливість приладів цієї системи підвищується при збільшенні K_1 і зменшенні K_2 .

Перевагами магнітоелектричних приладів є: висока чутливість (відомі мікроамперметри зі струмом повного відхилення 0,01 мкА); можливість виготовлення високоточних приладів (класів точності 0,05; 0,1; 0,2); мале споживання електричної енергії (10^{-5} — 10^{-6} Вт у рамках і до кількох десятків вата разом із вимірювальною схемою).

Недоліки цих приладів: порівняно складна будова, чутливість до перевантажень, можливість вимірювання тільки постійних струмів. Завдяки високій чутливості магнітоелектрична система використовується для побудови гальванометрів.

Гальванометрами називають високочутливі прилади, які мають неградуйовану шкалу. Ціна поділки шкали визначається експериментально або за паспортом приладу. Діапазон вимірюваних струмів досить широкий: від 10^{-5} до 10^{-11} А. Найбільш поширеними є гальванометри магнітоелектричної системи з рухливою рамкою, наприклад, типу М 21 (рис. 2.2.2). Безкаркасна рамка 4 підвішена на пружній нитці 3. Струм I подається через металеву стрічку 1 і підвіс 3. Кут повороту рамки вимірюється оптичним методом за допомогою дзеркальця 2 і шкали. На дзеркальце від лампи спрямовують вузький світловий пучок, який після відбивання падає на шкалу з міліметровими поділками у вигляді світлового "зайчика". Шкала встановлюється на відстані 1-2 м від дзеркальця паралельно йому. При повертанні рамки і дзеркальця "зайчик" переміщується вздовж шкали.

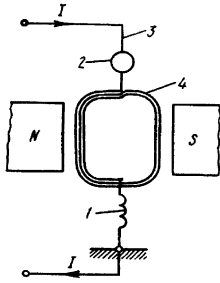


Рис.2.2.2.

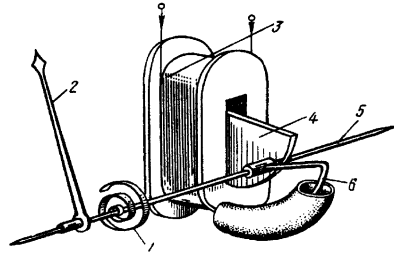


Рис.2.2.3.

Прилади електромагнітної системи складаються з плоскої або круглої нерухомої котушки, на яку намотаний мідний провід, і рухливого осердя, виготовленого з м'яких магнітних матеріалів (електротехнічна сталь, пермалой). Принцип дії приладів цієї системи заснований на взаємодії магнітного поля котушки, по якій проходить струм, із рухливим феромагнітним осердям (рис. 2.2.3). Вимірюваний струм I , що проходить по

котушці 3, створює магнітне поле. В це поле втягується осердя у вигляді сталевий пластинки 4, закріпленої на осі 5. Намагніченість осердя і саме магнітне поле котушки пропорційні струму, отже, обертальний момент пропорційний квадрату струму:

$$M_1 = k_1 I^2 \quad (2.2.7)$$

де k_1 — коефіцієнт пропорційності, який залежить від конструкції приладу.

Протидіючий момент M_2

створюється пружиною 1. Він пропорційний куту повороту рухливої частини приладу:

$$M_2 = k_2 \varphi, \quad (2.2.8)$$

де k_2 — коефіцієнт пропорційності, який залежить від пружних властивостей пружини.

Для швидкого заспокоєння рухливої частини приладу і стрілки 2 застосовують повітряні демпфери (заспокоювачі б).

Демпфер — це камера, в якій рухається алюмінієвий поршень. При повороті осердя поршень зазнає опору повітря.

Рівновага рухливої частини приладу визначається рівністю протилежно напрямлених моментів: $M_1 = M_2$. Звідси $\phi = k I^2$, де $k = k_1/k_2$. Отже, шкала електромагнітного приладу нерівномірна, квадратична. Із зміною напрямку струму змінюється як напрям магнітного поля, так і намагніченість осердя. Отже, прилади цієї системи застосовуються для вимірювань постійного і змінного струмів. В останньому випадку вони реагують на діюче значення змінного струму. Їх використовують також для вимірювання напруги в електричному колі. Завдяки простоті конструкції, механічній міцності і стійкості до перевантажень прилади широко застосовують у техніці. Недоліки приладів електромагнітної системи: осердя, менша точність порівняно з магнітоелектричними приладами, залежність показів від зовнішніх магнітних полів (через малі власні магнітні поля котушки). Для зменшення впливу зовнішніх магнітних полів прилади покривають металевими кожухами або виготовляють астатичними (з двома котушками, ввімкненими послідовно; напрям обмоток і струмів задається таким, що їхні магнітні потоки стають однаковими за величиною і протилежними за напрямом).

Прилади електродинамічної системи характеризуються тим, що їхня дія ґрунтується на взаємодії магнітних полів двох котушок (рухомої і нерухомої) із вимірюваним струмом. Одна із взаємодіючих котушок (рис. 2.2.4) 5 нерухома і складається з двох послідовно з'єднаних котушок, між якими є щілина. В ній розміщується вісь обертання рухомої безкаркасної котушки 4, з віссю скріплена стрілка-показчик 3 з алюмінієвою пластинкою повітряного демпфера 1. На осі також закріплені ізольовані кінці двох спіральних пружин 2, які призначені для підведення вимірюваної сили струму і створення протидіючого моменту. Власне магнітне поле котушок мале, тому для захисту їх від впливу зовнішніх полів застосовують екранування або прилади виготовляють астатичними.

Котушки в приладах електродинамічної системи залежно від їх призначення з'єднуються послідовно або паралельно. Якщо

катушки приладу з'єднати паралельно, то його можна використовувати як амперметр (нерухома катушка при цьому виконує роль шунта). Якщо обидві катушки з'єднати послідовно і приєднати до них послідовно додатковий опір, то прилад може використовуватись як вольтметр. У ватметрах нерухома катушка вмикається в коло струму послідовно, а рухома катушка з додатковим опором - паралельно споживачам енергії.

У першому наближенні обертальний момент M_1 при взаємодії катушок пропорційний струмам у них I_1 і I_2 :

$$M_1 = k_1 I_1 I_2, \quad (2.2.9)$$

де k_1 - коефіцієнт пропорційності, який залежить від конструкції і розміщення катушок. Протидіючий момент M_2 створюється пружинами. Він пропорційний куту повороту катушки:

$$M_2 = k_2 \varphi, \quad (2.2.10)$$

де k_2 — коефіцієнт пропорційності, який залежить від пружних властивостей пружин.

Якщо $M_1 = M_2$, то стрілка-показчик приладу стане в положення рівноваги. Позначивши k_1/k_2 через k_1 , матимемо:

$$\varphi = k I_1 I_2. \quad (2.2.11)$$

Якщо катушки з'єднати послідовно, то $\varphi = k I^2$. Отже, шкала приладу нерівномірна. Добором конструкції катушок можна зменшити нерівномірність шкали.

Прилади електродинамічної системи мають свої переваги: їх можна застосовувати для вимірювань у колах постійного і змінного струмів, характеризуються вони високою точністю, зумовленою відсутністю в катушках металевих частин. Недоліки приладів цієї системи: низька чутливість, вплив зовнішніх магнітних полів на точність показів приладу, чутливість до перевантажень, нерівномірність шкали (крім ватметра).

Прилади індукційної системи характеризуються тим, що принцип їхньої дії ґрунтується на взаємодії вихрових індукційних струмів у рухомій частині приладу (алюмінієвий диск, насаджений на вертикальну вісь) із змінними магнітними потоками нерухомих електромагнітів (один із електромагнітів має обмотку з товстого ізолюваного дроту, яка є обмоткою струму і вмикається в коло послідовно з навантаженням; другий електромагніт має обмотку з

тонкого ізолюваного дроту, яка є обмоткою напруги і вмикається в коло паралельно навантаженню). Серед приладів індукційної системи широке застосування мають лічильники електричної енергії змінного струму.

Прилади електростатичної системи побудовані на принципі взаємодії рухомих і нерухомих електрично заряджених пластин. У всіх електростатичних механізмах при переміщенні рухомої частини змінюється електроємність між пластинами внаслідок зміни їх активної площі або відстані між ними. Електростатичні прилади використовуються головним чином для вимірювання напруги в колах постійного і змінного струмів у широкому діапазоні частот. Наприклад, вітчизняні лабораторні електростатичні вольтметри С 95 класу 1,5 мають межі вимірювання від 30 В до 3 кВ. Покази їх при частоті 10 МГц відрізняються від показів при постійному струмі не більш як на 1,5%.

Прилади електронної системи (електронні вольтметри) є поєднанням вимірювальної схеми, яка містить напівпровідникові прилади, і вимірювального механізму магнітоелектричної або електростатичної системи. Прилади електронної системи використовуються для вимірювання в радіоелектронних схемах напруг і частот значних діапазонів. Для них характерні великі вхідні опори (1-10 МОм і більше), тому їх широко застосовують для вимірювання напруги високоомних малопотужних джерел.

Цифрові прилад, невідому величину, що вимірюється, визначають у дискретно-цифровій формі за допомогою цифрових індикаторів. Цифрові прилади мають ряд переваг над звичайними, основні з яких: висока точність і швидкість вимірювання, об'єктивність і повна автоматизація процесу вимірювання, можливість передачі результатів на відстані тощо. Поряд із цим є і певні недоліки: складність схеми, порівняно великі габарити, менша надійність, ніж звичайних. Найбільш поширеними цифровими приладами є цифрові вольтметри.

Універсальні цифрові вольтметри призначені для автоматичного вимірювання сталої і змінної напруг, струму та активних опорів. Широко застосовуються в електроніці, для

наукових, ремонтних і регламентних робіт та для перевірки приладів нижчого класу точності.

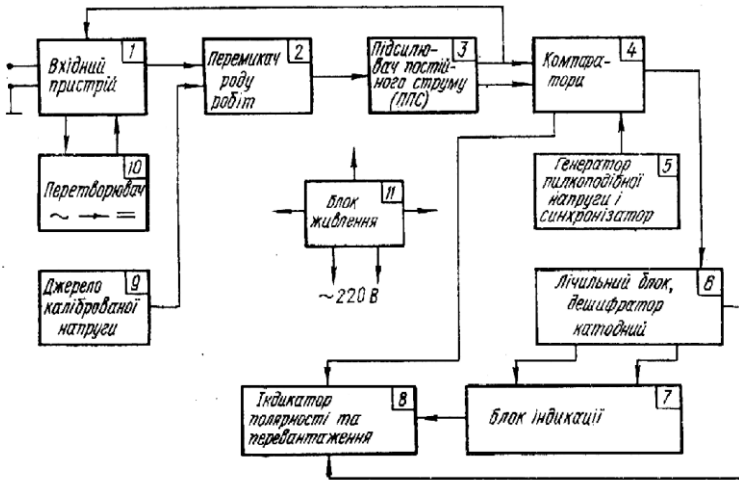




Рис. 2.5

Спрощену структурну схему універсального цифрового вольтметра зображено на рис. 2.5. Вимірювана напруга постійного або змінного струму подається на вхідні гнізда пристрою 1. У вхідному пристрої постійна напруга за допомогою дільника доводиться до номінального значення (наприклад, для вольтметра В7-16 до 1 В; ВК7—ЮА (1 до 10 В), а далі надходить на вхід підсилювача постійного струму 3 (ППС). Змінна напруга доводиться до номінального значення, перетворюється на постійну (блок 10) і надходить до ППС. Перемикач роду робіт 2 ставиться в положення, що відповідає вимірюваній величині. Сигнал із гнізда для вимірювання активного опору R безпосередньо передається на вхід блока ППС. Вимірювання опору здійснюється шляхом перетворення R у пропорційну напругу постійного струму. Сигнали із ППС подаються до блока 4, що складається з двох компараторів (сигнального та нульового), кожний з яких має два входи. На перші входи компараторів подається пілкоподібна напруга з блока 5, на другий вхід сигнального компаратора подається вихідна напруга з блоків ППС (другий вхід нульового компаратора заземлений). У

компараторі також формується імпульс, який подається до лічильного блока 6. Імпульси з блока 6 надходять через спеціальний пристрій до блока індикації 7, на якому зосереджується кінцева інформація.

Таблиця 2.2. Умовні позначення на шкалах електровимірювальних приладів

Позначення принципу дії приладу	Умовне позначення
Магнітоелектричний із рухомою рамкою	
Магнітоелектричний із рухомим магнітом	
Логометр магнітоелектричний	
Електромагнітний	
Електродинамічний	
Індукційний	
Вібраційний	
Електростатичний	
Додаткові позначення	
Термоперетворювач неізований	
Термоперетворювач ізольований	
Перетворювач електронний у вимірювальному колі	

Випрямлювач напівпровідниковий	
Напруга випробувальна 500 В	
Напруга випробувальна, більша за 500 В, наприклад, 2 кВ	
Посилання на відповідний документ	
Резистор	
Екран електростатичний	
Екран магнітний	
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 %	1,5
Струм змінний однофазний	
Струм постійний	
Струм постійний і змінний	
Струм трифазний змінний	
Горизонтальне положення приладу	
Вертикальне положення приладу	
Положення приладу під кутом 60°	

Полярність постійної напруги, яка вимірюється, визначається знаком "+" або "-", який засвічується на лицьовій панелі приладу (блок 8).

При переході на вимірювання змінного струму засвічується знак "≈". При перевищуванні вимірюваною величиною межі вимірювання засвічується знак перевантаження "П". Залежно від положення перемикача "Рід роботи" на блоці індикації 8 відповідно висвічується розмірність фізичної величини, наприклад: mV, V, Ω.

Блок 9 використовується для контрольних перевірок готовності цифрового вольтметра до проведення відповідних вимірювань. Блок живлення II виробляє ряд напруг і забезпечує нормальну роботу всіх вузлів приладу.

Для правильної і ефективної організації електричних вимірювань слід передусім докладно ознайомитись з основними характеристиками електровимірювальних приладів на їхніх шкалах.

Розділ III. Лабораторні роботи змістового модуля "Електростатика. Постійний струм."

3.1. Дослідження електростатичного поля

Тема: Дослідження електростатичного поля.

Мета: Розглянути картину розподілу силових ліній електричних полів. Визначити основні характеристики електростатичного поля.

Обладнання: випрямлювач типу ВС-12, набір електродів різної форми, вольтметр типу Є515(1,5-15В), реостат, гальванометр.

Теоретичні відомості

Електричні поля, які не змінюються з часом і створюються нерухомими зарядженими частинками, називаються електростатичними. Основними характеристиками електростатичного поля є векторна величина \vec{E} – напруженість поля і скалярна величина φ – потенціал. Напруженість \vec{E} електричного поля є кількісною характеристикою силової дії поля на заряджені тіла і частинки. Напруженість електричного поля – це фізична величина, яка чисельно дорівнює силі, що діє з боку поля на нерухомий одиничний точковий заряд, розміщений у розглядуваній точці поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}, \quad (3.1.1)$$

де q_0 -пробний заряд, поміщений в поле.

Пробний заряд повинен бути настільки малим, щоб його внесення в поле не призводило до змін і перерозподілу в просторі електричних зарядів.

Якщо поле у вакуумі створюється точковим зарядом q , то напруженість поля дорівнює :

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^3} \vec{r}, \quad (3.1.2),$$

де r - радіус вектор, проведений у розглядувану точку із точки O , де знаходиться заряд q .

Для наочного зображення електростатичних полів використовуються силові лінії (лінії напруженості електричного поля). Силowymi лініями називаються лінії, дотична в кожній точці яких співпадає з напрямом вектора напруженості. Якщо поле створюється сукупністю електричних зарядів - q_1, q_2, \dots, q_n , що знаходяться у вакуумі, то результуючий вектор напруженості обчислюється за принципом суперпозиції (принцип незалежності дії електричних полів):

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i . \quad (3.1.3)$$

Енергетичною характеристикою поля служить потенціал. Потенціалом електростатичного поля називається фізична величина, яка дорівнює потенціальній енергії пробного одиничного точкового електричного заряду, розміщеного в розглядуваній точці поля:

$$\varphi = \frac{W_n}{q_0} . \quad (3.1.4).$$

Потенціал поля точкового заряду:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} . \quad (3.1.5).$$

При накладанні електростатичних полів результуючий потенціал дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів полів, створених зарядами q_1, q_2, \dots, q_n :

$$\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi_i . \quad (3.1.6).$$

Сила, що діє з боку електростатичного поля на внесений у нього пробний заряд q_0 , і потенціальна енергія дорівнюють:

$$\vec{F} = q_0 \vec{E}, \quad W_n = q_0 \varphi \quad (3.1.7)$$

З іншого боку $\vec{F} = -\text{grad}W_n = -\frac{dW_n}{dn} \vec{n}$. Через те що заряд q не залежить від координат точок поля, то :

$$q_0 \vec{E} = -\vec{\text{grad}}(q_0 \varphi), \quad (3.1.8)$$

$$q_0 \vec{E} = -q_0 \vec{\text{grad}}\varphi \quad (3.1.9)$$

Після відповідних математичних перетворень отримаємо:

$$\vec{E} = -\vec{\text{grad}}\varphi = -\frac{d\varphi}{dn} \vec{n} \quad (3.1.10)$$

У кожній точці поля проекція вектора \vec{E} на координатні осі повзв'язана з частинними похідними від потенціалу за цими координатами співвідношенням:

$$E_x = -\frac{d\varphi}{dx}; E_y = -\frac{d\varphi}{dy}; E_z = -\frac{d\varphi}{dz} \quad (3.1.11).$$

У загальному випадку проекція вектора напруженості електростатичного поля на довільно вибраний напрям дорівнює швидкості зменшення потенціалу поля на одиницю довжини в цьому напрямку:

$$E_l = -\frac{d\varphi}{dl} \quad (3.1.12).$$

Геометричне місце точок електростатичного поля, в яких значення потенціалу однакове, називається еквіпотенціальною поверхнею. Для цієї поверхні $E_l=0$, тобто $d\vec{r} \perp \vec{E}$, отже, еквіпотенціальні поверхні ортогональні до ліній напруженості. При переміщенні заряду вздовж такої поверхні робота сил електростатичного поля дорівнює 0.

Ортогональність силових ліній і поверхонь рівного потенціалу полегшує експериментальне і теоретичне вивчення електростатичного поля. В основу вивчення розподілу потенціалів в електростатичному полі покладений так званий метод

зондування. Його суть полягає в тому, що в досліджувану точку поля вводиться спеціальний додатковий електрод-зонд, який мінімально порушує своїм існуванням досліджуване поле. Цей зонд з'єднується провідником із приладом, що вимірює набутий зондом у полі потенціал відносно нульової точки. При цьому забезпечуються такі умови, щоб зонд набув потенціалу тієї точки поля, в якій розміщений. Тільки тоді покази приладу, з'єданого з зондом, будуть давати правильну картину розподілу потенціалів у досліджуваному полі.

Найчастіше електростатичні поля вивчають шляхом штучного відтворення їх структури в провідних середовищах, по яких пропускають постійний струм. Заміна вивчення поля нерухомих зарядів вивченням поля стаціонарного струму дає великі експериментальні можливості:

а) вводячи в провідне середовище прості металеві електроди, автоматично отримуємо вирівнювання потенціалів зонда і тієї точки поля, в яку введено зонд;

б) зонди можна з'єднати зі струмовимірними приладами, що значно підвищує якість вимірювання.

Проте слід мати на увазі, що електричне коло зонда повинно мати більший опір, ніж опір провідних шарів речовини між точкою, в яку поміщено зонд, і ближчим електродом. Якщо цієї умови не дотримуватися, то це приводить до спотворення розподілу потенціалів у досліджуваному колі.

Опис експериментальної установки

У ванну, зроблену з електроізоляційного матеріалу (наприклад, оргскла) поміщають металеві електроди А і В, поле між якими потрібно вивчити. Ванну заповнюють рідким електролітом (можна піском, просоченим розчином електроліту), провідність якого мала порівняно з металом. Електроди опираються на дно ванни і підносяться над поверхнею електроліту. Напруга на електроди подається від потенціометра R , увімкненого на виході випрямлювача B (див. рис. 3.1). У вимірну частину схеми входить зонд Z , нуль-гальванометр G і вольтметр V .

Перемішуючи повзунок на потенціометрі R , можна задавати різні значення потенціалу відносно електродів, поміщених у ванну.

Наявність чи відсутність струму в колі гальванометра залежить від того, в якій точці поля знаходиться зонд. Якщо він знаходиться в точці поля, потенціал якої дорівнює потенціалу, встановленому на повзунку подільника, то струму в колі зонду і гальванометра не буде.

Геометричне місце точок, для яких в колі гальванометра струм дорівнює нулю (при даному положенні повзунка на подільнику), утворює еквіпотенціальну поверхню в досліджуваному полі. Для вимірювання потенціалу цієї поверхні (відносно електродів, поміщених у ванну) служить вольтметр, увімкнений між повзунком і одним із електродів.

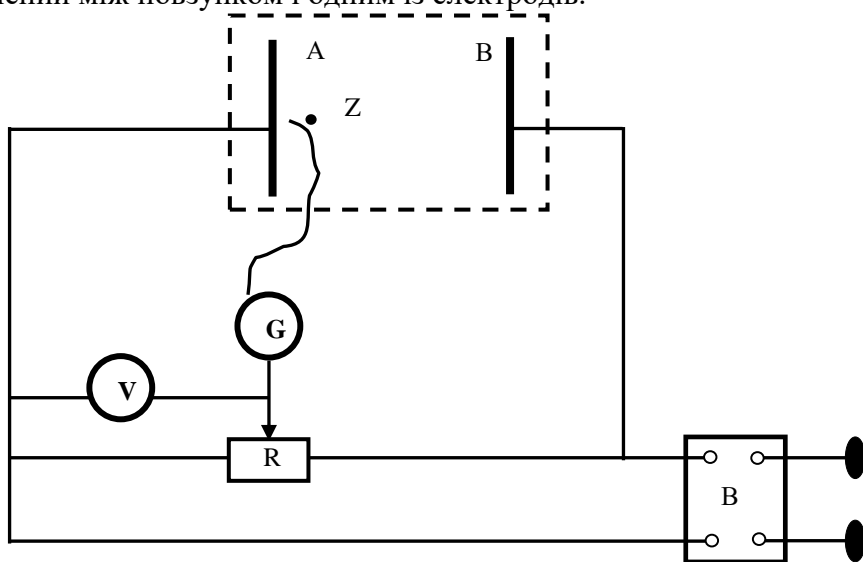


Рис.3.1 . Схема експериментальної установки.

Процес вивчення досліджуваного поля зводиться до наступного: переміщуючи повзунок на подільнику напруги, надають різні значення потенціалу. Для кожного встановленого на повзунку значення потенціал знаходять шляхом переміщення зонда у ванні у відповідну еквіпотенціальну поверхню досліджуваного поля.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричне коло експериментальної установки з плоскими електродами. Помістити зонд поблизу одного з

електродів, повзунок на подільнику встановити поблизу того кінця реостата подільника, до якого приєднано цей електрод. Увімкнути живлення установки. Дослідити зондом і замалювати еквіпотенціальні поверхні поля між електродами. При всіх вимірюваннях особливо детально дослідити зондом усі ділянки сильних неоднорідностей у полі, де еквіпотенціальні поверхні побудовані через рівні інтервали напруги, розміщуються особливо густо. За отриманою системою еквіпотенціальних поверхонь побудувати картину силових ліній.

2. Покласти всередину ванни, в досліджуване поле, металевий циліндр і дослідити поле в нових умовах. Отримати картину еквіпотенціальних поверхонь і силових ліній.
3. Дослідити поле циліндричних електродів. Зобразити картину еквіпотенціальних поверхонь і силових ліній.
4. Помістити у ванну систему двох коаксіальних електродів і дослідити поле в просторі між ними. Отримати картину еквіпотенціальних поверхонь і силових ліній. Побудувати графіки розподілу потенціалу в полі між електродом у залежності від відстані до осі внутрішнього електрода.

Контрольні питання

1. Якими параметрами характеризується електростатичне поле і які їх одиниці вимірювання в системі СІ?
2. Який взаємозв'язок існує між ними у випадку однорідного і неоднорідного поля?
3. Які експериментальні методи існують для вивчення електростатичного поля? В чому складність електростатичних вимірювань?
4. Як створюється модель електростатичного поля в цій лабораторній роботі?
5. Як впливає на електростатичне поле внесення в нього металевих і діелектричних тіл ?
6. У чому полягає принцип суперпозиції полів?

Задачі для самопідготовки

1. Тонкий стержень довжиною $l=15$ см рівномірно заряджений зарядом $q = 4 \cdot 10^{-9}$ Кл. Знайти напруженість поля і потенціал у точці, що лежить на осі стержня. Відстань від ближнього кінця

стержня до цієї точки $x=10$ см. Визначити, при якому найменшому значенні $\frac{x}{l}$ напруженість можна розраховувати за формулою поля точкового заряду, якщо відносна похибка не перевищує 7%.

2. Додатній заряд Q рівномірно розподілений по тонкому дротяному кільцю радіусом R . Визначити напруженість поля і потенціал у точці, яке лежить на вісі кільця на відстані z від його центру. Чи зміняться значення цих величин, якщо порушиться рівномірний розподіл заряду вздовж кільця?

Методичні поради

Теоретичний матеріал цієї лабораторної роботи можна використати при вивченні тем "Напруженість електричного поля", "Потенціал електричного поля", "Зв'язок між напруженістю поля та потенціалом" у курсі фізики 10 класу. Експериментальну частину лабораторної роботи при проведенні фронтального або демонстраційного експерименту при вивченні еквіпотенціальних поверхонь, а також як роботу фізичного практикуму.

3.2. Визначення заряду краплини рідини

Тема: Визначення заряду краплини рідини.

Мета: Визначити заряд краплини q . Показати, що заряд краплини кратний елементарному заряду e .

Обладнання: експериментальна установка (опис див. у роботі), випрямлювач напругою 300 В, вольтметр.

Теоретичні відомості

Визначення величини елементарного заряду може бути проведено за допомогою цілого ряду методів: а) вимірювання заряду певного числа однакових заряджених частинок; б) статистичною обробкою результатів спостереження шротт-ефекту (дробовий шум в електронних лампах); в) із спостережень дифракції на кристалі рентгенівських променів відомої довжини хвилі; г) із вимірювань швидкості переміщення заряджених мікроскопічних частинок в однорідному електричному полі.

Останній метод є найбільш прямим і переконливим доказом дискретності електричних зарядів. В основу цього методу покладено вивчення руху заряджених краплин рідини (масла) в однорідному електричному полі відомої напруженості.

Вимірюючи швидкість краплин, що падають у полі сили тяжіння (при відсутності електричного поля), і швидкості краплин, що піднімаються в полі сил тяжіння при наявності електричного поля, можна обчислити діючу на краплину силу електричного поля. Потім, знаючи величину напруженості поля, неважко визначити заряд краплини.

Вимірювання елементарного заряду цим способом і доказ дискретності електричного заряду були проведені в класичних дослідах Р. Міллікена в 1914-1916 рр.

При виконанні такого завдання необхідно звернути увагу на вивчення методу і на доведення дискретності зарядів.

До мікроскопічних краплин рідини, що рухаються в повітрі, можна застосувати закон Стокса, згідно з яким сила опору повітря:

$$F = 6\pi\eta v_g a, \quad (3.2.1)$$

де η – коефіцієнт внутрішнього тертя повітря, v_g – швидкість падіння краплин, a – радіус краплини. При рівномірному падіння краплини в полі сили тяжіння рівнодіяна сили тяжіння, Архімеда, Стокса дорівнює нулю:

$$\frac{4}{3}\pi a^3 \rho_n g - \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_p g - 6\pi\eta a v_g = 0. \quad (3.2.2)$$

Тут ρ_p , ρ_n – густина рідини і повітря, g – прискорення вільного падіння.

Якщо заряджена краплина піднімається в однорідному електричному полі з постійною швидкістю, то для рівнодіяної всіх сил отримаємо:

$$qE_n + \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_n g - \frac{4}{3}\pi a^3 \rho_p g - 6\pi\eta a v_E = 0, \quad (3.2.3)$$

де E – напруженість електричного поля, q – заряд краплини, v_E – швидкість підйому краплини.

У цих рівняннях усі величини, за винятком заряду краплини q і її радіуса a , можна безпосередньо виміряти. Виключаючи з

рівнянь (3.2.2) і (3.2.3) радіус краплини a , знаходимо вираз для величини заряду:

$$q = \frac{9\sqrt{2}\pi\eta^{\frac{3}{2}}}{E(\rho_p - \rho_n)^{\frac{1}{2}}g^{\frac{1}{2}}} v_g^{\frac{1}{2}}(v_g + v_E). \quad (3.2.4)$$

Порівнюючи величину заряду однієї і тієї ж краплини, отриманої в різних дослідах, можна перекоонатися, що величина зміни заряду і сам заряд краплини являються кратними одній і тій же величині. Цю величину e вважають елементарним зарядом і вона дорівнює $1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Опис експериментальної установки

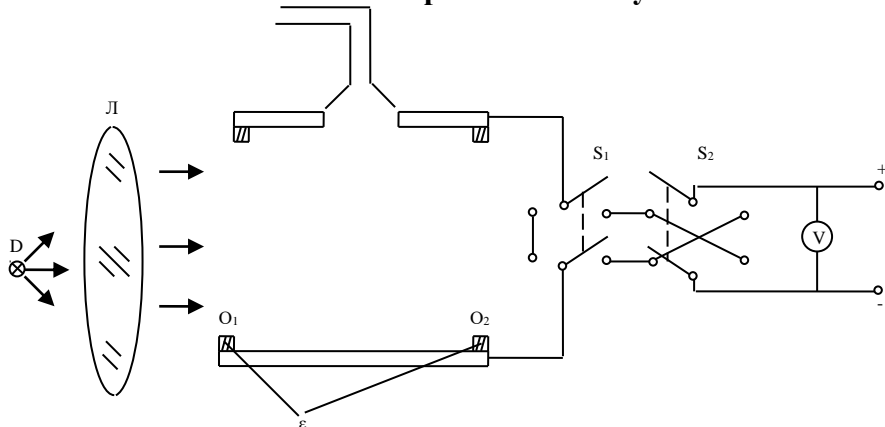


Рис. 3.2.1.

Схему установки показано на рис. 3.2.1. У простір між пластинами конденсатора К через отвір у центрі верхньої пластини за допомогою пульверизатора вводяться краплини масла мікроскопічних розмірів. За їх рухом спостерігають у зорову трубу. Частинки освітлюються пучком світла, що падає перпендикулярно до трубки від джерела D, і спостерігаються в затемненому полі як світлі точки. Для зменшення руху повітря в середині конденсатора простір між пластинами конденсатора обмежено з боків

ебонітовими кільцями Е, що мають три віконця. Два з них (O_1 і O_2) використовуються для проходження через конденсатор світлового пучка, третє, перпендикулярне до перших двох, для спостереження руху краплинок. Різниця потенціалів подається від випрямлювача.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з елементами експериментальної установки, вивчити будову та принцип дії.
2. Користуючись розпилювачем, у простір між пластинками конденсатора ввести мікроскопічні краплини масла. При розпиленні більшість краплин електризується, набуваючи позитивного чи негативного заряду.
3. Переміщуючи трубку, а також, повертаючи конденсор Л, досягти чіткої видимості краплин у вигляді зірочок на темному фоні.
4. Подаючи різницю потенціалів 300 В, забирають краплини, які мають великий заряд, залишаючи краплини з невеликим електричним зарядом.
5. Усі наступні вимірювання проводять при різниці потенціалів 200 -250 В, яку контролюють за допомогою вольтметра.
6. Вибрати певну видиму окрему краплину, яка під дією поля рухається вгору, вимкнути поле за допомогою ключа S, замкнувши конденсатор. При відсутності поля краплина падає вниз (Слід мати на увазі, що зорова труба дає перевернуте зображення, тому спостерігач буде бачити, що при наявності поля краплина рухається вниз при відсутності поля - вгору).
7. Швидкість руху краплини визначають за допомогою секундоміра і проходження краплиною поділок окулярного мікрометра. Потім накладають поле і вимірюють час підйому тією ж краплиною такого ж числа поділок, що і при падінні. Дослід проводиться не менше 15 разів для однієї і тієї ж краплини.
8. Вимірювання потрібно провести не менше ніж для 7 різних краплин, деякі з них повинні мати заряд протилежного знаку (При спостереженні за краплиною, що має заряд протилежного

знаку, потрібно змінити полярність пластин конденсатора за допомогою ключа S_2).

Обробка результатів експерименту

Вважаючи поле в середині конденсатора однорідним, можемо записати, що $E = \frac{U}{d}$, де U – прикладена напруга, d –

відстань між пластинами конденсатора, а швидкість

$$v_g = \frac{nS_0}{t_g}; \quad v_E = \frac{nS_0}{t_E}, \quad \text{де } n \text{ – кількість поділок, } S_0 \text{ - ціна поділки}$$

окулярного мікрометра. Тоді формула (3.2.4) набуває вигляду

$$q = \frac{9\sqrt{2}\pi d \eta^{\frac{3}{2}} n^{\frac{3}{2}} S_0^{\frac{3}{2}}}{U(\rho_p - \rho_n)^{\frac{1}{2}} g^{\frac{1}{2}} t_g^{\frac{1}{2}}} \left(\frac{1}{t_g} + \frac{1}{t_E} \right) \quad (3.2.5)$$

У формулі (3.2.5) величина
$$\frac{9\sqrt{2}\pi d \eta^{\frac{3}{2}} n^{\frac{3}{2}} S_0^{\frac{3}{2}}}{U(\rho_p - \rho_n)^{\frac{1}{2}} g^{\frac{1}{2}}} = K$$
 -

постійна. Тоді

$$q = K \frac{1}{t_g^{\frac{1}{2}}} \left(\frac{1}{t_g} + \frac{1}{t_E} \right) \quad (3.2.6)$$

Отримані дані записати в таблицю.

t_g (с)	t_E (с)	q (Кл)	$\frac{q}{e_0}$

Контрольні питання

1. Який метод використовується у цій роботі для визначення заряду?
2. Записати рівняння руху краплини в полі сили тяжіння і в полі сили тяжіння при наявності електричного поля?
3. Які явища можуть впливати на зміну заряду краплини?
4. Які обмеження накладаються на розміри краплин, чому?

5. Які причини впливають на точність вимірювання заряду краплини?
6. Чому небажані в просторі між пластинами конденсатора краплини з великим зарядом?

Задачі для самопідготовки

1. Електрон переміщується від однієї пластини плоского конденсатора до іншої. Різниця потенціалів між пластинами 300 В; відстань між ними 5 мм. Визначити: а) швидкість, з якою електрон досяг іншої пластини; б) час його руху; в) поверхневу густину заряду на пластинах. (Початкова швидкість електрона мала; залежність маси електрона від швидкості не враховувати)
2. Електрон отримав швидкість $v=10^7$ м/с, спрямовану паралельно пластинам. У момент вильоту із конденсатора напрям швидкості електрона складав 30° із початковим напрямом швидкості. Визначити різницю потенціалів між пластинами, якщо довжина пластин 10 см, а відстань між ними 2 см.

Методичні поради

Матеріал цієї лабораторної роботи може бути використаний у шкільному курсі при вивченні теми "Електричний заряд. Дослід Йоффе–Міллікена" та проведенні лабораторних робіт, фізпрактикуму в класах з поглибленим вивченням фізики.

3.3.Перевірка теореми Остроградського-Гаусса для електростатичного поля

Тема: Перевірка теореми Остроградського – Гауса для електростатичного поля.

Мета: Експериментально перевірити теорему Остроградського-Гаусса і проаналізувати джерела можливих похибок.

Обладнання: джерело постійного струму, ламповий вольтметр, високоомний потенціометр, гальванометр, металевий дисковий електрод, подвійний зонд, електропровідний папір.

Теоретичні відомості

Потік вектора напруженості електричного поля через елемент поверхні ds дорівнює:

$$d\Phi = \vec{E} \cdot d\vec{s} = Eds \cdot \cos(\vec{E}, \vec{n}), \quad (3.3.1).$$

де \vec{n} - одиничний вектор, нормальний до площини ds , а вектор $d\vec{s} = ds \cdot \vec{n}$.

Потік напруженості Φ крізь будь-яку поверхню S дорівнює алгебраїчній сумі напруженості крізь усі малі ділянки цієї поверхні:

$$\Phi = \int_{(s)} \vec{E} d\vec{s} = \int_{(s)} Eds \cos(\vec{E}, \vec{n}) = \int_{(s)} E_n ds. \quad (3.3.2).$$

Розглянемо електростатичне поле точкових зарядів q_1, q_2, \dots, q_n . Згідно з принципом суперпозиції електричних полів:

$$\Phi = \int_{(s)} \vec{E} d\vec{s} = \int_{(s)} \sum_{i=1}^n \vec{E}_i d\vec{s} = \sum_{i=1}^n \int_{(s)} \vec{E}_i d\vec{s} = \sum_{i=1}^n \Phi_i, \quad (3.3.3),$$

тобто результуючий потік дорівнює алгебраїчній сумі через ту ж замкнуту поверхню S напруженостей полів кожного із зарядів системи. Таким чином, потрібно вміти врахувати потік напруженості поля одного точкового заряду q_i . Можливі два випадки:

1. Замкнута поверхня S охоплює заряд q_i .
2. Замкнута поверхня не охоплює цей заряд.

У першому випадку потік $d\Phi_i$ обчислюється як:

$$d\hat{O} = E_i ds_{\perp} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_i}{r_i^2} \cdot (ds_{\perp})_i. \quad (3.3.4)$$

Але оскільки $(ds_{\perp})_i = (ds_{c\phi})_i$, то $\frac{(ds_{c\phi})_i}{r_i^2} = d\omega_i$ - тілесний

кут, отже:

$$d\Phi_i = \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0} d\omega_i . \quad (3.3.5)$$

Інтегруючи вираз (3.3.5) по всій поверхні S , тобто по ω_i від 0 до 4π , отримуємо:

$$\hat{O}_i = \int_0^{4\pi} \frac{q_i d\omega_i}{4\pi\epsilon_0} = \frac{q_i}{\epsilon_0} . \quad (3.3.6)$$

У випадку, коли поверхня не охоплює заряд q_i , потік Φ_i через таку поверхню дорівнює нулю.

В загальному випадку:

$$\Phi = \oint_{(s)} \vec{E} d\vec{s} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\epsilon_0} . \quad (3.3.7).$$

Вираз (3.3.7) є математичним записом теореми Остроградського-Гауса для електростатичного поля у вакуумі: потік вектора напруженості електростатичного поля у вакуумі крізь довільну замкнуту поверхню дорівнює відношенню алгебраїчної суми електричних зарядів, що охоплюють деяку поверхню, до електричної сталої ϵ_0 .

Використавши модель плоского електростатичного поля, перевіримо експериментально теорему Остроградського-Гауса.

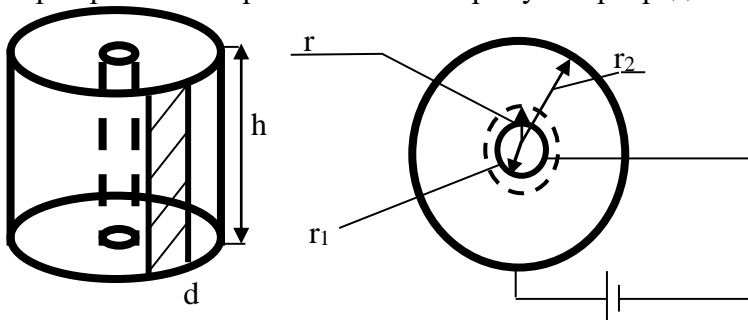


Рис. 3.3.1

Для плоского поля математичний запис теореми Остроградського-Гауса :

$$\oint_l E_n h dl = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} , \quad (3.3.8)$$

де q - заряд елемента провідника висотою h , dl - елемент контуру l площини, ε - відносна діелектрична проникність середовища.

Розглянемо проходження електричного струму через контакт двох циліндричних провідників однакового поперечного перерізу, але з різними питомими опорами ρ_1 і ρ_2 (контакт металевий циліндр-електропровідний папір). Оскільки $\rho_1 \ll \rho_2$, то поверхнева густина заряду на поверхні відокремлення дорівнює:

$$\sigma = \varepsilon \varepsilon_0 \rho_2 j . \quad (3.3.9)$$

Стаціонарний заряд, який створює поле, визначається формулою:

$$q = \sigma S = \varepsilon \varepsilon_0 \rho_2 j S = \varepsilon \varepsilon_0 \rho_2 I . \quad (3.3.10)$$

Підставивши цей вираз у формулу (3.3.8), отримаємо:

$$\oint E_n h dl = \rho_2 I . \quad (3.3.11)$$

Співвідношення (3.3.11) - це запис теореми Остроградського-Гауса для плоского електричного поля. Спростимо цей вираз для випадку електричного поля, яке створюється мідним кільцевим електродом і електропровідним папером (рис. 3.3.1). Опір електропровідного паперу $R = \int \rho_2 \frac{dl}{s}$,

або :

$$R = \rho_2 \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{2\pi r h} = \frac{\rho_2}{2\pi h} \ln \frac{r_2}{r_1} . \quad (3.3.12)$$

Із виразу (3.3.12) знайдемо $\rho_2 = \frac{2\pi h R}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$. Враховуючи

зв'язок між напруженістю поля і потенціалом і знаючи значення ρ_2 , можемо записати вираз (3.3.11) так:

$$\oint_l \left(\frac{U_n h}{d} \right) dl = \frac{2\pi R h I}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{2\pi h U}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}, \quad (3.3.13)$$

де d - відстань між точками, в яких вимірюється різниця потенціалів U_n , r_1 , r_2 - радіуси центрального і кільцевого електродів, U - напруга між цими електродами. Вираз (3.3.13) можна істотно спростити, якщо контур, по якому проводиться вимірювання, взяти у вигляді співвісного з електродом кола радіуса r і розбити його на m рівних частин Δl , тоді:

$$\frac{1}{d} \sum_{i=1}^m U_{ni} \Delta l_i = \frac{2\pi U}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad \text{або} \quad r \langle U_n \rangle = \frac{U}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}, \quad (3.3.14)$$

де $\langle U_n \rangle$ - середнє значення U_n у всій області вимірювань, r - радіус контуру.

Опис експериментальної установки

Схему експериментальної установки показано на рис. 3.3.2:

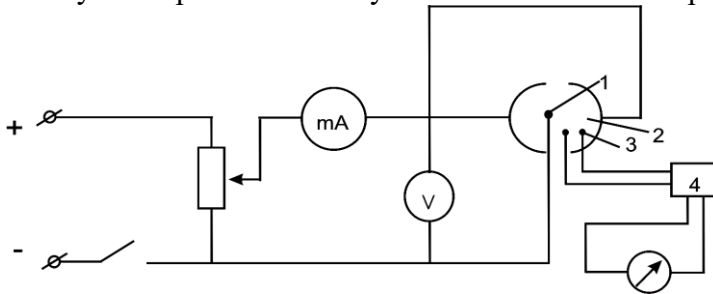


Рис. 3.3.2.

Напруга до електропровідного паперу подається через центральний дисковий електрод 1 і кільцевий 2, який складається з двох півкільць із проміжками між ними. Напруга вимірюється вольтметром. Вимірювання різниці потенціалів U_n між двома сусідніми точками здійснюється за допомогою подвійного зонда 3 і приладу Р-300.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за схемою (рис. 3.3.2).

2. Зобразити на поверхні електропровідного паперу замкнений контур у формі кола, який імітує бічну поверхню циліндра.
3. Подати напругу 3 В на кільцевий і дисковий електроди.
4. Виміряти різницю потенціалів U_n у напрямі, перпендикулярному до елемента контуру, не менше як в 7-11 разів по всьому контуру і знайти середнє значення.
5. Перевірити рівність (3.3.14) теореми Остроградського – Гаусса.

Контрольні питання

1. Як формулюється теорема Остроградського – Гаусса ?
2. Доведіть теорему Остроградського – Гаусса.
3. Виведіть рівність, яку потрібно перевірити в цій лабораторній роботі.
4. Обчисліть напруженість поля, створеного нескінченно довгою площиною.
5. Знайдіть напруженість і потенціал електричного поля, створеного сферою.
6. У чому особливості експериментальної перевірки теореми Остроградського – Гаусса методом фізичного моделювання з використанням електропровідного паперу?

Задачі для самопідготовки

1. Обчислити напруженість поля і потенціал, які створені рівномірно зарядженою кулею радіусом R із об'ємною густиною заряду ρ . Побудувати графік залежності E і ϕ від відстані r .
2. Заряд рівномірно розділений з об'ємною густиною ρ по об'єму кругового циліндра, радіус R якого в багато разів менший від довжини l твірної. Знайти напруженість і потенціал поля. Побудувати графік залежності E і ϕ від відстані r .

Методичні поради

Матеріал цієї лабораторної роботи можна використати при вивченні теми “Напруженість поля” в 10 класі при розгляді таких питань, як напруженість поля площини, сфери. Цей матеріал можна використати для розв'язку різноманітних задач із знаходження напруженості і потенціалу поля в класах із поглибленим вивченням фізики, а також на факультативних заняттях.

3.4. Визначення ємності конденсатора і діелектричної проникливості середовища методом порівняння

Тема: Визначення ємності конденсатора і діелектричної проникливості середовища методом порівняння.

Мета: Ознайомитись із будовою і принципом дії балістичного гальванометра. Визначити ємність конденсатора і діелектричну проникливість середовища. Визначити ємність батареї конденсаторів при послідовному і паралельному їх з'єднанні.

Обладнання: конденсатор постійної ємності (еталонний), набір конденсаторів невідомої ємності, плоскі конденсатори із органічного скла, полімерних матеріалів з обкладинками з фольги, випрямлювач ВС-4-12, однополюсний перемикач, реостат, мікрометр, лінійка, балістичний гальванометр.

Теоретичні відомості

Якщо окремому провіднику надати деякий заряд, то він буде розподілятися на поверхні провідника таким чином, що ця поверхня стане еквіпотенціальною. Заряд провідника буде пропорційний потенціалу провідника, який визначається відносно нескінченно віддаленої точки:

$$q = C \cdot \varphi, \quad (3.4.1)$$

де C – коефіцієнт пропорційності, який називають електричною ємністю провідника або просто ємністю.

Фізичний зміст цієї величини наступний: електрична ємність провідника визначає ту кількість електрики, яка може знаходитися на провіднику, якщо потенціал провідника дорівнює одиниці.

Сукупність двох провідників, які мають однакові за величиною заряди, але різні за знаком і розміщені близько один від одного, називається конденсатором. Відношення заряду одного з провідників до різниці потенціалів і визначає ємність конденсатора:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}. \quad (3.4.2)$$

Для окремих провідників в однорідному середовищі електроємність залежить від їх геометричних розмірів. Користуючись співвідношенням (3.4.2), легко визначити

електричну ємність конденсаторів різних видів. Так, для плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}, \quad (3.4.3)$$

для сферичного конденсатора з внутрішньою сферою радіуса R_1 і зовнішньою – радіуса R_2 :

$$C = \frac{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R_1 R_2}{R_2 - R_1}, \quad (3.4.4)$$

для циліндричного конденсатора:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}{\ln(R_2 / R_1)}. \quad (3.4.5)$$

На практиці досить часто доводиться мати справу з паралельним і послідовним з'єднанням конденсаторів. Першим з'єднанням користуються в тому випадку, коли потрібно при тій же різниці потенціалів отримати великий заряд, тобто велику ємність, а другим – коли потрібно отримати при тому ж заряді велику різницю потенціалів, тобто меншу ємність.

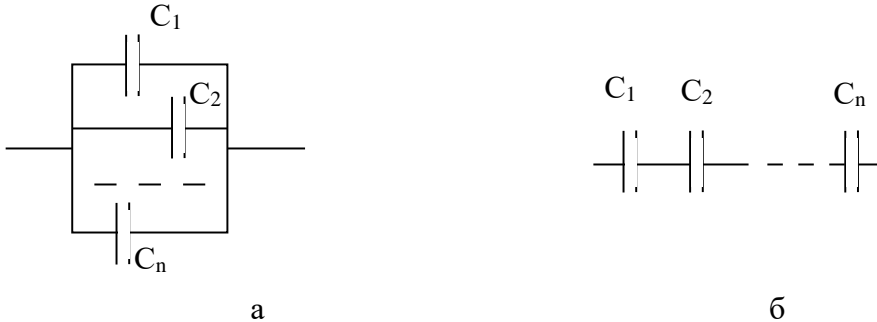


Рис.3.4.1. Паралельне (а) і послідовне (б) з'єднання конденсаторів.

При паралельному з'єднанні різниця потенціалів усіх конденсаторів однакова, тому сумарний заряд однієї з обкладинок дорівнює:

$$q = q_1 + q_2 + \dots q_n, \quad (3.4.6)$$

$$\text{де } q = \frac{C}{\varphi_1 - \varphi_2}, \quad q_1 = \frac{C_1}{\varphi_1 - \varphi_2}, \quad q_2 = \frac{C_2}{\varphi_1 - \varphi_2}, \quad q_n = \frac{C_n}{\varphi_1 - \varphi_2}.$$

Тому рівність (3.4.6) можна записати як:

$$\frac{C}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{C_1}{\varphi_1 - \varphi_2} + \frac{C_2}{\varphi_1 - \varphi_2} + \dots + \frac{C_n}{\varphi_1 - \varphi_2},$$

або

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i. \quad (3.4.7).$$

При послідовному з'єднанні спільним для конденсаторів є заряд $q = q_1 = q_2 = \dots = q_n$, а різниця потенціалів $\varphi_1 - \varphi_n = (\varphi_1 - \varphi_2) + (\varphi_2 - \varphi_3) + \dots + (\varphi_{n-1} - \varphi_n)$. Але врахувавши, що

$$\varphi_1 - \varphi_n = \frac{q}{C}; \quad \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q_1}{C_1} \text{ і т.д., отримаємо:}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}. \quad (3.4.8)$$

Ємність конденсаторів здебільшого визначають експериментально. Одним із таких методів визначення ємності конденсаторів є метод порівняння. В цьому методі використовується порівняння невідомої електроємності C_x із відомою електроємністю еталонного конденсатора C_e . Для визначення заряду і електроємності використовується балістичний гальванометр. Балістичним гальванометром вимірюється максимальне відхилення рамки під дією миттєвого імпульсу струму. Короткочасний струм, тривалість якого τ значно менша, ніж період коливаний T_0 , не встигає помітно змінити інертну рухому систему. Оскільки момент інерції рамки великий і вона не встигає за час τ вийти з положення рівноваги, то отримаємо:

$$J \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = BS n I, \quad (3.4.9)$$

Проінтегрувавши, матимемо:

$$J \frac{d\varphi}{dt} = BS n \int_0^{\tau} I dt = BS n q, \quad (3.4.10)$$

де q – повна кількість електрики, яка пройшла через гальванометр. Піднесемо вираз (3.4.10) до квадрата:

$$J^2 \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = B^2 S^2 n^2 q^2. \quad (3.4.11)$$

Врахувавши, що $W_k = \frac{J}{2} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2$; $W_n = \frac{D\varphi_{\max}^2}{2}$, де φ_{\max} – максимальний кут повороту рамки, а D – модуль крутіння нитки, і використавши закон збереження енергії $W_k = W_n$, отримаємо:

$$J \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = D\varphi_{\max}^2. \quad (3.4.12)$$

Поділивши (3.4.11) на (3.4.12), дістанемо:

$$J = B^2 S^2 n^2 q^2 / (D\varphi_{\max}^2). \quad (3.4.13)$$

Оскільки період вільних коливань рамки $T_0 = 2\pi / \sqrt{D/J}$, то :

$$J = T_0^2 D / 4\pi^2. \quad (3.4.14)$$

Порівнявши (3.4.13) і (3.4.14), будемо мати:

$$q = (T_0 D / 2\pi B S n) \cdot \varphi_{\max}. \quad (3.4.15)$$

Через те що величини T_0 , D , B , S , n – для такої рамки сталі, то введемо позначення $T_0 D / 2\pi B S n = \gamma$. Тоді вираз (3.4.15) запишемо так:

$$q = \gamma \varphi_{\max}. \quad (3.4.16)$$

Величина γ називається балістичною сталою гальванометра. Балістична стала визначає кількість електрики, яка, пройшовши через рухому рамку, спричинить її поворот на кут 1 рад.

Із останньої рівності (3.4.16) випливає, що максимальний кут відхилення рухомої рамки балістичного гальванометра пропорційний заряду, який пройшов через неї.

Ємність невідомого конденсатора C_x можна визначити шляхом порівняння з конденсатором еталонним відомої ємності C_e . Якщо еталонний і досліджуваний конденсатор зарядити до однакової різниці потенціалів U , то $C_x = \frac{q_x}{U}$; $C_e = \frac{q_e}{U}$ або $\frac{C_x}{C_e} = \frac{q_x}{q_e}$.

Згідно з рівністю (3.4.16) будемо мати $q_x = \gamma\varphi_x$; $q_e = \gamma\varphi_e$, де $\varphi_x \sim N_x$; $\varphi_e \sim N_e$ (тобто кут відхилення пропорційний кількості поділок). З урахуванням вищесказаного отримуємо, що:

$$C_x = C_e \frac{N_x}{N_e} . \quad (3.4.17)$$

Опис експериментальної установки

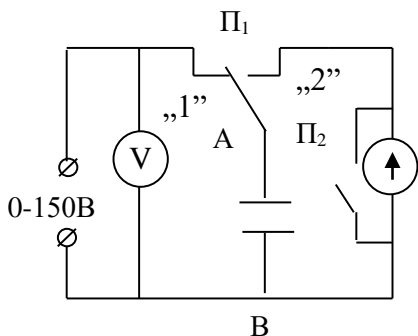


Рис. 3.4.2

Схему вмикання приладів показано на рис. 3.4.2. Перемикач П₁ призначено для зарядження конденсаторів (положення „1”) і для розрядження їх (положення „2”). У точки А і В підключається конденсатор еталонний, а потім конденсатори невідомої ємності або

батареї конденсаторів. Перемикач П₂, увімкнений паралельно балістичному гальванометру, призначений для заспокоєння рамки гальванометра під час її руху.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 3.4.2, під'єднати еталонний конденсатор і за допомогою регулятора встановити напругу U на еталонному конденсаторі.
2. Перемикач П₁ перевести у положення „2” і зробити відлік за шкалою для першого коливання. Заспокоїти рамку перемикачем П₂. Проробити дослід не менше 5 разів і знайти середнє значення N_e .
3. Увімкнути замість конденсатора еталонної ємності конденсатори невідомої ємності при тій же напрузі U і провести дослід не менше 5 разів для кожного конденсатора. Знайти середнє значення N_x .
4. Згідно з рівністю (3.4.17) обчислити невідомі ємності конденсаторів.
5. З'єднати конденсатори невідомих ємностей спочатку паралельно, а потім послідовно і визначити їх ємності.

Порівняти експериментальні значення з обчисленими за формулами (3.4.7) і (3.4.8).

6. Оцінити похибки вимірювань у кожному випадку.
7. Користуючись лінійкою і мікрометром, виміряти розміри обкладок саморобних конденсаторів і відстань між обкладками (товщину діелектрика).
8. Обчислити діелектричну проникливість діелектрика, виходячи із рівності (3.4.3): $\varepsilon = \frac{Cd}{\varepsilon_0 S}$.
9. Обчислити похибки вимірювань.

Контрольні питання

1. Розкрийте зміст електричної ємності провідника, які одиниці її вимірювання.
2. Що розуміють під електричною ємністю конденсатора?
3. Виведіть формули для обчислення ємності плоского, сферичного, циліндричного конденсаторів.
4. Виведіть формули для обчислення ємності конденсаторів при послідовному і паралельному з'єднанні.
5. Поясніть будову і принцип дії балістичного гальванометра.
6. Виведіть формулу для обчислення невідомої ємності конденсатора методом порівняння.

Задачі для самопідготовки

1. Покажіть, що при малій товщині ізолюючого шару ємність сферичного конденсатора можна розрахувати за формулою ємності плоского конденсатора.
2. П'ять конденсаторів однакової ємності з'єднали послідовно в батарею. Паралельно одному із конденсаторів під'єднали статичний вольтметр, ємність якого в два рази менша ємності кожного конденсатора. Вольтметр показує 500 В. Яка різниця потенціалів на всій батареї?

Методичні поради

У спрощеному варіанті (зменшити кількість завдання) ця лабораторна робота може бути поставлена в школі як робота фізичного практикуму в 10 кл. „Вимірювання електроємності

конденсатора”. Теоретичний матеріал цієї лабораторної роботи може бути використаний на уроках із теми „Електроємність”, „Конденсатор”.

3.5. Вивчення діелектричних властивостей сегнетоелектриків

Тема: Вивчення діелектричних властивостей сегнетоелектриків.

Мета: Дослідити процес поляризації сегнетоелектриків, отримати петлю діелектричного гістерезису, залежність діелектричної проникності сегнетоелектрика від напруженості електричного поля.

Обладнання: касета ФПЕ-02, джерело живлення, цифровий вольтметр, осцилограф.

Теоретичні відомості

Сегнетоелектриками називається група кристалічних діелектриків, які в певному інтервалі температур мають спонтанну (самодовільну) поляризацію, яка змінюється під впливом зовнішніх факторів – електричного поля, деформації, змін температури. Прикладами сегнетоелектриків є сегнетова сіль ($NaKC_4H_4O_6 \times 4H_2O$), титанат барію ($BaTiO_3$).

За відсутності зовнішнього електричного поля весь об’єм сегнетоелектрика можна подати як довільно розбитий на невеликі області, які поляризовані до насичення і називаються доменами. Можливі напрямки електричних моментів доменів визначаються симетрією кристалу сегнетоелектрика.

Для якісної оцінки степені поляризації користуються вектором поляризації \vec{P} , який характеризує сумарний електричний дипольний момент одиниці об’єму діелектрика (сегнетоелектрика):

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\sum \vec{p}_i}{\Delta V}, \quad (3.5.1)$$

де ΔV – фізично нескінченно малий об’єм, \vec{p}_i - дипольні моменти окремих молекул, які містяться в об’ємі ΔV .

Між вектором поляризації \vec{P} і вектором напруженості електричного поля в діелектрику \vec{E} існує зв'язок:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E} , \quad (3.5.2)$$

де χ – діелектрична сприйнятливість речовини діелектрика, ϵ_0 – електрична постійна .

Завдяки доменній структурі дипольний момент сегнетоелектрика за відсутності зовнішнього електричного поля дорівнює нулю, оскільки напрямки спонтанної поляризації доменів різні. Такий сегнетоелектрик неполяризований.

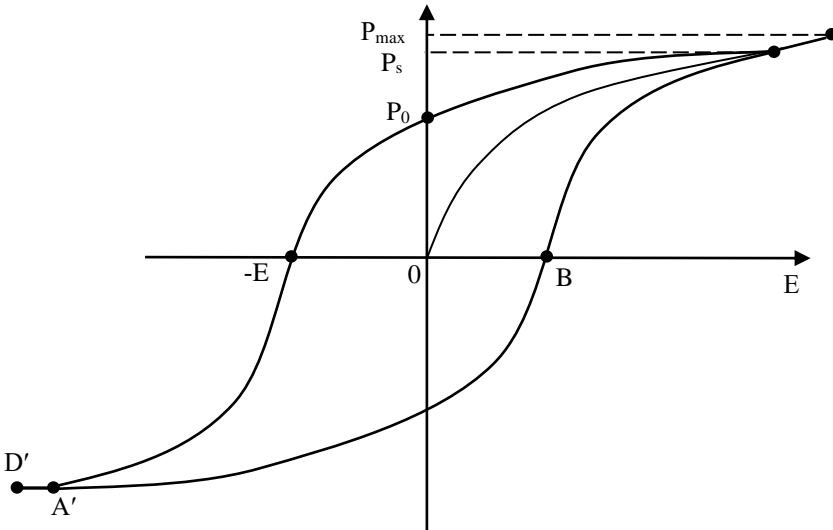


Рис.3.5.1.

Поляризація сегнетоелектрика в зовнішньому електричному полі полягає, по-перше, в зміщенні границь доменів і збільшенні розмірів цих доменів, вектори електричних моментів яких близькі за напрямом до вектора напруженості електричного поля E , і, по-друге, в повороті електричних моментів доменів за полем. Це приводить до поляризації кристала, і при достатньо сильному полі досягається стан насичення, коли весь сегнетоелектрик поляризований за полем і його поляризованість не змінюється при подальшому збільшенні напруженості електричного поля E .

У сегнетоелектриків вектор поляризації \vec{P} залежить від \vec{E} нелінійно і в рівності (3.5.2) потрібно враховувати, що χ не постійна величина, а є функцією від E . Графік залежності P від E для сегнетоелектриків поданий на рис. 3.5.1.

Спочатку збільшення величини P залежно від напруженості електричного поля E відбувається вздовж кривої OA . В точці A поляризація всіх доменів виявляється орієнтованою вздовж поля E (насичення спонтанної поляризації).

При наступному збільшенні E поляризація P зростає за лінійним законом (ділянка AD). Зростання P на цій ділянці пов'язане з ростом тільки індукованої поляризації. Якщо лінію AD продовжити до перетину з віссю ординат, то вона перетне вісь у точці, яка відповідає значенню спонтанної поляризації P_s . Повна поляризація сегнетоелектрика складається із спонтанної P_s , яка не залежить від поля P , і індукованої P_i , викликаній цим полем:

$$\vec{P} = \vec{P}_s + \vec{P}_i. \quad (3.5.3)$$

При зменшенні напруженості електричного поля зміна поляризації відбувається не по кривій DAO , а по новій кривій DAP_0 . При $E=0$ величина поляризації має деяке залишкове значення P_0 . Щоб зняти залишкову поляризацію, необхідно змінити напрямок зовнішнього електричного поля на протилежний. Значення напруженості оберненого електричного поля, при якій усувається залишкова поляризація, називається коерцитивною силою, або коерцитивним полем E_k . Якщо сегнетоелектрик помістити в змінне електричне поле, то залежність $P=P(E)$ буде мати вигляд замкненої кривої (крива $DAP_0E_kA'D'A'BAD$), яка називається **петлею діелектричного гістерезису**.

Аналогічний вигляд має залежність $D = D(E)$. Вектор електричної індукції \vec{D} у сегнетоелектрику визначається як: $D = \epsilon_0 \vec{F} + \vec{P}_s + \vec{P}_i$, враховуючи (3.5.2) і (3.5.3), а також той факт, що для сегнетоелектриків $\chi \gg 1$, а значить, $P \gg \epsilon_0 E$, отримаємо, що $D \approx P$.

При періодичній зміні поляризації сегнетоелектрика на подолання тертя при повороті електричних моментів спонтанно

поляризованих областей затрачується частина енергії електричного поля, яка іде на нагрівання діелектрика. Мірою цієї енергії є площа петлі гістерезису, яка пропорційна кількості теплоти, що виділяється в одиниці об'єму діелектрика за один період зміни напруженості електричного поля.

Частина енергії електричного поля, яка переходить у теплоту, називається діелектричними втратами. Для характеристики цієї величини вводять тангенс кута діелектричних втрат:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{W_T}{W_{max}}, \quad (3.5.4)$$

де W_T – енергія електричного поля, що перетворилася у теплоту в одиниці об'єму за одиницю часу, W_{max} – максимальна густина енергії електричного поля, яка запасується в діелектрику:

$$W_{max} = \frac{2D_{max}2E_{max}}{2} = 2D_{max}E_{max} = 2P_{max}E_{max}. \quad (3.5.5)$$

Для знаходження W_T використаємо для опису процесу поляризації перший закон термодинаміки:

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (3.5.6)$$

де δQ – кількість теплоти, передана діелектрику, δA – робота сил електричного поля над діелектриком, dU – приріст його внутрішньої енергії.

Якщо припустити, що при поляризації об'єм діелектрика не змінюється, то δA буде мати тільки електричну частину:

$$W_{el} = \frac{1}{2}\epsilon_0\epsilon E^2, \quad (3.5.7)$$

$$\delta A = dW_{el} = \epsilon_0\epsilon EdE = EdD = EdP. \quad (3.5.8)$$

Підставимо (3.5.8) у (3.5.6) і проінтегруємо вздовж замкнутої петлі гістерезису (в одному циклі). Інтергал від dU буде дорівнювати нулю, оскільки в круговому процесі сегнетоелектрик повертається в початковий стан, а внутрішня енергія при цьому приймає початкове значення. В результаті отримуємо:

$$W_T = Q = A = \oint EdP . \quad (3.5.9)$$

З останнього видно, що теплота, яка виділяється в одному циклі поляризації, чисельно дорівнює площі петлі гістерезису. Таким чином:

$$tg\delta = \frac{\oint EdP}{2E_{max}P_{max}} . \quad (3.5.10)$$

Для кожного сегнетоелектрика є температура T_k , яка називається точкою Кюрі, (температурою Кюрі), вище якої сегнетоелектрик втрачає свої особливі електричні властивості, поводить себе як звичайний полярний діелектрик. Виняток складає сегнетова сіль, яка має дві точки Кюрі (верхню і нижню) і володіє сегнетоелектричними властивостями лише в інтервалі температур. При температурі Кюрі відбувається фазовий перехід другого ряду, який супроводжується зміною симетрії кристалічної структури.

Для багатьох сегнетоелектриків при $T > T_k$ (неполярна фаза, де відсутня спонтанна поляризація) температурна залежність описується законом Кюрі-Вейсса:

$$E = \frac{C}{T - T_k} , \quad (3.5.11)$$

де C - стала Кюрі (різна для різних сегнетоелектриків).

Опис експериментальної установки

Дослідження залежності $\varepsilon = f(E)$ зводиться до вимірювань ємності конденсатора, заповненого сегнетоелектриком, від напруженості електричного поля. Ємність C_x дослідженого конденсатора розраховується за допомогою петлі діелектричного гістерезису. Блок-схему установки для дослідження діелектричного гістерезису подано на рис. 3.5.2.

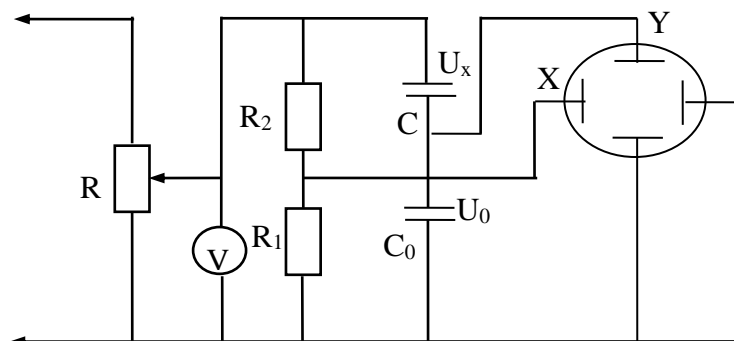


Рис.3.5.2.

Для отримання петлі гістерезису, тобто залежності $P = f(E)$, на екрані осцилографа достатньо на вертикальні відхиляючі пластини подати напругу U_y , пропорційну поляризованості $P(U_y \approx P)$, а на горизонтальні – напругу U_x , пропорційну напруженості поля $E(U_x \approx E)$. Основу експериментальної установки складає касета ФПЕ – 02/07 (рис. 3.5.2).

Низькочастотну напругу U (50 Гц) прикладають до послідовно з'єднаних еталонного конденсатора C_o і конденсатора з сегнетоелектриком C_x та подільника напруг, який складається з резисторів R_1 і R_2 . Оскільки конденсатори C_x і C_o з'єднані послідовно, то заряди на їх пластиних однакові:

$$q = C_x U_x = C_o U_o, \quad (3.5.12)$$

де U_x і U_o - спади напруг на сегнетоелектричному і еталонному конденсаторі.

Напруга U_x подається на горизонтальні пластини осцилографа, і вона пропорційна напруженості електричного поля E . Напруга U_o подається на вертикальні відхиляючі пластини ($U_o = U_y$) і пропорційна поляризованості P (або електричному зміщенню D) сегнетоелектрика. Для регулювання і контролю вхідної напруги U в заданих межах використовують потенціометр R і цифровий вольтметр PV , що підключається до касети.

З (3.5.12) випливає, що:

$$C_x = \frac{C_o U_o}{U_x} . \quad (3.5.13)$$

За умови, що $C_x \ll C_o$ і враховуючи, що опір обернено пропорційній ємності:

$$R_c = \frac{1}{\omega C} , \quad (3.5.14)$$

то практично вся напруга спадає на C_x . Якщо відношення опорів у подільнику дорівнює n :

$$\frac{R_2}{R_1} = n ,$$

то

$$U = IR_1 + IR_2 = IR_1 + IR_1 n = IR_1(n+1) = U_x(n+1) .$$

З останнього отримаємо:

$$U_x = \frac{U}{n+1} = \frac{U}{\frac{R_2}{R_1} + 1} . \quad (3.5.15)$$

Враховуючи (3.5.15) і (3.5.13), отримаємо:

$$C_x = \frac{C_o U_o}{U} \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) , \quad (3.5.16)$$

де U_x і U_o спади напруг на сегнетоелектричному і еталонному конденсаторі.

Беручи до уваги, що $q = \sigma S$, а $\sigma = P_s$, матимемо:

$$P_s = \frac{C_o U_o}{S} . \quad (3.5.17)$$

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему, подану на рис. 3.5.3.
2. Увімкнути осцилограф і вивести електронний промінь у центр координатної сітки.

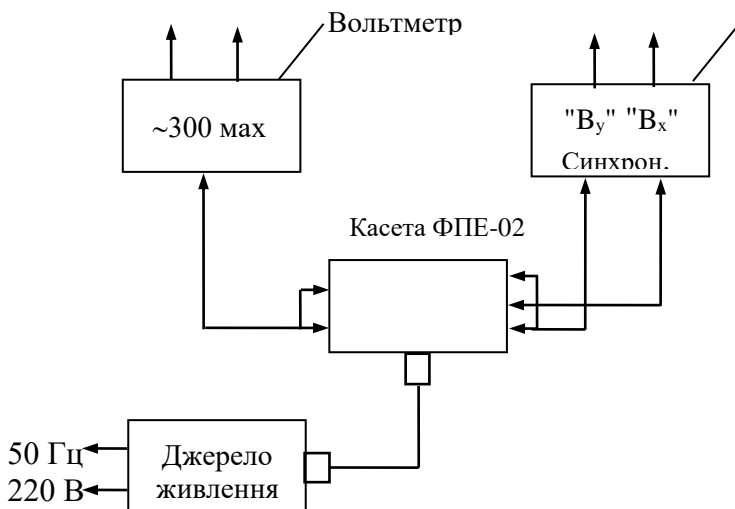


Рис. 3.5.3.

3. Увімкнути джерело живлення, цифровий вольтметр у мережу і встановити на електродах конденсаторів напругу U запропоновану викладачем.
4. Отримати на екрані осцилографа петлю діелектричного гістерезису.
5. За масштабними мітками на екрані осцилографа визначити спад напруги U_o на еталонному конденсаторі.

6. Обчислити спад напруги U_x на сегнетоелектричному конденсаторі за формулою (3.5.16) і напруженість електричного поля E .

$$E = \frac{U_x}{d}, \quad E = \frac{U}{\left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right)d}, \quad \text{де } d - \text{ відстань між}$$

пластинами сегнетоелектричного конденсатора.

7. Обчислити діелектричну проникність сегнетоелектрика, виходячи із формули плоского конденсатора

$$\varepsilon = \frac{C_o U_o d}{U \varepsilon_o S} \cdot \left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right), \quad \text{де } S - \text{ площа пластини}$$

сегнетоелектричного конденсатора, ε_o - електрична стала.

8. Змінюючи напругу U на електродах конденсаторів, провести аналогічні вимірювання і обчислення.
9. Побудувати графік залежності діелектричної проникності від напруженості електричного поля $\varepsilon = f(E)$.
10. Зняти на міліметровий папір граничну петлю діелектричного гістерезису (для отримання граничної петлі необхідно вибрати таку напругу, при якій чітко спостерігаються області спонтанної поляризації).
11. Для граничного випадку обчислити величину спонтанної поляризації за формулою (3.5.17).
12. Підрахувати число n міліметрових клітинок у верхній частині петлі і обчислити число всіх клітинок $N = 2n$.
13. Обчислити тангенс діелектричних втрат $tg\delta = \frac{N}{2E_m P_m}$, де E_m і P_m - координати граничної петлі гістерезису у відносних одиницях.
14. Обчислити похибки і зробити висновки.

Контрольні питання

1. Які загальні властивості сегнетоелектриків?
2. У чому полягає поляризація діелектриків? Основні види поляризації? Що таке домени?
3. Яка поведінка сегнетоелектрика в зовнішньому електричному полі?
4. Основні параметри петлі гістерезису.
5. Що таке діелектричні втрати і яка величина їх характеризує?
6. Як залежить діелектрична проникність сегнетоелектрика від температури? Що таке точка Кюрі?

Задачі для самопідготовки

1. Шар із сегнетоелектрика однорідно поляризований за об'ємом. Намалювати якісну картину ліній поля поляризованості \vec{P} , поля електричного зміщення \vec{D} і поля напруженості \vec{E} .
2. У середині діелектричної кулі радіуса R відомий вектор поляризації. $\vec{P} = P_{ox}\vec{i} + 2P_{oy}\vec{j} + 2P_{oz}\vec{k}$. Знайдіть енергію

електричного поля в середині кулі, якщо її діелектрична проникність ϵ .

Методичні поради

Теоретичний виклад цієї лабораторної роботи можна використати при вивченні теми "Діелектрики в електричному полі" в 10 класі, а експериментальну установку - для проведення демонстраційного експерименту з отримання петлі діелектричного гістерезису.

3.6. Вимірювання опору провідника за допомогою містка постійного струму і визначення температурного коефіцієнта опору металів

Тема: Вимірювання опору провідника за допомогою містка постійного струму і визначення температурного коефіцієнта опору металів.

Мета: Ознайомитися з вимірюванням опорів за допомогою містка Уїтстона. Вимірявши при різних температурах опір досліджуваного провідника, знайти його температурний коефіцієнт опору.

Обладнання: реохорд, магазин опорів, гальванічний елемент, набір резисторів невідомого опору, дротяна котушка для вимірювання термічного коефіцієнта опору міді, міліамперметр, металева склянка з водою, термометер, два ключі, електроплитка, штатив.

Теоретичні відомості

Розглянемо відрізок однорідного циліндричного провідника довжиною l . Для того, щоб у цьому провіднику існував постійний електричний струм, необхідна наявність внутрішнього електричного поля напруженістю \vec{E} . Але через те що напруженість електричного поля дорівнює $grad\phi$, тобто:

$$E = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{\phi_2 - \phi_1}{l} = \frac{\phi_1 - \phi_2}{l} = \frac{U}{l}, \quad (3.6.1)$$

де ϕ_1 і ϕ_2 - електричні потенціали в початковому і кінцевому перерізі провідника, а $U = \phi_1 - \phi_2$ називається напругою,

прикладеною до провідника, то іншими словами можна сказати: для існування електричного струму необхідно прикласти напругу.

При зміні напруги U змінюється і сила струму I . У 1826 р. Ом експериментально встановив пряму пропорційність між струмом і напругою: $I \sim U$.

Позначимо коефіцієнт пропорційності, який характеризує електричну провідність провідника, через G ; величина R , обернена провідності провідника, $R = \frac{1}{G}$ називається його електричним опором; тоді:

$$I = GU = \frac{U}{R} . \quad (3.6.2)$$

Рівняння (3.6.2), що визначає відношення між силою струму і напругою для кінцевої ділянки кола, називають законом Ома в інтегральній формі: сила струму чисельно дорівнює відношенню прикладеної напруги до опору провідника.

Опір провідника R залежить від його геометричних розмірів і форми, а також матеріалу, із якого він виготовлений. Для циліндричних провідників опір прямо пропорційний їх довжині l і обернено пропорційний площі поперечного перерізу S :

$$R = \rho \frac{l}{S} . \quad (3.6.3)$$

Коефіцієнт пропорційності ρ називається питомим опором речовини, із якої зроблено провідник. Фізичний зміст його наступний: він чисельно дорівнює електричному опору провідника, довжина якого становить 1 м і площа поперечного перерізу - 1 м².

Величина, обернена до питомого опору $\gamma = \frac{1}{\rho}$, називається питомою провідністю, або електропровідністю.

Виходячи з рівності (3.6.2) і враховуючи співвідношення (3.6.3), отримаємо:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{US}{\rho l} \quad (3.6.4)$$

або

$$\frac{I}{S} = \frac{I U}{\rho l}, \quad (3.6.5)$$

де $\frac{I}{S} = j$ - густина сили струму; $\frac{I}{\rho} = \gamma$; $\frac{U}{l} = E$.

Тоді будемо мати співвідношення:

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}, \quad (3.6.6)$$

яке виражає закон Ома в диференціальній формі.

Для провідників змінного перерізу залежність опору від геометричних розмірів уже не буде виражатися простим співвідношенням (3.6.3).

Експеримент показує, що опір провідника залежить також і від зовнішніх умов, і в першу чергу від температури і тиску. Результати експериментів свідчать, що при підвищенні температури опір металів зростає.

Приріст опору провідника при його нагріванні на 1°C , розділений на початкове значення опору, називається температурним коефіцієнтом опору і позначається буквою α . В загальному випадку температурний коефіцієнт опору сам залежить від температури. Але в багатьох випадках зміна α в досить широкому інтервалі температур незначна, і можна користуватися значенням α_{CP} в цьому інтервалі, якщо опір провідника при температурі t_0 дорівнює R_0 , а при температурі t становить R_t , то середнє значення:

$$\alpha_{CP} = \frac{R_t - R_0}{R_0} \cdot \frac{1}{t - t_0}. \quad (3.6.7)$$

Найчастіше R_0 – це опір при температурі 0°C .

Тоді в першому наближенні опір металевого провідника лінійно зростає з температурою за законом:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha_{CP} t). \quad (3.6.8)$$

Для деяких металів і сплавів поблизу абсолютного нуля температури при деякій характерній для кожного із них температурі, спостерігається різке падіння опору практично до нуля. Провідник при цьому переходить у так званий надпровідний стан. Температурна залежність опору металевих провідників

широко використовується в техніці для створення термометрів опору.

На практиці електричні кола є сукупністю різноманітних провідників, певним чином з'єднаних між собою.

Розглянемо випадок n -провідників, з'єднаних у коло послідовно (рис. 3.6.1, а):

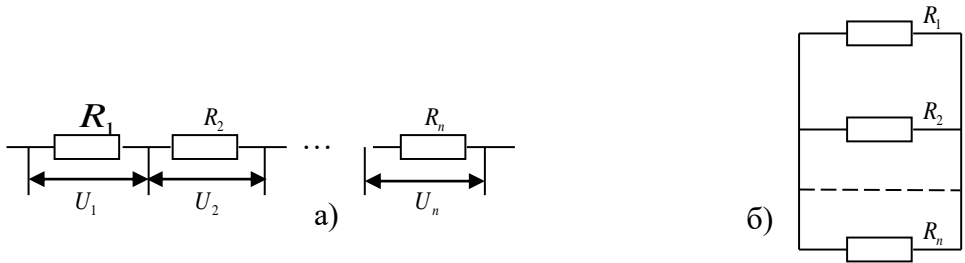


Рис.3.6.1.

Сила струму I – постійна величина, а $U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$.

Використавши закон Ома в інтегрованій формі, отримаємо:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n . \quad (3.6.9)$$

При паралельному з'єднанні провідників (Рис.3.6.1. б), напруга постійна $U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$, тоді:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} . \quad (3.6.10).$$

Опис експериментальної установки

У роботі застосовується метод вимірювання опору, запропонований Уїтсоном. Цей метод ґрунтується на законах розгалуженого кола і дає досить точні результати. Схему містка Уїтсона подано на рис. 3.6.2. Основна частина схеми реохорд АВ, яким є тонка однорідна дротина, натягнута на дерев'яну підставку. Кінці дротини підведені до клем. По дротині ковзає контакт D , положення якого на дротині реохорда визначають за шкалою з міліметровими поділками. Оскільки дротина реохорда однорідна по всій довжині, то опір її ділянок R_1 і R_2 дорівнює:

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{S}; \quad R_2 = \rho \frac{l_2}{S}.$$

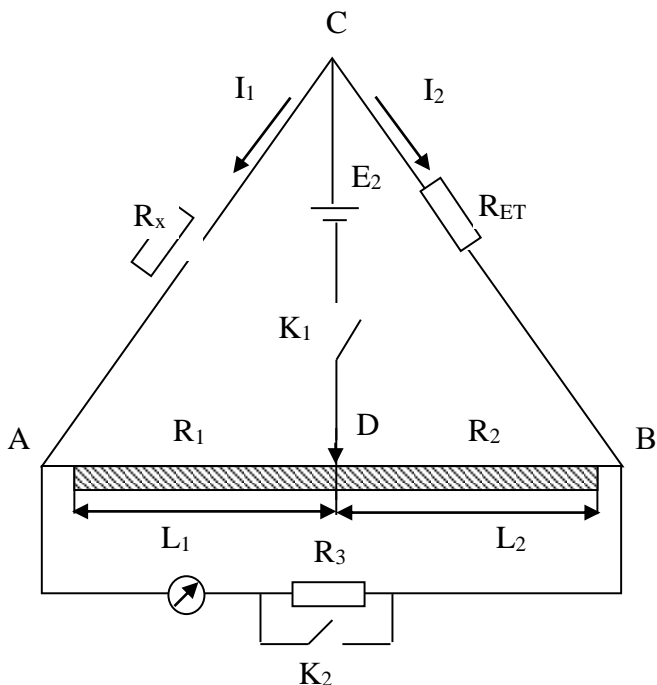


Рис.3.6.2.

Джерело струму E ввімкнено в коло так, що до його полюсів через ключ K_1 і повзунок реохорда D приєднано дві гілки з різними опорами; в одній - еталонний опір R_{em} і опір R_2 частини реохорда AD ; у другій - досліджуваний опір R_x і R_1 . До точок A і B ввімкнено гальванометр із резистором R_3 .

Переміщуючи повзунок реохорда, досягають того, щоб при замкнутому ключі K_1 стрілка гальванометра стояла на нулі. У цьому разі в точках A і B потенціали однакові – місток зрівноважений. Позначимо потенціали цих точок φ , точки D - φ_D , точки C - φ_C , силу струму у гілці CA - I_1 , а у гілці CB - I_2 . За законом Ома для ділянки кола отримаємо:

$$\begin{aligned} \varphi_C - \varphi &= I_1 R_x & \varphi_C - \varphi &= I_2 R_{CT}, \\ \varphi - \varphi_D &= I_1 R_1 & \varphi - \varphi_D &= I_2 R_2, \end{aligned} \quad (3.6.11)$$

або

$$I_1 R_x = I_2 R_{CT} \quad I_1 R_1 = I_2 R_2. \quad (3.6.12)$$

Поділивши, отримаємо:
$$\frac{R_x}{R_1} = \frac{R_{CT}}{R_2} . \quad (3.6.13)$$

Звідси:
$$R_x = R_{CT} \frac{R_1}{R_2} . \quad (3.6.14)$$

Беручи до уваги значення R_1 і R_2 , отримаємо:

$$R_x = R_{CT} \frac{l_1}{l_2} . \quad (3.6.15)$$

Коли потенціали точок А і В неоднакові, то через гальванометр може проходити значний струм. Для його обмеження ввімкнено резистор з опором R_3 .

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 3.6.2. Підібрати такий опір магазинів, щоб через гальванометр проходив мінімальний струм. Замкнути ключ K_2 і перемістити повзунок реохорда так, щоб стрілка гальванометра стояла на нульовій відмітці шкали. Виміряти довжини обох частин l_1 і l_2 дротини реохорда і визначити невідомий опір згідно з (3.6.15).
2. Досліди виконати для всіх провідників із невідомим опором.
3. З'єднати декілька провідників послідовно і визначити результуючий опір, порівняти з теоретичними обчисленнями згідно з рівністю (3.6.9).
4. Аналогічний експеримент провести і для паралельно з'єднаних провідників.
5. Засипати в металеву склянку лід із водою при температурі, опустити в нього пробірку з дротяною котушкою і досягнути температури 0°C . Визначити опір R_0 .
6. Поставити металеву склянку з водою на електроплитку і нагрівати протягом 15-20 хв. Зняти склянку з електроплитки, опустити в неї пробірку з дротяною котушкою, і коли температура перестане змінюватися, досягнути нульових показів гальванометра. Визначити опір R_i .
7. Користуючись співвідношенням (3.6.7), визначити α_{CP} .
8. Обчислити похибки вимірювань.

Контрольні питання

1. Сформулюйте і запишіть закон Ома в інтегральній і диференціальній формах.
2. Від чого залежить опір провідника? Фізичний зміст питомого опору.
3. Що називається температурним коефіцієнтом опору?
4. Як обчислюється загальний опір провідників при послідовному і паралельному сполученні?
5. У чому полягає вимірювання опору методом містка?
6. До якого із видів вимірювань (прямі, посередні, сукупні, спільні) належить спосіб вимірювання температурного коефіцієнта опору, який застосовується в роботі?

Задачі для самопідготовки

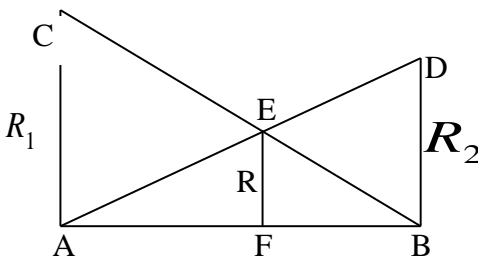


Рис.3.6.3.

1. Існує графічний спосіб розрахунку опору двох паралельно з'єднаних провідників: якщо із деякої точки А прямої АВ (рис. 3.6.3) поставити перпендикуляр АС, довжина якого в деякому масштабі дорівнює опору провідника R_1 , а із другої

(довільної) точки В поставити перпендикуляр ВД довжиною R_2 , то відстань EF від точки перетину Е прямих АД і СВ до прямої АВ буде дорівнювати опору R обох паралельно з'єднаних

провідників: $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$. Доведіть це.

2. До кінців свинцевого дроту довжиною l і діаметром d прикладена напруга U . Який проміжок часу пройде до початку плавлення дроту? Температура плавлення свинцю $t_{пл}$. Початкова температура дроту дорівнює нулю. Змінною теплоємністю знехтувати.

Методичні поради

Теоретичний виклад цієї лабораторної роботи можна використати при вивченні тем “Закон Ома для ділянки кола”, “Питомий опір”, “Види з'єднання провідників” у 8 класі.

Поданий матеріал можна використати в 10 класі при вивченні теми “Послідовне і паралельне з’єднання провідників” та виконанні лабораторної роботи цієї ж теми. Частина лабораторної роботи може бути поставлена як робота фізичного практикуму в 10 класі “Дослідження залежності опору металів і напівпровідників від температури”.

3.7. Визначення електрорушійної сили джерела струму методом компенсації

Тема: Визначення електрорушійної сили методом компенсації.

Мета: Ознайомитись із методом компенсації і визначити ЕРС різних джерел струму.

Обладнання: акумулятор, реохорд, гальванометр, ртутно-кадмієвий нормальний елемент, набір елементів із невідомими ЕРС, реостат, перемикач, вимикач, кнопка.

Теоретичні відомості

Під дією кулонівських сил відбувається перерозподіл вільних носіїв заряду в провіднику таким чином, що потенціал в усіх точках вирівнюється і електричне поле в провіднику зникає.

Для підтримування в колі постійного струму, потрібно, щоб на носії струму діяли, крім кулонівських сил, сили неелектричної природи, так звані сторонні.

Якщо кулонівські сили викликають об’єднання різнойменних зарядів, вирівнювання потенціалу і зникнення електричного поля в провіднику, то сторонні сили викликають розділення різнойменних зарядів і підтримують різницю потенціалів на кінцях провідника. Сторонні сили діють на носії струму у внутрішній частині джерела електричної енергії. Під дією сторонніх сил носії струму рухаються проти сил електростатичного поля так, що на кінцях зовнішнього кола підтримується стала різниця потенціалів і в колі тече постійний струм. Переміщуючи заряди, сторонні сили виконують роботу за рахунок енергії, що затрачається в джерелі струму.

У загальному випадку на носій струму, що має заряд q , діє в провіднику сила:

$$\vec{F} = \vec{F}_{кул} + \vec{F}_{стор} = q(\vec{E}_{кул} + \vec{E}_{стор}), \quad (3.7.1)$$

де $\vec{E}_{кул}$ та $\vec{E}_{стор}$ - відповідно напруженість електростатичного поля та напруженість сторонніх сил.

Запишемо закон Ома в диференціальній формі для цього випадку:

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} (\vec{E}_{кул} + \vec{E}_{стор}). \quad (3.7.2).$$

Помножимо скалярно обидві частини рівняння (3.7.2) на вектор $d\vec{l}$, чисельно рівний довжині dl елемента провідника і спрямований вздовж провідника в напрямку струму:

$$\vec{j}d\vec{l} = (\vec{E}_{кул}d\vec{l} + \vec{E}_{стор}d\vec{l})\frac{1}{\rho}. \quad (3.7.3)$$

Оскільки вектори \vec{j} і $d\vec{l}$ колінеарні (мають однаковий напрям), то отримуємо вираз у скалярній формі:

$$j\rho dl = E_{кул}dl + E_{стор}dl, \quad (3.7.4)$$

або врахувавши, що $j=I/S$, отримуємо:

$$I\rho \frac{dl}{S} = E_{кул}dl + E_{стор}dl. \quad (3.7.5)$$

Знаючи, що сила струму в усіх перерізах однакова, проінтегруємо обидві частини за довжиною ділянки кола 1-2,

отримуємо:

$$I \int_1^2 \rho \frac{dl}{S} = \int_1^2 E_{кул} dl + \int_1^2 E_{стор} dl. \quad (3.7.6)$$

Через те що $\int_1^2 E_{кул} dl = \phi_1 - \phi_2$, а аналогічний лінійний інтеграл називають електрорушійною силою $\int_1^2 E_{стор} dl = \varepsilon_{1,2}$, то будемо мати:

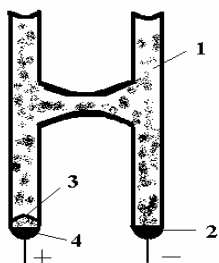
$$IR_{1,2} = \phi_1 - \phi_2 + \varepsilon_{1,2}. \quad (3.7.7)$$

Рівняння (3.7.7) є узагальненим законом Ома: добуток електричного опору ділянки кола на силу струму дорівнює сумі

спаду електричного потенціалу на цій ділянці і ЕРС всіх джерел електричної енергії, ввімкнених на розглядуваній ділянці.

Фізичний зміст ЕРС полягає в тому, що вона чисельно дорівнює роботі, що виконується сторонніми силами при переміщенні одиничного позитивного заряду по ділянці кола (або всьому колу).

Щоб досягти високої точності при вимірюванні ЕРС, користуються компенсаційним методом, який зводиться до порівняння ЕРС двох джерел. Еталонним джерелом, ЕРС якого відома, є ртутно-кадмієвий нормальний елемент (елемент Вестоля) рис. 3.7.1. Він є H-подібною скляною посудиною, наповненою водним розчином сульфату кадмію. В дно кожного плеча впаяно зовнішні виводи, що здійснюють контакт із зовнішніми електродами. Лівий електрод є "калюшкою" чистої ртуті, а правий - тією ж самою ртуттю, в якій розчинено металічний кадмій (розчин називається амальгамою). Ліворуч, над поверхнею ртуті, знаходиться декілька кристалів сульфату ртуті - сполука, яка дуже погано розчиняється у воді. Між зовнішніми виводами існує різниця потенціалів, причому лівий вивід позитивний щодо правого. Такий елемент працює таким чином: частина іонів кадмію переходить із амальгами в водний розчин, причому кожен залишає після себе два електрони, і амальгамний електрод набуває значного від'ємного заряду. Однак цей струм припиняється, як тільки в електроді буде стільки надлишкових електронів, що викликане ними притягання перешкоджатиме подальшому виходу іонів кадмію.



- 1 – водний розчин сульфату кадмію;
- 2 – амальгама ртуті;
- 3 – сульфат ртуті;
- 4 – чиста ртуть.

Рис.3.7.1.

Якщо тепер створити зовнішній провідний контур, з'єднавши кінці елемента

опором, то електрони потечуть від від'ємного до позитивного електрода. Це дозволить новій порції іонів кадмію перейти в розчин, а залишені ними електрони поповнять негативний заряд цього електрода. В колі буде протікати стаціонарний струм, який супроводжується міграцією іонів, які замикають коло в водному розчині. Біля другого електрода іони ртуті покидають розчин, зустрічаються з електронами, що приходять зовні, і стають нейтральними атомами ртуті. В розчині нові іони ртуті виникають при розчиненні сульфату ртуті, причому в електроліт додаються нові сульфатні іони. В результаті відбувається відділення електронів з атома кадмію і приєднання їх до іонів ртуті, тобто кадмій окислюється, а ртуть відновлюється. Елемент працює тому, що обмін енергетично вигідний. Відносна сила зв'язку електронів у структурі атома кадмію і атома ртуті така, що атомам ртуті їх легше приєднати, ніж атомам кадмію їх утримати. Зазначимо, що на кожній із поверхонь розподілу іони рухаються проти сил електричного поля. ЕРС такого елемента має високо стабільне значення у межах 1,0183-1,0187В для насичених і 1,0185-1,0195В для ненасичених елементів, яке мало змінюється з температурою.

Для нормальних насичених елементів ЕРС (у вольтах) при будь-якій температурі t дорівнює:

$$\begin{aligned} \varepsilon_t = \varepsilon_{20} - 40,6 \cdot 10^{-6}(t - 20) - \\ - 0,95 \cdot 10^{-4}(t - 20) + 1,01 \cdot 10^{-6}(t - 20), \end{aligned} \quad (3.7.8),$$

де $\varepsilon_{20} = 1,01865В$. Внутрішній опір нормальних елементів близько 1000 Ом.

Основною властивістю нормальних елементів є їх висока стабільність. Важливо, щоб елемент і вимірювані ділянки кола мали однакову температуру. При проходженні значних струмів ЕРС елемента стає нестабільною.

Опис експериментальної установки

Принципову схему установки зображено на рис. 3.7.2. Тут Е-акумулятор, ЕРС якого більша за ЕРС нормального елемента і ЕРС невідомого джерела ε_x . Через реостат R_0 вмикається акумулятор і замикається на реохорд АВ. Потенціал точки А менший за

потенціал точки В. Між кінцями реохорда існує різниця потенціалів, яка може змінюватись від 0 до якогось значення U .

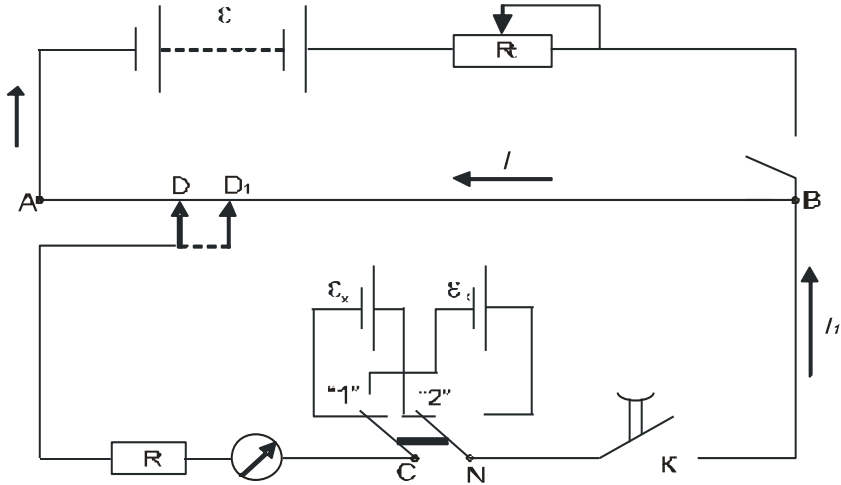


Рис. 3.7.2.

За допомогою перемикача можна під'єднати до реохорда по черзі джерела з невідомою ЕРС і нормальний елемент. Негативні полюси нормального елемента і джерела невідомої ЕРС під'єднуються через нульовий гальванометр і опір R до рухомого контакту D реохорда AB . Нехай повзунок реохорда знаходиться в точці D , то струму в колі гальванометра не буде. Аналогічно для нормального елемента знаходимо таке положення повзунка D_1 . Використавши закон Кірхгофа для вузла B контуру $DBNC$, отримаємо:

$$I_0 + I_1 = I ; \quad I_1 R_1 + IR_{DB} = \varepsilon_x . \quad (3.7.9)$$

Врахувавши, що $I_1=0$, отримаємо $IR_{DB}=\varepsilon_x$, або $U_{DB}=\varepsilon_x$. Аналогічно і для положення повзунка в точці D_1 , коли підключений нормальний елемент і перемикач знаходиться в положенні "2" :

$U_{D_1B} = \varepsilon$. Розділивши ці співвідношення, отримаємо:

$$\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_n} = \frac{U_{DB}}{U_{D_1B}} = \frac{IR_{DB}}{IR_{D_1B}} = \frac{l_1}{l_2} \quad (3.7.10),$$

звідки знайдемо, що :

$$\varepsilon_x = \varepsilon_n \frac{l_1}{l_2} \quad (3.7.11)$$

Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричне коло за схемою (рис. 3.7.2).
2. Замкнути коло акумулятора E , а потім перемикачем (положення "1") - коло джерела невідомої ЕРС. Перемістити повзунок в таке положення, щоб у колі гальванометра був відсутній струм. Визначити значення l_1 . Дослід повторити не менше 5 разів.
3. Перемикнути перемикач у положення "2" і визначити l_2 . Дослід повторити не менше 5 разів.
4. Обчислити значення ε_x і розрахувати похибки.
5. Визначити значення ЕРС батареї при їх послідовному і паралельному з'єднанні.

Контрольні питання

1. Поясніть фізичний зміст ЕРС.
2. Які сили називають сторонніми?
3. Виведіть закон Ома для повного кола (узагальнений закон Ома).
4. Поясніть будову і принцип дії нормального елемента.
5. У чому полягає спосіб компенсації для визначення невідомої ЕРС джерела струму?
6. Виведіть робочу формулу для обчислення невідомої ЕРС джерела струму для компенсаційного методу.

Задачі для самопідготовки

1. ЕРС батарейки кишенькового ліхтарика $E=4,5$ В, її внутрішній опір $r=3$ Ом. Скільки таких батарейок потрібно взяти, щоб живити лампу, розраховану на робочу напругу 220 В і потужність $P=60$ Вт? Як потрібно з'єднати ці батарейки?
2. При замиканні на опір R джерела ЕРС E струм становить I , струм короткого замикання I_{max} . Яку найбільшу корисну потужність може дати джерело?

Методичні поради

Теоретичний матеріал цієї лабораторної роботи може бути використаний на уроці в 10 класі з теми "Електрорушійна сила", а теоретичний виклад для встановлення узагальненого закону Ома може бути використаний на факультативних заняттях або при

вивченні фізики в класах із поглибленим вивченням фізики. При виконанні лабораторної роботи в 10 класі "Визначення ЕРС і внутрішнього опору джерела струму" за допомогою амперметра і вольтметра необхідно згадати про більш точний спосіб визначення ЕРС, а саме за допомогою компенсаційного методу.

3.8. Вивчення законів Кірхгофа

Тема: Вивчення законів Кірхгофа.

Мета: Перевірити закони Кірхгофа на практиці, порівняти експериментально виміряні струми з одержаними на основі правил Кірхгофа.

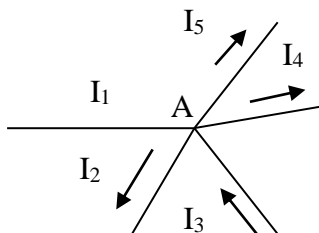
Обладнання: джерело струму, амперметр, резистор, реостат, тестер, вимикачі.

Теоретичні відомості

На практиці досить часто доводиться мати справу з розрахунками складних кіл постійного струму. Розв'язок таких задач значно полегшується двома правилами, сформульованими Г. Кірхгофом у 1847 р.

Перш за все визначимо в кожному провіднику напрям струму. В одних провідниках, з'єднаних у вузол, струми будуть текти в напрямку до вузла, а в інших – від вузла. Із закону збереження електричного заряду випливає, що сума сил струмів, що течуть до вузла, повинна дорівнювати сумі сил струмів, що течуть від вузла. Тоді перший закон Кірхгофа можна сформулювати так: алгебраїчна сума сил струмів, що сходиться в вузлі, дорівнює нулю:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 . \quad (3.8.1)$$



Запишемо перший закон Кірхгофа для вузла А (рис. 3.8.1) $I_1 - I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0$. Другий закон Кірхгофа є узагальненням закону Ома для розгалужених електричних кіл: е будь-якому замкнутому

контурі, довільно вибраному в розгалуженому

Рис. 3.8.1

електричному колі, алгебраїчна сума напруг на всіх ділянках цього контура дорівнює алгебраїчній сумі ЕРС усіх джерел електричної енергії, ввімкнених у контур:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{k=1}^m E_k . \quad (3.8.2)$$

При складанні рівнянь за другим законом Кірхгофа вибирають замкнені контури, які можна виділити в певному розгалуженому колі, і вважають значення добутку $I_i R_i$ додатним, коли струм у колі збігається з наперед вибраним напрямом обходу контура, і від'ємним, коли напрям струму протилежний напрямку обходу. Значення ЕРС додатне, коли напрям власного струму збігається з напрямом обходу контура.

Розглянемо на прикладі складний контур, поданий на рис. 3.8.2.

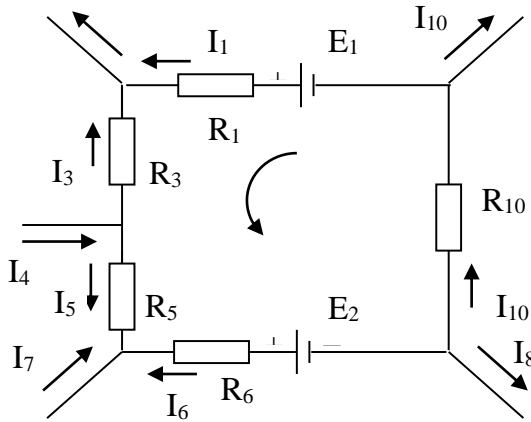


Рис. 3.8.2.

Згідно з першим законом Кірхгофа матимемо:

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

$$I_3 + I_4 - I_5 = 0$$

$$I_5 + I_6 + I_7 = 0$$

$$I_6 + I_8 + I_{10} = 0$$

$$-I_1 - I_8 + I_{10} = 0$$

Для контура, зображеного на цьому малюнку, згідно з другим законом Кірхгофа:

$$I_1R_1 - I_3R_3 + I_5R_5 - I_6R_6 + I_{10}R_{10} = E_1 - E_2.$$

Закони Кірхгофа досить часто використовуються для розрахунків різноманітних місткових схем (наприклад, міста Уїтстона).

При розв'язку задач рекомендується наступний порядок розрахунку розгалужених кіл постійного струму.

1. Визначити довільно напрями струмів, які входять і виходять із вузлових точок та проходять в окремих ділянках замкнутого контура.
2. Вибрати довільно напрям обходу контура і, користуючись рекомендованим вище правилом встановлення знаків доданків алгебраїчних сум, скласти шукані рівняння.
3. Складеними рівняннями охопити всі ЕРС і всі опори цього замкнутого контура.

Опис експериментальної установки

Схему електричного кола подано на рис. 3.8.3.

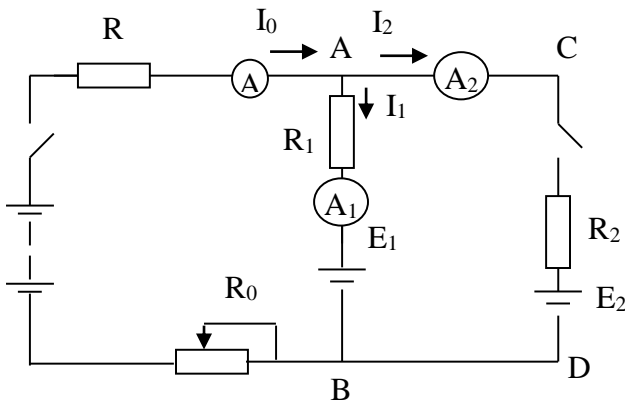


Рис. 3.8.3.

Реостат R_0 призначено для встановлення робочої сили струму в складеному електричному полі. Амперметри A_0 , A_1 , A_2 служать для вимірювання відповідних струмів. ЕРС джерел відомі,

а відповідні опори R_1 , R_2 служать навантаженням на ділянці АВ і CD.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за рис. 3.8.3. Виміряти опори R , R_1 і R_2 перед увімкненням схеми.
2. За допомогою реостата R_0 встановити робочу силу струму 0,5 - 1,5 А. Зафіксувати сили струмів.
3. Скласти рівняння Кірхгофа для незалежних контурів схеми на рис. 3.8.3 і обчислити струми I_0 , I_1 , I_2 .
4. Порівняти експериментально виміряні струми з одержаними на основі законів Кірхгофа.
5. Перевірити за показами амперметрів перше правило Кірхгофа.
6. Змінити напрям ЕРС джерел E_1 і E_2 та сили струму і виконати обчислення, зазначені в пунктах 2-5.

Контрольні питання

1. Використавши закон збереження електричного заряду опишіть перший закон Кірхгофа.
2. Як формулюється другий закон Кірхгофа? Який його фізичний зміст?
3. Що означає від'ємні значення струму?
4. Як визначається знак ЕРС джерела струму?
5. Якої схеми дотримуються при розрахунку розгалужених кіл?
6. Для яких цілей можна на практиці використати закон Кірхгофа?

Задачі для самопідготовки

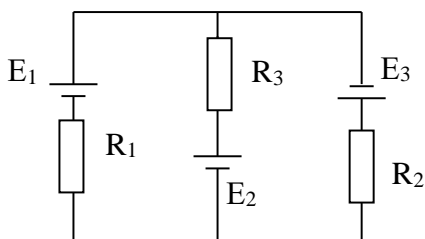


Рис. 3.8.4.

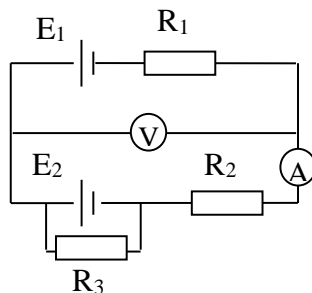


Рис. 3.8.5.

1. Батареї з електрорушійними силами $E_1=50$ В, $E_2=10$ В, $E_3=15$ В і внутрішніми опороми $r_1=0,3$ Ом, $r_2=0,4$ Ом, $r_3=0,1$ Ом увімкнені

в коло (рис.3.8.4) $R_1=9,5 \text{ Ом}$, $R_2=20 \text{ Ом}$, $R_3=5 \text{ Ом}$. Знайдіть струм у кожній гілці кола.

2. Що покаже вольтметр (рис.3.8.5.), якщо покази амперметра $I=150 \text{ мА}$; $E_1=E_2=1,5 \text{ В}$; $R_1=R_2=20 \text{ Ом}$ і внутрішнім опором джерела і амперметра знехтувати?

Методичні поради

Закони Кірхгофа можуть бути розглянуті на факультативних заняттях і використовуватися для розв'язку задач на розрахунки розгалужених кіл. Експериментальна установка може бути використана для робіт спецфізпрактикуму в класах із поглибленим вивченням фізики.

Розділ IV. Лабораторні роботи змістового модуля "Електричний струм у різних середовищах"

4.1. Дослідження температурної залежності опору полів провідників та визначення енергії

Тема: Дослідження температурної залежності опору напівпровідників та визначення енергії активації.

Мета: Дослідити залежність електропровідності напівпровідників від температури та визначити енергію активації.

Обладнання: термостат, термометр, міст постійного струму, термістор або зразки напівпровідників правильної геометричної форми.

Теоретичні відомості

Поряд із металами існують і речовини з електронною провідністю, в яких струм не супроводжується ніякими хімічними змінами. Концентрація носіїв заряду в таких провідниках надзвичайно залежить від температури. При досить низьких температурах такі речовини мають дуже великий питомий опір і практично є ізоляторами, а при достатньо високих температурах питомий опір стає малим і вони стають добрими провідниками. Речовини такого типу отримали назву напівпровідників.

Сильна залежність концентрації носіїв заряду в напівпровідниках від температури показує, що в цих речовинах

електрони провідності виникають під дією теплового руху. В напівпровідниках атомна взаємодія не може привести до утворення вільних носіїв заряду. Для цього необхідно найбільш слабкозв'язаним електронам надати деяку додаткову енергію, отримавши її з енергії теплового руху.

Властивості кристалічних напівпровідників пояснюються з точки зору зонної теорії твердого тіла. Енергетичний спектр електронів у напівпровідниках зумовлений їх взаємодією не тільки зі своїм атомом, а й сусідніми. Це приводить до утворення так званих енергетичних зон (дозволених та заборонених). Кожна з дозволених зон складається з великого, але скінченного числа енергетичних рівнів. Вона визначається кількістю атомів у кристалі, дискретні енергетичні рівні яких утворюють певну зону. Зона, що складається з повністю заповнених електронами рівнів, називається валентною. Зона, у якій не всі рівні зайняті електронами, називається вільною, або зоною провідності.

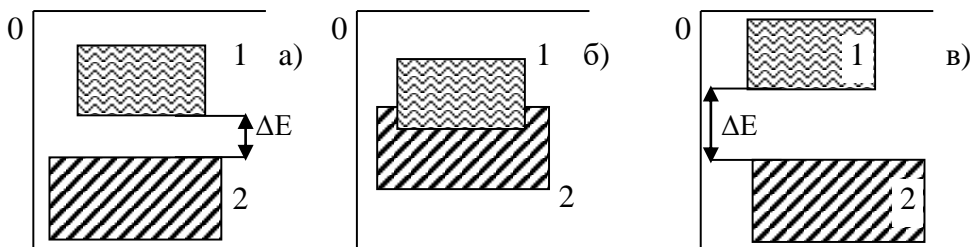


Рис.4.1.1. Зона провідності: а) напівпровідник; б) метал; в) діелектрик. 2. Зона валентності.

При тепловому збудженні електрона, що знаходиться в валентній зоні, він звільняє енергетичний рівень у валентній зоні і переходить у зону провідності, утворюючи там заповнений рівень. Незаповнений рівень, або вакансія, що утворюється при цьому в валентній зоні, називається діркою. При наявності зовнішнього електричного поля найближчий до дірки електрон у валентній зоні потрапляє в неї, залишаючи при цьому нову дірку, яку заповнить наступний сусідній електрон і т.д. Таким чином дірка буде переміщуватися в напрямку, протилежному рухові електронів, і

поводити себе як носій позитивного заряду. Будь-яка дірка може розглядатися як електрон провідності з позитивним зарядом.

Якщо використати результат статистичної механіки, то слід зауважити, що існує імовірність переходу електрона в результаті теплового збудження з верхнього краю валентної зони в зону провідності:

$$P(x) \sim e^{-\frac{\Delta E}{kT}}, \quad (4.1.1)$$

де ΔE – ширина забороненої зони, або енергія активації, k – стала Больцмана.

У напівпровідниках електрон, що потрапляє в зону провідності за рахунок теплового збудження, зіткнеться з діркою і повернеться назад у зону валентності. При цьому швидкість зменшення числа електронів провідності пропорційна $N^- N^+$, де N^- – число термічного збудження електронів, а N^+ – число дірок. У випадку теплової рівноваги ці швидкості однакові, так що $N^- N^+ \sim P(x)$ або:

$$N^- N^+ \sim e^{-\frac{\Delta E}{kT}}. \quad (4.1.2)$$

У чистому напівпровіднику $N^- = N^+$, і значить:

$$N^- \sim \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right). \quad (4.1.3)$$

Оскільки провідність пропорційна числу термічного збудження електронів, то

$$\gamma \sim N^- \sim \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right). \quad (4.1.4)$$

Увівши коефіцієнт пропорційності A , отримаємо:

$$\gamma = A \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right). \quad (4.1.5)$$

Знаючи провідність напівпровідників, легко знайти питомий опір:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{A} \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right). \quad (4.1.6)$$

Прологарифмуємо вираз (4.1.5) для електропровідності, отримаємо:

$$\ln \gamma = \ln A - \frac{\Delta E}{2k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (4.1.7)$$

Аналіз виразу (4.1.7) показує, що логарифм електропровідності напівпровідників є лінійною функцією від величини $\frac{l}{T}$. Тоді кутовий коефіцієнт прямої $\operatorname{tg}\varphi = \frac{\Delta E}{2k}$. Звідки можемо обчислити енергію активації для певного напівпровідника:

$$\Delta E = 2k \cdot \operatorname{tg}\varphi . \quad (4.1.8)$$

Опис експериментальної установки

У термостат 1 (рис. 4.1.2) поміщено напівпровідник 2 у скляній пробірці. За допомогою термометра 3 і містка постійного струму 4 визначається температура зразка. Як термостатуючу рідину використовують дистильовану воду або силіконове масло. Опір визначається за допомогою тестера 5.

Порядок виконання роботи

1. Виміряти розміри зразка (довжину l і площу поперечного перерізу S).
2. Скласти коло за схемою (рис. 4.1.2).

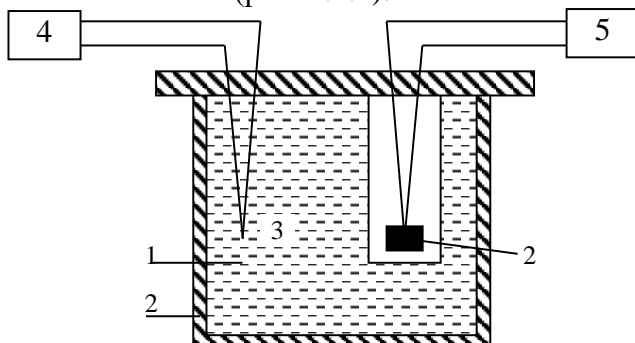


Рис. 4.1.2.

3. Користуючись термометром, визначити температуру, при якій проводиться вимірювання опору, і обчислити питомі провідності напівпровідника при певній температурі як $\gamma = \frac{l}{RS}$.
3. Побудувати графік залежності: $\ln\gamma = f\left(\frac{1}{T}\right)$.
4. Визначити кутовий коефіцієнт прямої з даного графіка і за формулою (4.1.8) обчислити енергію активації.

5. Виконати вимірювання для різноманітних напівпровідників і порівняти їх енергії активації.

Контрольні питання

1. Як опір напівпровідників залежить від температури?
2. Поясніть механізм провідності напівпровідників із точки зору зонної теорії.
3. Покажіть, як електропровідність напівпровідників залежить від температури.
4. Що таке енергія активації? Як її обчислити на практиці?
5. Як визначити температурний коефіцієнт опору напівпровідників? Яким буде його значення (додатнім чи від'ємним)? Чому?
6. Який механізм домішкової провідності напівпровідників?

Задачі для самопідготовки

1. Покажіть, як, маючи значення опорів напівпровідника при температурі $T_1 - R_1$, $T_2 - R_2$ і знаючи його геометричні розміри l і S , знайти енергію активації.
2. Енергія активації кремнію 1,1 еВ. Кремнієвий зразок нагрівають від 0^0 до 10^0C . У скільки разів зросте його електропровідність?

Методичні поради

Теоретичний матеріал цієї лабораторної роботи частково може бути використаний при проведенні уроків із тем „Електропровідність напівпровідників і її залежність від температури”, „Власна і домішкова провідність напівпровідників”. Якщо зразок, виготовлений із напівпровідника, замінити термістором, то установку можна використати при проведенні роботи лабораторного практикуму в 10 кл. із теми „Дослідження залежності опору напівпровідників від температури”.

4.2. Градування термопар. Дослідження термоелектричних явищ

Тема: Градування термопар. Дослідження термоелектричних явищ.

Мета: Дослідити залежність ЕРС термопарі від температури. Визначити сталу термопарі. Визначити теплоту і коефіцієнт Пельтьє.

Обладнання: мідь – константанові термопарі, два джерела струму, два реостати, два амперметри, вольтметр, два калориметри, посудина Дьюра з льодом, гальванометр, нуль-гальванометр, два вимикачі.

Теоретичні відомості

При контакті двох провідників електрони внаслідок теплового руху будуть переходити із одного провідника в інший. Якщо обидва провідники зроблені з різних матеріалів або порушена теплова рівновага, то обидва потоки дифузії електронів будуть неоднакові і один із провідників заряджається позитивно, а інший – негативно. Тому між провідниками виникає електричне поле.

Нехай для двох провідників (зроблених із різного матеріалу), що знаходяться в електричному контакті, температура однакова. Різниця потенціалів між будь-якими точками А і В (рис. 4.2.1), що знаходяться поза провідниками, але розміщені недалеко від їх поверхні, називається зовнішньою контактною різницею потенціалів, або просто контактною різницею потенціалів ($U_{12} = U_1 - U_2$).

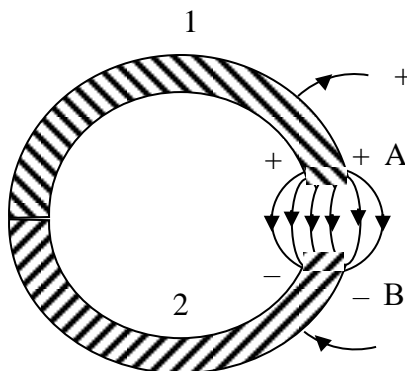


Рис. 4.2.1.

При однаковій температурі в кожній точці провідників густина струму буде однакою $\vec{j} = \gamma \vec{E}$. Але через те що коло розімкнуте, то $j=0$ і потенціал у кожній точці провідника сталий. Отже, електричне поле в

середині провідників може існувати тільки в тонких граничних шарах (провідник 1 – провідник 2; провідник 1(2) – вакуум). Потенціал у цих граничних шарах змінюється стрибкоподібно.

Різниця потенціалів $U_{12}^i = \varphi_1 - \varphi_2$, де φ_1 – потенціал у середині провідника 1, φ_2 – провідника 2. Таку різницю потенціалів називають внутрішньою контактною різницею потенціалів. Це означає, що в приконтактному шарі в результаті тиску електричного газу, який різний у різних провідниках, може виникнути ЕРС. Але якщо температура всього кола однакова, то результуюча ЕРС дорівнює нулю.

Якщо ж температура контактів неоднакова, то результуюча ЕРС кола не дорівнює нулю і при замиканні кола в ній з'являється струм. Виникаюча ЕРС називається термоелектрорушійною силою (термо-ЕРС), а саме явище – термоелектричне.

Розглянемо місце контакту двох металів (рис. 4.2.2.):

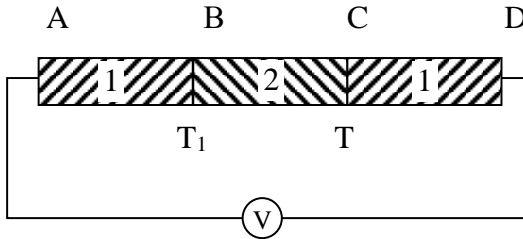


Рис.4.2.2.

Нехай температура в точці В T_1 , а в точці С – T , при чому $T_1 > T$. Температура кінців такої системи (в точках А і Д) дорівнює T . Через те що теплові швидкості електронів поблизу контакту В більші, ніж поблизу контакту С, то в провіднику 2 виникне потік дифузії електронів, спрямований від т.В до т.С. Тому в провіднику 2 (на його поверхні) виникнуть електричні заряди, і в середині провідника утворюється електричне поле такої величини, щоб у певному стані викликаний цим полем струм дрейфу компенсував струм дифузії. Отже, при наявності в провіднику градієнта температури в ньому виникає і градієнт електричного потенціалу. Це явище було відкрите Зеебеком у двадцятих роках XIX ст.

Термо-ЕРС кола, складеного з двох різнорідних провідників 1 і 2, при малій різниці температур ΔT між двома контактами виражається співвідношенням:

$$\Delta \varepsilon = (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T, \quad (4.2.1)$$

де α_1 , α_2 – залежать від природи 1, 2 провідника, а також від температури. Формула (4.2.1) показує, що термо-ЕРС кола є різницею термо-ЕРС кожного плеча кола і що в кожному провіднику виникає термо-ЕРС $\Delta \varepsilon = \alpha_i \Delta T$. Величина:

$$\alpha = \frac{d\varepsilon}{dT} \quad (4.2.2)$$

називається диференціальною термо-ЕРС певної речовини. Вона чисельно дорівнює термо-ЕРС, що виникає в провіднику при різниці температур між його кінцями в 1 К.

При значній різниці температур обох контактів термо-ЕРС дорівнює:

$$\varepsilon = \int_{T_1}^{T_2} (\alpha_1 - \alpha_2) dT, \quad (4.2.3)$$

де T_1 – температура холодного контакту, а T_2 – гарячого. Якщо в цьому температурному інтервалі ($T_1 - T_2$) величини α_1 і α_2 мало змінюються, то отримаємо:

$$\varepsilon = (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot (T_2 - T_1), \quad (4.2.4)$$

тут α_1 і α_2 – середні значення диференціальних термо-ЕРС у цьому температурному інтервалі.

Величина α вважається додатною, якщо струм, що виникає в провіднику, тече від більш нагрітого кінця до холодного.

У контакті, через який проходить струм, у залежності від напрямку струму виділяється або поглинається тепло і контакт або нагрівається, або охолоджується. Це явище отримало назву ефекту Пельтьє. Тепло Пельтьє Q_{II} , що виділяється або поглинається в місці контакту, пропорційне заряду, що пройшов через контакт:

$$Q_{II} = Pq = PIt. \quad (4.2.5)$$

Коефіцієнт P залежить від роду провідників, що перебувають у контакті, і від їх температури і називається

коефіцієнтом Пельтьє. Коефіцієнт Пельтьє чисельно дорівнює кількості теплоти, що виділяється (або поглинається) в місці контакту при проходженні заряду в 1 Кл. Тепло Пельтьє пояснюється тим, що енергія, яка переноситься електронами до контакту в провіднику 1, не дорівнює енергії, яка забирається електронами в провіднику 2.

Термоелектрика широко використовується для вимірювання температур. Із цією метою використовуються термопари. Термопарою називається пристрій з двох різнорідних провідників, зварених або спаяних між собою. В місцях з'єднання провідників підтримується різна температура, при цьому на кінцях провідників виникає термо-ЕРС. Якщо один спай термопари підтримувати при сталій температурі (273 К), а інший нагрівати, то прилад покаже певні значення ЕРС; за цими значеннями будується графік залежності ЕРС термопари від температури. Такий термоелектричний термометр є диференціальною термопарою.

Опис експериментальної установки

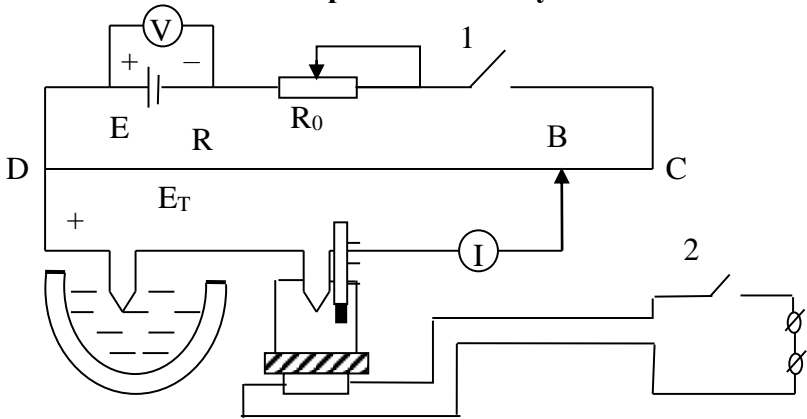


Рис. 4.2.3.

Для визначення ЕРС термопари E_m використовується метод компенсації (рис. 4.2.3). ДС – реохордна лінійка, опір якої R відомий, E – акумуляторна батарея. Переміщуючи повзунок B , досягають такого положення, щоб струм через гальванометр не проходив (тобто $U_{DB} = E_m$). За законом Ома $U_{DB} = IR_{DB}$, а $I = \frac{U}{R_0 + R}$,

де U спад напруги в зовнішньому колі, який визначається вольтметром. Отже:

$$\varepsilon_T = U_{DB} = \frac{UR_{DB}}{R + R_0}.$$

Але через те що $R/R_{DB} = l/l_{DB}$, то $R_{DB} = R \frac{l_{DB}}{l}$. Остаточно

отримаємо:

$$\varepsilon_T = \frac{UR}{R_0 + R} \cdot \frac{l_{DB}}{l}. \quad (4.2.6)$$

Для визначення коефіцієнта Пельтьє і теплоти Пельтьє, яка виділяється в одиниці часу, використовується експериментальна установка (рис. 4.2.4.). В установці використовується два калориметри, в першому виділяється кількість теплоти Q_1 , а в другому - Q_2 .

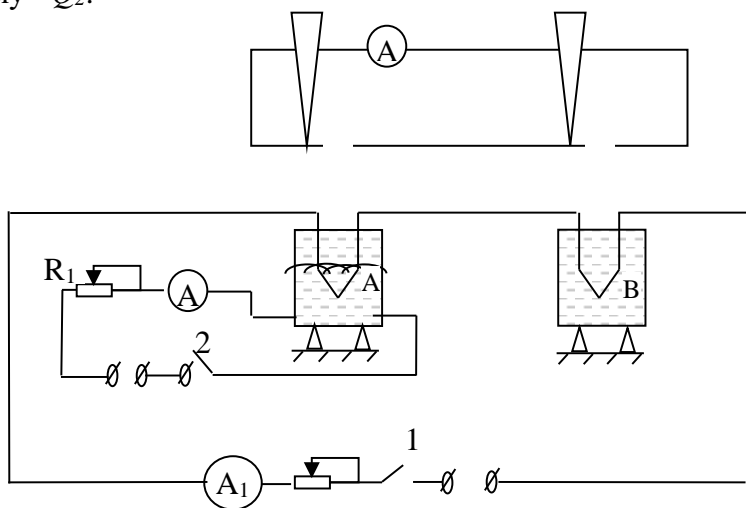


Рис. 4.2.4.

Нехай у результаті ефекту Пельтьє правий спай нагрівається, а лівий охолоджується. За допомогою реостата R_1 струм у нагрівнику підібрати таким чином, щоб установилася теплова рівновага, тобто кількість теплоти, що виділяється в нагрівнику Н дорівнює кількості теплоти, що відбирається в результаті ефекту Пельтьє. При цьому температура спаїв А і В термопарі однакова. Струм у гальванометрі відсутній. Різниця

двох повних теплот $Q_1 - Q_2$ дорівнює кількості теплоти, що виділяється в нагрівнику:

$$Q_1 - Q_2 = I_H^2 R_H \tau . \quad (4.2.7)$$

З іншого боку, теплота Пельтьє в одному калориметрі виділяється, а в другому поглинається: $Q_1 = I^2 R \tau + \Pi \tau$;
 $Q_2 = I^2 R \tau - \Pi \tau$.

Отже:
$$Q_1 - Q_2 = 2\Pi \tau \quad (4.2.8)$$

Прирівнявши праві частини рівності (4.2.7) і (4.2.8), отримаємо:
$$2\Pi \tau = I_H^2 R_H \tau . \quad (4.2.9)$$

Звідки
$$\Pi = \frac{I_H^2 R_H}{I} , \quad (4.2.10)$$

де I_H , I – сила струму, який проходить відповідно через нагрівник і термопару зі спаями А і В.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 4.2.3. Один спай термопару помістити в посудину Дьюора з льодом.
2. Замкнути вимикач 2 і підігріти другий спай термопару до 363 К. Розімкнути вимикач і почекати, поки припиниться підвищення температури в посудині.
3. Рухомим повзунком у реохорді встановити нуль на гальванометрі. Визначити покази термометра, вольтметра і відстань $l_{ДВ}$ і за формулою (4.2.6) визначити ЕРС
4. Вимірювання проводити через кожні 5 К при зниженні температури до кімнатної. Побудувати графік залежності $E_m = f(T)$.
5. Вибрати на графіку прямолінійні ділянки залежності E_m від T і визначити величину α (формула 4.2.2), яка дорівнює тангенсу нахилу прямої $E_m = f(T)$ до осі T .
6. Скласти електричне коло за схемою рис. 4.2.4. Замкнути вимикачем 1 коло і встановити певну силу струму. Досягнути стаціонарного режиму роботи термопару (стрілка гальванометра повинна зупинитися).
7. Увести реостат R_1 і замкнути вимикачем коло нагрівника. Реостатом ступінчасто змінювати силу струму I_H до тих пір,

поки нульове положення стрілки гальванометра не буде змінюватися.

8. Записати покази амперметра $A_1(I_0)$ та $A_2(I_n)$ і обчислити за формулою (4.2.10) і (4.2.7) коефіцієнт і теплоту Пельтьє.

Контрольні питання

1. Що таке контактна різниця потенціалів? Коли вона виникає?
2. При яких умовах можливе виникнення термо-ЕРС? Запишіть формулу для визначення термо-ЕРС
3. Що називається диференціальною термо-ЕРС? Які одиниці вимірювання цієї величини?
4. У чому полягає суть ефекту Пельтьє?
5. Виведіть формулу для обчислення термо-ЕРС компенсаційним методом.
6. Виведіть формулу для обчислення коефіцієнта Пельтьє в цій лабораторній роботі.

Задачі для самопідготовки

1. Чому дорівнює сума стрибка потенціалів, якщо: а) два різних метали мають один контакт; б) два різних метали мають два контакти при однаковій температурі (замкнуте коло); в) два різних метали мають два контакти при різних температурах (коло замкнуте).
2. У якому напрямку піде струм у гарячому спаї в термопарі залізо-константан, залізо-мідь, мідь-константан?

Методичні поради

Теоретичний матеріал цієї лабораторної роботи можна використати при вивченні теми "Струм у різних середовищах" у класах із поглибленим вивченням фізики або на факультативних заняттях.

4.3. Дослідження термоелектронної емісії

Тема: дослідження явища термоелектронної емісії.

Мета: дослідити вольт–амперну характеристику вакуумного діода, визначити роботу виходу електрона з вольфраму.

Обладнання: касета ФПЕ-06, джерело живлення, цифровий вольтметр.

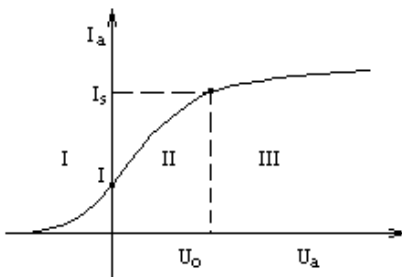
Теоретичні відомості

Явище виривання електронів із металу називається емісією. Емісія зумовлена тепловим рухом електронів, називається термоелектронною.

З підвищенням температури металу кінетична енергія теплового руху електронів може досягти величини, що дорівнює або більша за величину роботи виходу електрона з металу. Такі електрони здатні подолати затримуючий потенціал на межі металу і вакууму і вириваються (емісують) із металу, утворюючи навколо нього електронну хмару. Якщо у вакуумі, де знаходиться розжарений метал, існує електричне поле, напруженість якого спрямована до поверхні металу, то виникає електричний струм.

Це явище можна спостерігати за допомогою вакуумної лампи з двома електродами, яка називається діодом.

Один із електродів–катод, що є дротиною з тугоплавкого металу, яка розжарюється електричним струмом. Другий електрод – анод, який збирає термоелектрони.



Сила термоелектронного струму в діоді залежить від величини потенціалу анода відносно катода. Крива, яка відображає залежність сили струму в діоді від анодної напруги $I_a = I(U_a)$, зображена на рис. 4.3.1, називається вольт-

Рис. 4.3.1.
проходить через діод, називається струмом насичення I_s . Незначне збільшення струму на цій ділянці за законом:

$$I_a = I_s l \frac{\text{const} \sqrt{U_a}}{RT}.$$

пов'язане з тим, що при збільшенні прискорюючої різниці потенціалів зменшується робота виходу електронів із катода (ефект Шотткі).

Електрони, які рухаються у вакуумному просторі діода, створюють у ньому від'ємний просторовий заряд, поле якого E_{np} накладається на зовнішнє поле E , між анодом і катодом.

Поле E_{np} буде гальмувати термоелектрони в області, яка прилягає до катода, і прискорювати їх поблизу анода.

У режимі струму насичення внаслідок зменшення концентрації електронів в області просторового заряду, результуюче поле $\vec{E} + \vec{E}_{np}$ буде прискорювати електрони протягом усього вакуумного простору. При зменшенні анодної напруги U_a буде зменшуватись і E , при цьому деякому значенню $U_a = U_0$ сумарне поле катода буде дорівнювати нулю, а при ще менших значеннях U_a воно стане гальмівним поблизу катода. Внаслідок цього струм I_a буде меншим за I_s . Залежність термоелектронного струму від анодної напруги коли $U_a < U_0$, описується законом Богуславського – Ленгмюра (обл.2):

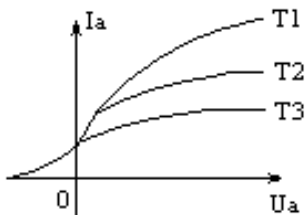
$$I_a = B U_a^{3/2}, \quad (4.3.1)$$

де B - постійна величина, що залежить від форми і розмірів електродів діода.

При дальшому зменшенні потенціалу анода поле $\vec{E} + \vec{E}_{np}$ буде гальмівним у всьому вакуумному просторі.

На анод будуть потрапляти тільки ті електрони, початкова кінетична енергія яких достатня для подолання зовнішнього затримуючого потенціалу. Залежність I_a від U_a буде визначатись геометрією електродів і законом розподілу термоелектронів за початковими швидкостями (обл. 1). Цю частину вольт-амперної характеристики називають "кривою затримки".

Вольт-амперні характеристики вакуумного діода для різних температур розжарення катода (рис. 4.3.2) вказують на залежність струму насичення від температури (T_1, T_2, T_3). Струм насичення



характеризують його густиною. Рис. 4.3.2.

Густина струму насичення залежить від матеріалу катода і збільшується з підвищенням температури за законом Річардсона – Дешмана:

$$J_s = DT^2 \exp\left[-\frac{A}{KT}\right], \quad (4.3.2)$$

де T – температура катода, A – робота виходу електрона, K – стала Больцмана, D – термоелектронна стала, однакова для всіх металів:

$$D = 1,2 \cdot 10^6 \text{ A}/(\text{m}^2 \text{K}^2).$$

Прологарифмувавши (4.3.2) і врахувавши, що:

$$I_s = J_s S, \quad (4.3.3)$$

отримаємо:

$$\ln \frac{I_s}{T^2} \ln(DS) - \frac{A}{KT} \ln e = \text{const} - \frac{5035}{T} A(\text{eV}). \quad (4.3.4)$$

Кутовий коефіцієнт прямої на графіку залежності:

$$\ln\left(\frac{I_s}{T^2}\right) = f\left(\frac{5035}{T}\right).$$

дає значення роботи виходу електронів $A = tg \alpha$, а екстраполяція цієї прямої до $5035/T$ – дає значення $\ln(DS)$, а відповідно і D . Визначивши дослідним шляхом залежність $I_s(t)$, можна розрахувати роботу виходу A матеріалу катода. Цей метод визначення роботи виходу електронів називається методом прямої Річардсона. Формула (4.3.2) виводиться з припущення, що електрони в металі підкоряються законам ідеального газу, і всі випущені катодом термоелектрони досягають анода. Як видно із (4.3.2), при низьких температурах ($T \ll \frac{A}{K}$), $e^{-\frac{A}{KT}} \ll 1$ емісія практично відсутня.

Струм насичення різко збільшується із підвищенням температури, через те що визначається головним чином множником $\exp\left(-\frac{A}{KT}\right)$, який залежить від температури. Розрахунок температури катода

для певного струму розжарення може бути проведений шляхом розгляду теплової рівноваги катода. Майже вся тепла потужність, яка виділяється на катоді, йде на теплове випромінювання. Деяка кількість тепла втрачається через теплопровідність, через контакти катода і газів, що залишилися у вакуумній лампі. Але при високих температурах частка цих втрат досить мала. Рівняння теплового балансу для катодної нитки буде мати вигляд:

$$\frac{1}{2}N(T)\pi dl = I_p^2 \rho(T) \frac{l}{\pi d^2}, \quad (4.3.5)$$

де $N(T)$ —потужність, що випромінюється за 1 с з 1 см^2 поверхні катода, I_p —струм розжарення, l , d —довжина і діаметр катода, $\rho(T)$ —питомий опір металу при певній температурі T .

З (4.3.5) випливає, що температурі T відповідає струм розжарення:

$$I_p = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{N(T)}{\rho(T)}} d^2. \quad (4.3.6).$$

Вимірюючи потужність випромінювання і знаючи залежність питомого опору $\rho(T)$ від температури, можна визначити температуру катода в залежності від струму розжарення.

Опис експериментальної установки

Блок-схему експериментальної установки подано на рис. 4.3.3.

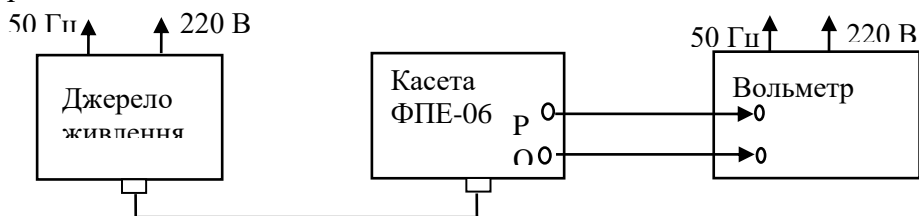


Рис. 4.3.3.

Розжарення катода відбувається за рахунок пропускання через нього стабілізованого постійного струму. Сила струму розжарення регулюється потенціометром на каналі джерела живлення і контролюється амперметром. Анодне коло діода живиться постійною напругою $12 \div 110 \text{ В}$, яка регулюється

потенціометром на панелі джерела живлення і контролюється вольтметром. В анодне коло лампи підключають цифровий вольтметр РА, за допомогою якого можна фіксувати анодний струм.

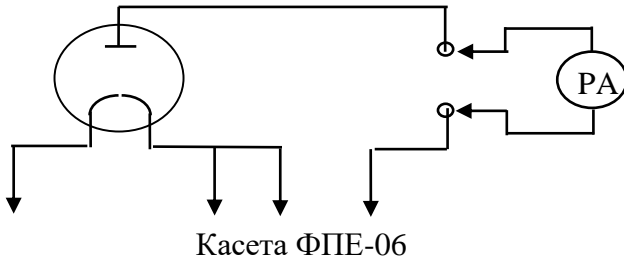


Рис. 4.3.4.

Порядок виконання роботи

1. Скласти схему згідно з рис. 4.3.3.
2. Дослідити залежність анодного струму від анодної напруги при струмах розжарення $I_p=1,3; 1,5; 1,7$ А.
3. За даними спостережень побудувати вольт–амперні характеристики $I_A=f(U_A)$ і визначити струм насичення вакуумного діода.
4. При напрузі насичення дослідити залежність термоелектронного струму від струму розжарення катода (струм розжарення змінювати від 1,5 до 2,0 А.)
5. За допомогою таблиці методом інтерполяції визначити температуру катода для одержаних значень струму розжарення. Дані спостережень занести в таблицю.

N n/n	I_p, A	I_s, NA	T, K

6. Побудувати графік залежності $lg(I_s/T^2)=f(5035/T)$ і розрахувати роботу виходу електронів із вольфраму за графіком:
7. Обчислити похибку визначення роботи виходу і зробити висновки.

Контрольні питання

1. У чому полягає явище термоелектронної емісії?
2. Яка конструкція діода? Яка його вольт-амперна характеристика?
3. Поясніть області вольт–амперної характеристики діода?

4. Яка залежність густини струму насичення від температури? У чому полягає фізичний зміст закону Річардсона–Дешмана?
5. У чому полягає суть методу визначення роботи виходу за струмом насичення?
6. Як можна розрахувати температуру катода за струмом його розжарення?

Задачі для самоконтролю

1. В електронній лампі струм насичення досягає значення 2,85 мкА при температурі вольфрамового волоска катода 2300 К. Знайти діаметр волоска катода, якщо його довжина 2 см.
2. У скільки разів зміниться питома термоелектронна емісія вольфраму, який має температуру 2500 К, якщо вона підвищиться на 150 К?

Методичні поради

Теоретичний матеріал цієї лабораторної роботи можна використати при вивченні теми "Електричний струм у вакуумі" в 10 класі.

4.4. Зняття анодної і сіткової характеристик електронних ламп

Тема: Зняття анодної і сіткової характеристик електронних ламп.

Мета: Зняти анодну і сіткову характеристику вакуумних ламп і розрахувати їх параметри.

Прилади і матеріали: двохелектродна електронна лампа; трьохелектродна електронна лампа типу 6Н8С; випрямлювач на 250 В типу ВУП; випрямлювач на 50 В; реостат РПШ-02 (5000 Ом; 0,2 А); вольтамперметр типу М 253; міліамперметр із межами вимірювання 0-30 мА і 0 – 5 А (для постійного струму); вольтметри з межами вимірювання 0-300 В, 0 – 10 В типу Э-59, Э-515, АСТ-Т; вимикачі.

Теоретичні відомості

До основних параметрів діода і тріода належать: крутість характеристики і внутрішній опір діода, коефіцієнт підсилення, крутість сіткової характеристики, внутрішній опір тріода. Крутість

характеристики S – це відношення приросту анодного струму ΔI_A до приросту анодної напруги ΔU_A :

$$S = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_A}. \quad (4.4.1)$$

Внутрішній опір діода R_i - це відношення приросту анодної напруги до приросту анодного струму:

$$R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A}. \quad (4.4.2)$$

Потужність, яка розсіюється на аноді:

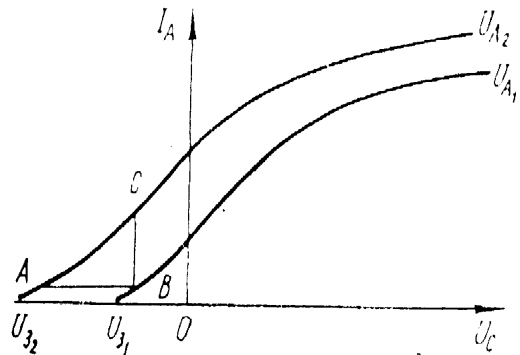
$$P_A = I_A U_A. \quad (4.4.3)$$

Двохелектродні лампи набули широкого застосування для випрямлення змінного струму та детектування модульованих електромагнітних коливань.

Досить часто виникає потреба підсилення змінного струму чи напруги. Для цього використовують трьохелектродні лампи – триоди. В триодах між анодом і катодом розміщується третій електрод, який дістав назву керуючої сітки. Між сіткою і катодом прикладається так званна сіткова напруга. Оскільки сітка розміщена ближче до катода і певною мірою "екранує" вплив анода на катод, то незначна зміна потенціалу на ній досить сильно впливає на силу анодного струму. Отже, якщо на сітку подати навіть невеликий позитивний потенціал – електрони прискорюватимуться, і навпаки, навіть незначний негативний потенціал гальмуватиме електрони. При деякому негативному значенні потенціалу електрони практично не досягатимуть анода лампи, кажуть: лампа запірня.

Графіки, які визначають залежність анодного струму I_A від напруги на сітці U_s при сталій анодній напрузі ($U_A = const$), називаються сітковими характеристиками лампи (рис. 4.4.1).

Для різних анодних напруг U_A запірний потенціал (U_3) різний (рис. 4.4.1). Для більших



анодних напруг запірний потенціал більший. Тому для різних значень напруг можна дістати так зване сімейство сіткових характеристик, з яких визначаються основні параметри тріода: крутість сіткової характеристики S , внутрішній опір R_i і коефіцієнт підсилення μ .

Для визначення параметрів лампи методом трьох точок треба на прямолінійній ділянці двох сіткових характеристик побудувати характеристичний трикутник ABC (рис. 4.4.1). Сторона AB визначає зміну напруги на сітці лампи ΔU_C , BC - зміну анодного струму ΔI_A . Визначивши величину $\Delta U_A = \Delta U_{A_2} - \Delta U_{A_1}$, можна обчислити параметри лампи.

Крутість сіткової характеристики є показником ступеня підсилення лампи і визначається як тангенс кута нахилу характеристики :

$$S = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_C} = \frac{CB}{AB}. \quad (4.4.4)$$

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

$$R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} = \frac{U_{A_2} - U_{A_1}}{BC}. \quad (4.4.5)$$

Коефіцієнт підсилення μ дорівнює відношенню зміни анодної напруги ΔU_A до зміни напруги на керуючій сітці, які спричиняють ту саму зміну анодного струму:

$$\mu = \frac{\Delta U_A}{\Delta U_C} \quad \text{при } I_A = \text{const}. \quad (4.4.6)$$

Величина, обернена до коефіцієнта підсилення, називається проникністю лампи:

$$D = \frac{1}{\mu}.$$

Розглянуті характеристики належать до так званого статистичного режиму роботи лампи, тобто такого, коли в анодному колі немає анодного навантаження. При наявності

анодного навантаження параметри лампи і режими її роботи називають динамічними.

Опис експериментальної установки

На рис. 4.4.2 зображено схему зняття вольт-амперної характеристики діода і визначення його параметрів. Схема складається з двох незалежних кіл: анодного і кола розжарення катода.

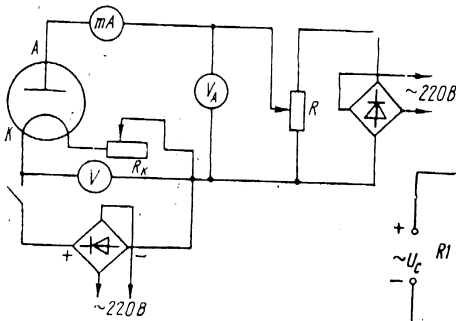


Рис. 4.4.2.

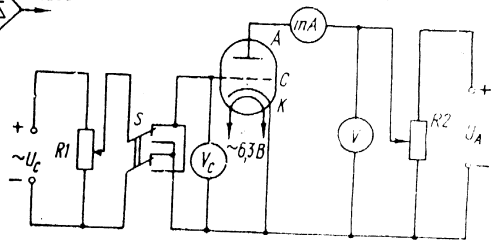


Рис. 4.4.3.

На рис. 4.4.3 зображено схему для визначення основних параметрів тріода і зняття анодних та сіткових характеристик. R_1 , R_2 - подільники напруги; S – перемикач, яким можна змінювати знак потенціалу на сітці лампи.

Порядок виконання роботи

I. Зняти анодну характеристику діода.

1. Скласти коло за схемою рис. 4.4.2, дотримуючись полярності.
2. Замкнути вимикачем коло розжарення катода лампи і встановити за допомогою реостата сталу напругу розжарення.
3. Збільшуючи анодну напругу через 5–10 В, зафіксувати покази міліамперметра. Дані занести до таблиці. Стежити, щоб анодний струм досяг максимуму.
4. Побудувати анодну характеристику лампи. Вибрати прямулінійну ділянку на графіку $I_A=f(U_A)$, побудувати трикутник (рис. 4.4.1) і визначити крутість та внутрішній опір кенотрона за формулами (4.4.1), (4.4.2).

II. Зняти характеристику тріода.

1. Скласти коло за схемою рис. 4.4.3, дотримуючись полярності.

2. Зняти сіткові характеристики при двох значеннях анодної напруги: 80 і 120 В.
3. Подільником напруги R_I досягнути відсутності анодного струму. Записати покази вольтметра U_C . Потім, збільшуючи напругу на сітці через 0,5-1 В, записати покази міліамперметра в анодному колі. Дані занести до таблиці.
4. Подати на керуючу сітку невеликий позитивний потенціал (наприклад, 2 або 3 В). Змінюючи анодну напругу через 5–10 В, фіксувати покази міліамперметра в анодному колі. Дані занести до таблиці. Стежити, щоб анодний струм досяг максимуму.
5. Побудувати графіки $I_A=f(U_C)$ та $I_C=f(U_A)$.
6. Із графіків сіткових характеристик визначити за формулами (4.4.4), (4.4.5), (4.4.6) параметри лампи.

Контрольні питання

1. Які будова і принцип дії вакуумного діода та тріода ?
2. Які основні параметри діода та тріода ?
3. У чому суть явища термоелектронної емісії ? Чим визначається термоелектронний струм насичення ?
4. Як формулюється закон трьох других ? Поясніть його.
5. Яка роль негативного об'ємного заряду ("електронної хмарки")?
6. Яка умова потрапляння електронів на анод?

Задачі для самоконтролю

1. Знайти скрученість характеристики трьохелектродної лампи і середній внутрішній опір її на ділянці зміни анодної напруги від 55 до 80 В, що зумовлює зміну анодного струму від 40 до 70 мА, якщо коефіцієнт підсилення дорівнює 10.
2. Трьохелектродна лампа має внутрішній опір 3 кОм і скрученість характеристики 3 мА/В. Знайти коефіцієнт її підсилення.

Методичні поради

Ця лабораторна робота може бути проведена як робота фізичного практикуму в 10 класі з теми "Електричний струм у вакуумі".

4.5. Вивчення процесів електролізу

Тема: Вивчення електролізу.

Мета: Перевірити закони Фарадея для електролізу та визначити заряд одновалентного іона.

Обладнання: Джерело напруги, електролітична ванна з 10% розчином мідного купоросу, амперметр, реостат, секундомір, терези, вимикач.

Теоретичні відомості

Електролітами називаються речовини, молекули яких складаються з іонів протилежних знаків, що утримуються один біля одного кулонівськими силами тяжіння і розчини яких проводять електричний струм. До електролітів відносяться кислоти, солі, основи. При розчиненні електролітів, наприклад, у воді, значна частина молекул у розчині розпадається на іони. Порівняно невелика кінетична енергія молекул, зумовлена їх тепловим рухом, достатня для того, щоб викликати дисоціацію електроліту. Це явище називається електролітичною дисоціацією. Електричний струм в електролітах супроводжується явищем електролізу-виділенням на електродах складових частин розчинених речовин або інших речовин, що є результатом вторинних реакцій на електродах.

Опустимо в розчин мідного купоросу мідні електроди і під'єднаємо їх до джерела струму. Іони Cu^{2+} рухатимуться до катода, і на ньому виділятиметься чиста мідь. Іони SO_4^{2-} , втративши заряд на аноді, вступають у хімічну взаємодію: $\text{Cu}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} = \text{CuSO}_4$. Таким чином, концентрація розчину не змінюється і в результаті електролізу мідь переноситься з анода на катод.

Основні закони електролізу були експериментально встановлені М.Фарадеєм у 1834 році. Перший закон Фарадея неважко встановити, виходячи з таких міркувань: маса речовини, що виділяється на електроді за певний час t , дорівнює $m = m_0 N_i$, де m_0 - маса одного іона, N_i - кількість іонів, що досягли електрода за час t . Тоді масу іона знаходять, знаючи молярну масу $m_0 = \frac{\mu}{N_a}$, а

кількість іонів, які досягли електрода $N_i = \frac{q}{q_0}$, де q - загальний заряд, що пройшов через електроліт за час t , $q_0 = ne$, тоді :

$$m = \frac{\mu}{neN_a} It . \quad (4.5.1)$$

Позначивши $k = \frac{\mu}{neN_a}$, запишемо рівняння (4.5.1) у вигляді:

$$m = kIt . \quad (4.5.2)$$

Рівняння (4.5.2) і виражає перший закон Фарадея: маса речовини, яка виділяється на електродах, пропорційна електричному заряду, що переноситься через електроліт. Коефіцієнт пропорційності k називається електрохімічним еквівалентом і має такий фізичний зміст: він чисельно дорівнює масі речовини, що виділяється при проходженні через електроліт одиничного заряду. Електрохімічний еквівалент залежить від хімічної природи речовини. Проаналізуємо вираз $k = \frac{\mu}{n} \frac{I}{eN_a}$.

Відношення молярної маси до валентності називається хімічним еквівалентом іона, а величина $eN_a = F$ - стала і носить назву постійної Фарадея. Тоді:

$$k = \frac{1}{F} \frac{\mu}{n} . \quad (4.5.3)$$

Можемо сформулювати другий закон Фарадея: електрохімічний еквівалент пропорційний хімічному еквіваленту, або цей закон можна сформулювати і так: електрохімічні еквіваленти різних речовин відносяться як їх хімічні еквіваленти. Тепер можемо отримати об'єднаний закон Фарадея:

$$m = \frac{1}{F} \frac{\mu}{n} It . \quad (4.5.4)$$

Із рівності (4.5.4) неважко встановити фізичний зміст сталої Фарадея: стала Фарадея чисельно дорівнює заряду, при проходженні якого через електроліт на електроді виділяється речовина, маса якої рівна хімічному еквіваленту. Знаючи

електрохімічний еквівалент або сталу Фарадея, неважко визначити елементарний заряд:

$$e = \frac{\mu}{nN_a k}$$

або
$$e = \frac{F}{N_a} . \quad (4.5.5)$$

Опис експериментальної установки

Схема установки для вивчення законів електролізу і визначення елементарного заряду показана на рис.4.5.1. В електролітичну ванну поміщаються електроди: анод А та катод К. Для підтримування сталої сили струму в колі використовується реостат R, а сила струму контролюється за допомогою амперметра. Час контролюється секундоміром.

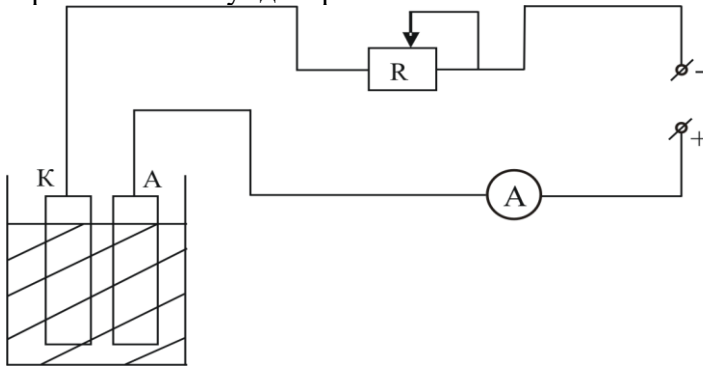


Рис. 4.5.1.

У цій експериментальній установці можна використовувати набір електролітичних ванн із різними розчинами електролітів, що дає змогу визначити електрохімічні еквіваленти цілого ряду речовин.

Порядок виконання роботи

1. Ретельно очистити електроди, промити, висушити і зважити їх на терезах (проробляти це перед кожним новим дослідом).
2. Скласти електричне коло за схемою рис. 4.5.1. За допомогою реостата встановити робочу силу струму і підтримувати її незмінною протягом усього часу проведення експерименту (20-30 хв).

3. Увімкнути одночасно коло і секундомір. Висушити і зважити катод і, знаючи масу катода до електролізу і після цього, визначити масу речовини, що виділилася на електроді ($m = m_2 - m_1$).
4. Обчислити електрохімічний еквівалент за формулою:

$$k = \frac{m_2 - m_1}{It}.$$
5. Обчислити заряд електрона за формулою (4.5.5).
6. Проробити аналогічні експерименти для інших розчинів електролітів.
7. Перевірити другий закон Фарадея, порівнявши електрохімічні та хімічні еквіваленти двох різних розчинів.

Контрольні питання

1. Виведіть і сформулюйте перший закон Фарадея.
2. Фізичний зміст і одиниці електрохімічного еквівалента.
3. Сформулюйте і запишіть другий закон Фарадея.
4. Фізичний зміст числа Фарадея.
5. Виведіть формулу для визначення елементарного заряду, використавши закони Фарадея.
6. Наведіть приклади використання електролізу.

Задачі для самопідготовки

1. Через розчин мідного купоросу пропускають струм, що змінюється за лінійним законом $I=(10-0,02t)A$. Скільки міді виділиться на катоді через 200 с після того, як струм почне змінюватися?
2. Дві електролітичні ванни з'єднані послідовно. В першій виділяється цинк масою $m_1=3,9$ г, а в другій виділяється залізо масою $m_2=2,24$ г. Цинк двовалентний. Яка валентність заліза?

Методичні поради

Теоретичний матеріал цієї лабораторної роботи можна використати на уроках у 10-х класах з теми "Закон електролізу", а лабораторна робота може бути проведена в 10 класі як лабораторна робота з теми "Визначення заряду електрона".

4.6. Дослідження температурної і концентраційної залежності опору електролітів

Тема: Дослідження температурної і концентраційної залежності опору електролітів.

Мета: Визначити опір електроліту і дослідити залежність такого опору від концентрації і температури. Знайти питомий опір і питому провідність електролітів і визначити температурний коефіцієнт опору для різних інтервалів температури.

Обладнання: термостат, U-подібна трубка, набір електролітів різної концентрації, реохордний місток типу Р-38.

Теоретичні відомості

Електричний струм в електролітах і металах має багато спільного, а саме: в електролітах і металах вільні носії заряду утворюються незалежно від електричного струму; об'ємний заряд в електролітах, так само як і в металах, дорівнює нулю; концентрація іонів (позитивних і негативних) на значних відстанях від електродів однакова в різних точках електроліту. Внаслідок такого розподілу іонів градієнт концентрації іонів в електроліті дорівнює нулю і дифузія іонів не зумовлює і не впливає на виникнення струму.

Повна густина струму зумовлена рухом позитивних і негативних іонів (дрейфом) і може бути обчислена як:

$$j = j_+ + j_- = n_+ e v_+ + n_- e v_- , \quad (4.6.1)$$

де n_+ , n_- – концентрація позитивних і негативних іонів, v_+ , v_- – швидкість руху, e – заряд іона.

Концентрацію позитивних і негативних іонів можна обчислити, знаючи коефіцієнт дисоціації α і загальне число молекул в одиниці об'єму n . Тоді:

$$n_+ = n_- = \alpha n . \quad (4.6.2)$$

Швидкість руху іонів можна виразити через їх рухомість b_+ і b_- , напруженість поля:

$$v_+ = b_+ E ; \quad v_- = b_- E . \quad (4.6.3)$$

Враховавши співвідношення (4.6.2) і (4.6.3), запишемо закон Ома для електролітів:

$$j = ne\alpha(b_+ + b_-)E . \quad (4.6.4)$$

Співставляючи рівність (4.6.4) із законом Ома, записаним у диференціальній формі: $j = \gamma E$, де γ – електрична провідність, отримаємо:

$$\gamma = ne\alpha(b_+ + b_-). \quad (4.6.5)$$

Питомий опір електролітів знайдемо як:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{ne\alpha(b_+ + b_-)}. \quad (4.6.6)$$

Отже, чим більший коефіцієнт дисоціації і чим більша рухомість іонів, тим менший питомий опір.

Питомий опір електролітів із підвищенням температури зменшується. Це пояснюється тим, що з підвищенням температури зростає ступінь дисоціації α , зростає рухливість іонів, через те що зменшується в'язкість. Залежність ρ від концентрації розчину має складний характер, тому що при зміні концентрації змінюється ступінь дисоціації і рухомість іонів. При малих концентраціях d і b_+ , b_- – мало змінюються, тому ρ зменшується обернено пропорційно концентрації. При подальшому зростанні концентрації ρ досягає мінімуму, а потім зростає, через те що α , b_+ , b_- – зменшуються.

Електричний опір електроліту при будь-якій температурі можна визначити за формулою:

$$R = R_0 [1 + \alpha_t (t - t_0)]. \quad (4.6.7)$$

Опис експериментальної установки

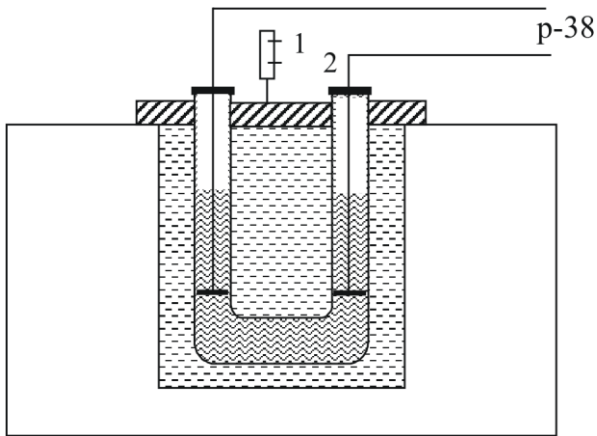


Рис. 4.6.1.

Схему установки показано на рис. 4.6.1. Вимірювання опору електроліту проводиться реохордним містком Р-38 на змінному струмі, що дає змогу уникнути явища поляризації електродів. У-подібну трубку однакового поперечного перерізу поміщають у спеціальну посудину, яку вставляють у термостат. Електроди в У-подібній трубці можуть вільно переміщуватися в затискачах разом із покажчиком 2. За допомогою покажчика 2 і лінійки 1, закріпленої нерухомо на кришці, можна знаходити відстань, на яку перемістилися електроди. Як термостатуюча рідина використовується дистильована вода або силіконове масло. Користуючись мішалкою, забезпечують рівномірне прогрівання рідини в посудині. Температуру визначають за допомогою термометра.

Порядок виконання роботи

1. Визначити, користуючись мікрометром або штангенциркулем, площу внутрішнього поперечного перерізу U-подібної трубки S .
2. Скласти коло за схемою рис. 4.6.1. Заповнити U-подібну трубку електролітом найменшої концентрації.
3. Увімкнути живлення термостата і при кімнатній температурі виміряти опір електроліту при двох різних положеннях покажчика відносно нульового рівня – Δl_1 і Δl_2 .

4. Обчислити питомий опір за формулою $\rho = \frac{(R_2 - R_1)S}{\Delta l_2 - \Delta l_1}$ і питому

$$\text{провідність } \gamma = \frac{1}{\rho}.$$

5. Провести експеримент не менше 5 разів для різних значень Δl_1 і Δl_2 . Обчислити середнє значення ρ і γ при кімнатній температурі.

6. Змінюючи в U-подібній трубці електроліти різних концентрацій, провести обчислення ρ і γ при кімнатній температурі і побудувати графік залежності $\gamma = f(c)$, де c концентрація електроліту.

7. Для вибраної концентрації дослідити залежність R від T (температури), побудувати графік залежності $R = \psi(T)$ і за

формулою $\alpha_t = \frac{R - R_0}{R_0(t - t_0)}$ визначити температурний коефіцієнт

опору для різних інтервалів температур.

Контрольні питання

1. Що спільного між електричним струмом у металах і електролітах?

2. Виведіть закон Ома в диференціальній формі для електролітів.

3. Доведіть, що в цій лабораторній роботі питомий опір можна обчислити за формулою $\rho = \frac{(R_2 - R_1)S}{\Delta l_2 - \Delta l_1}$.

4. Від чого залежить питомий опір електролітів? Чому?

5. Чи залежить для електролітів температурний коефіцієнт опору від температури і концентрації?

6. Чому в лабораторній роботі вимірювання опорів здійснюється реохордним містком на змінному струмі?

Задачі для самопідготовки

1. Коефіцієнт дисоціації розчину нітрату срібла з концентрацією 30 кг/м³ дорівнює 40%. Знайти питому електропровідність цього розчину при 20°C.

2. Коефіцієнт дисоціації водяного розчину хлориду калію 78%. Знайти концентрацію розчину, якщо питомий опір його 75 м·Ом·м.

Методичні поради

Цю роботу можна проводити як роботу фізичного практикуму в 10 класі при вивченні теми "Електричний струм у різних середовищах".

Розділ V. Лабораторні роботи змістового модуля "Магнітне поле. Магнітні властивості речовини"

5.1. Дослідження силових характеристик магнітного поля

Тема: Дослідження силових характеристик магнітного поля.

Мета: Визначити основні характеристики магнітного поля соленоїда і дослідити залежність напруженості поля від координати.

Обладнання: джерело постійного струму, балістичний гальванометр, соленоїд із вимірювальною котушкою, амперметр, реостат, вимикачі.

Теоретичні відомості

Магнітне поле виникає навколо провідника зі струмом, і в свою чергу магнітне поле діє на провідник із струмом. Результати дослідів Ампера показали здатність магнітного поля викликати появу механічної сили, що діє на який-небудь елемент струму. Цю силу кількісно можна описати, задаючи в кожній точці поля деякий вектор \vec{B} . При цьому сила, що діє на елемент струму $i d\vec{l}$, дорівнює:

$$d\vec{F} = i [d\vec{l}, \vec{B}]. \quad (5.1.1)$$

Величина \vec{B} називається магнітною індукцією і є основною характеристикою магнітного поля. Із співвідношення (5.1.1) випливає, що вектор магнітної індукції чисельно дорівнює силі, що

діє з боку магнітного поля на елемент струму, що дорівнює одиниці. Якщо маємо прямолінійний відрізок провідника і магнітна індукція в усіх точках постійна, то отримуємо:

$$\vec{F} = i[\vec{l}, \vec{B}] \quad (5.1.2)$$

або $F = ilB\sin(\vec{l}, \vec{B})$.

Напрямок сили \vec{F} можна визначити за правилом лівої руки або правилом правого свердла. Напрямок сили \vec{F} перпендикулярний до \vec{l} і \vec{B} . У випадку, коли магнітне поле створюється декількома контурами струму, кожен із яких створює власне магнітне поле магнітної індукції B_1, B_2 і т.п., то магнітна індукція результуючого поля дорівнює векторній сумі індукцій:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n = \sum \vec{B}_i \quad (5.1.3)$$

Для опису магнітного поля поряд із магнітною індукцією використовується ще одна характеристика - напруженість магнітного поля. Ці характеристики пов'язані між собою співвідношенням:

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}, \quad (5.1.4)$$

де μ - магнітна проникливість середовища; μ_0 - магнітна стала.

Магнітна індукція поля обчислюється за законом Біо-Савара-Лапласа:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{[d\vec{l}_1, \vec{r}]}{r^3}. \quad (5.1.5)$$

Із рівності (5.1.5) випливає, що магнітна індукція поля, створеного у вакуумі струмом і що протікає по провіднику кінцевої довжини і будь-якої форми, дорівнює:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int \frac{[d\vec{l}_1, \vec{r}]}{r^3}. \quad (5.1.6)$$

Напрямок вектора \vec{B} перпендикулярний до $d\vec{l}$ і \vec{r} і знаходиться за правилом правого свердла.

Визначимо магнітну індукцію соленоїда. Соленоїд - це циліндрична котушка зі струмом, що складається з великого числа витків дроту, які утворюють гвинтову лінію. Якщо витки розміщені

близько один до одного, то соленоїд можна розглядати як систему послідовно з'єднаних колових струмів однакового радіуса із спільною віссю, (рис. 5.1.1).

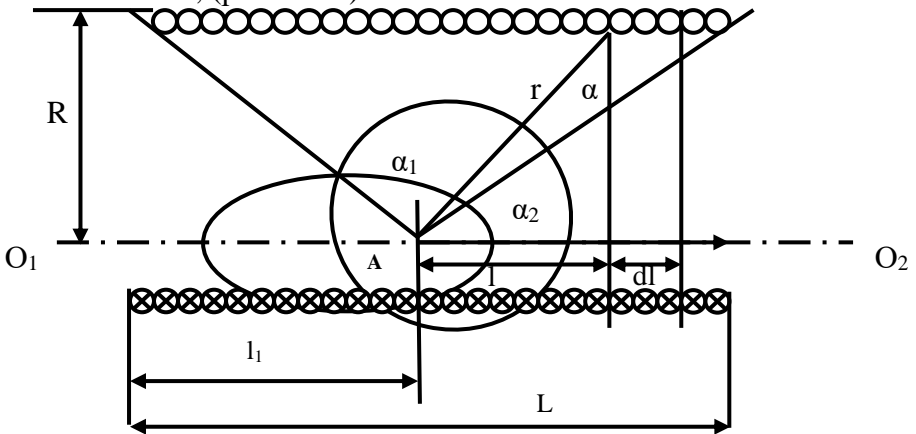


Рис. 5.1.1.

На рис. 5.1.1. показано переріз соленоїда радіусом R і довжиною L зі струмом I . Кружечки з точками показують переріз провідників, в яких струм спрямований до нас, а з хрестиками - від нас. Нехай n - число витків, що припадає на одиницю довжини.

Магнітна індукція \vec{B} полів соленоїда дорівнює геометричній сумі магнітних індукцій \vec{B}_i полів всіх витків цього соленоїда. В довільній точці A , яка лежить на осі соленоїда O_1O_2 , всі вектори \vec{B}_i і результуючий вектор \vec{B} спрямовані по осі O_1O_2 в той бік, куди переміщується свердло з правою різьбою при обертанні його рукоятки в напрямі електричного струму в витках соленоїда. На малу ділянку соленоїда довжиною dl уздовж осі припадає ndl витків. Якщо dl - віддаль уздовж осі від цих витків до точки A , то згідно з законом Біо-Савара-Лапласа отримуємо:

$$dB = \frac{\mu_0 2\pi R^2 ndl}{4\pi r^3}. \quad (5.1.7)$$

Але через те що $r = R/\sin\alpha$ і $l = R/\tan\alpha$, то $dl = -\frac{Rd\alpha}{\sin^2\alpha}$, і

тоді:

$$B = \int dB = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} -\frac{\mu_0}{2} n I \sin \alpha d\alpha = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos \alpha_2 - \cos \alpha_1), \quad (5.1.8)$$

$$\text{де } \cos \alpha_1 = -\frac{l_1}{\sqrt{R^2 + l_1^2}}, \quad \cos \alpha_2 = \frac{L - l_1}{\sqrt{R^2 + (L - l_1)^2}}.$$

Для довгого соленоїда, коли ($R \ll L$) $\alpha_1 \rightarrow 0$ і $\alpha_2 \rightarrow \pi$, магнітне поле буде однорідним. Якщо $l_1 = \frac{L}{2}$, то

$$\cos \alpha_1 = -\cos \alpha_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2R}{L}\right)^2}} \text{ і магнітна індукція максимальна:}$$

$$B_{\max} = \frac{\mu_0 n I}{\sqrt{1 + \left(\frac{2R}{L}\right)^2}}. \quad (5.1.9)$$

Враховуючи, що $nL = N$ - повне число витків, будемо мати:

$$B_{\max} = \frac{\mu_0 I N}{\sqrt{L^2 + 4R^2}}, \quad (5.1.10)$$

а напруженість поля:

$$H_{\max} = \frac{I N}{\sqrt{L^2 + 4R^2}}. \quad (5.1.11)$$

Опис експериментальної установки

На рис. 5.1.2. подано схему експериментальної установки, що використовується у цій роботі.

До вимірювальної котушки А приєднано балістичний гальванометр. При замиканні вимикача К напруженість магнітного поля на осі соленоїда зростає від 0 до значення H . У колі котушки А виникає індукційний струм за рахунок магнітного потоку $\Phi = \mu_0 H S N$, і рамка гальванометра відхиляється на деякий кут β .

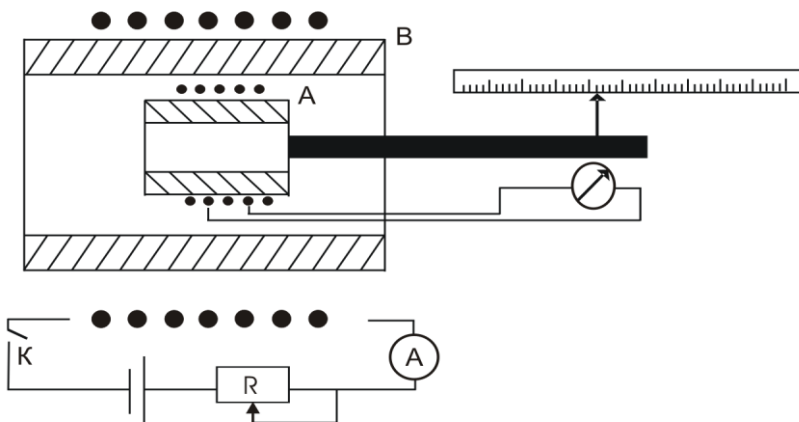


Рис. 5.1.2.

Кількість електрики q , що проходить через гальванометр -

$$q = \frac{\Phi}{R}, \quad (5.1.12)$$

де R – опір гальванометра.

$$q = \frac{\mu\mu_0 NSH}{R}. \quad (5.1.13)$$

З іншого боку:

$$q = C\beta, \quad (5.1.14)$$

де C – балістична стала гальванометра.

Із формул (5.1.13), (5.1.14) маємо:

$$H = \frac{RC}{\mu\mu_0 SN} \beta. \quad (5.1.15)$$

Якщо позначити $C' = \frac{RC}{\mu\mu_0 SN}$ - балістична стала установки,

то

$$H = C'\beta. \quad (5.1.16)$$

Порядок виконання роботи

1. Скласти схему згідно з рис. 5.1.2.
2. Розмістити котушку А на осі соленоїда, що відповідає координаті $X=0$, та встановити реостатом струм у колі заданої величини.

3. Розрахувати напруженість поля на осі соленоїда за формулою (5.1.11).
4. Визначити величину β в момент замикання і розмикання поля. Дослід проробити декілька разів. Знайдіть середнє значення.
5. Користуючись формулою $C' = \frac{H}{\beta}$, визначити величину сталої.
6. Провести вимірювання в точках соленоїда, розташованих одна від одної на відстані 1 см, розрахувати напруженість поля за формулою (5.1.16) і побудувати графік залежності H від X .

Контрольні питання

1. Розкрийте фізичний зміст вектора магнітної індукції магнітного поля.
2. Що таке напруженість магнітного поля? Які її одиниці вимірювання?
3. Запишіть закон Біо-Савара-Лапласа, поясніть його використання.
4. Як знаходиться напрям сили Ампера? Запишіть вираз для обчислення цієї сили.
5. Користуючись законом Біо-Савара-Лапласа, виведіть формулу для обчислення магнітної індукції соленоїда.
6. Обчисліть максимальне значення магнітної індукції і напруженості поля соленоїда.

Задачі для самоперевірки

1. Обчисліть силу взаємодії, що діє на один метр довжини, між двома провідниками, розміщеними на відстані d один від одного, по яких протікає струм I_1 і I_2 .
2. Обчисліть магнітну індукцію поля в центрі прямокутного контура зі струмом I , розміри якого a і b .

Методичні поради

Частина теоретичного матеріалу цієї лабораторної роботи може бути використана на уроках фізики в 10 класі з тем "Магнітна індукція", "Сила Ампера". Закон Біо-Савара-Лапласа може бути використаний для розрахунку магнітних полів на уроках фізики в класах із поглибленим вивченням цього предмета.

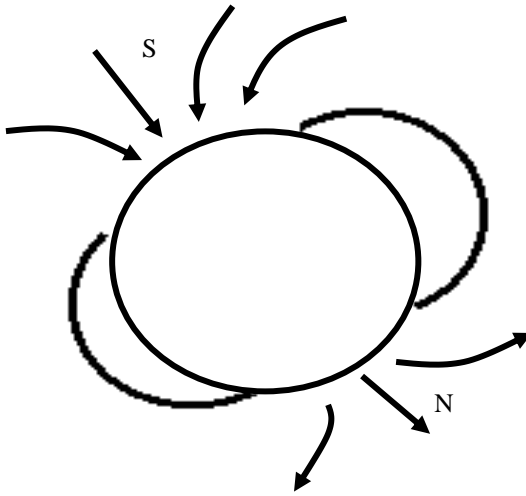
5.2. Визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі

Тема: Визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі.

Мета: Експериментально визначити величину горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі.

Обладнання: джерело постійного струму, тангенс – гальванометр, амперметр, реостат, двополюсний перемикач.

Теоретичні відомості



Орієнтація магнітної стрілки в напрямку приблизно з півночі на південь вказує на те, що існує магнітне поле Землі.

Аналіз ходу силових ліній магнітного поля Землі (рис. 5.2.1.) показує, що земне магнітне поле має такий вигляд, що нібито земна куля є магнітом із віссю, спрямованою приблизно з півночі на південь.

Рис. 5.2.1. Силові лінії магнітного поля Землі.

У північній півкулі всі лінії магнітного поля сходяться в точці, що лежить на $75^{\circ}50'$ північної широти і 96° західної довготи. Ця точка називається південним магнітним полюсом Землі. В південній півкулі точка сходження ліній магнітного поля лежить на $70^{\circ}10'$ південної широти і $150^{\circ}45'$ східної довготи.

Потрібно зазначити, що точки сходження ліній магнітного поля лежать не на самій поверхні Землі, а під нею. Магнітні полюси Землі з часом дуже повільно змінюють своє положення. Географічні полюси Землі не співпадають із її магнітними. Магнітна вісь Землі, тобто пряма, що проходить через обидва

магнітні полюси, не проходить через її центр і, таким чином, не є Земним діаметром.

Основними параметрами магнітного поля Землі є: магнітний нахил Θ (кут між вектором \vec{B} і площиною горизонту), магнітне схилення φ (кут між горизонтальною складовою вектора \vec{B} із площиною географічного меридіана) і горизонтальна складова індукції магнітного поля Землі \vec{B}_τ (рис. 5.2.2.).

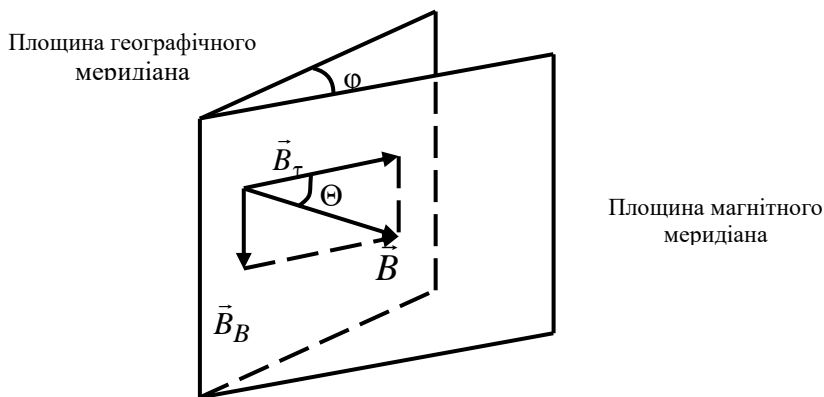


Рис. 5.2.2.

Географічний меридіан визначає справжнє положення лінії північ – південь у певній місцевості, а магнітний меридіан збігається з напрямом земного магнітного поля (напрямок стрілки компаса збігається з напрямом магнітного меридіану).

На магнітних полюсах магнітний нахил дорівнює $\Theta = \pm 90^\circ$. Тому повна індукція і вертикальна складова магнітного поля мають однакові значення (магнітна стрічка встановлюється у вертикальному положенні). На магнітному екваторі $\Theta = 0^\circ$ і повна індукція \vec{B} , і горизонтальна складова \vec{B}_τ дорівнюють одна одній (магнітна стрілка встановлюється у вертикальному положенні).

Точне значення величин, що характеризують земне магнітне поле, для дуже великого числа пунктів на Землі має надзвичайно важливе значення. Знання цих величин дає можливість безпомилково орієнтуватися в просторі, вказувати курс літака чи корабля.

На земній кулі зустрічаються місця, в яких магнітні характеристики змінюються дуже різко і мають значення, що дуже відрізняються від відповідних значень у сусідній місцевості. Такі області називаються областями магнітної аномалії. Причиною такої аномалії є наявність під поверхнею Землі великих мас магнітної залізної руди (Курська магнітна аномалія). Тому вивчення магнітної аномалії може дати цінні відомості про наявність і розміщення цих покладів.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка для визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі подано на рис. 5.2.3.

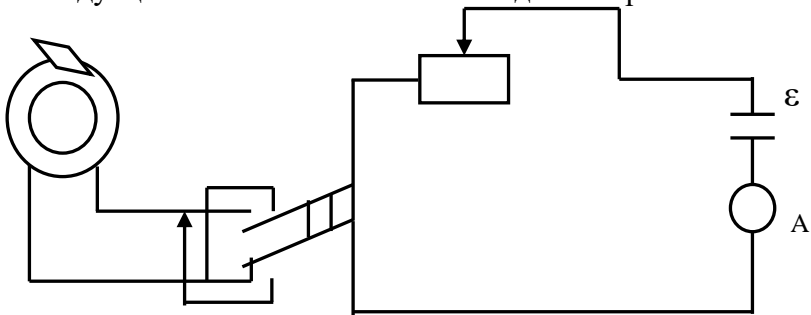
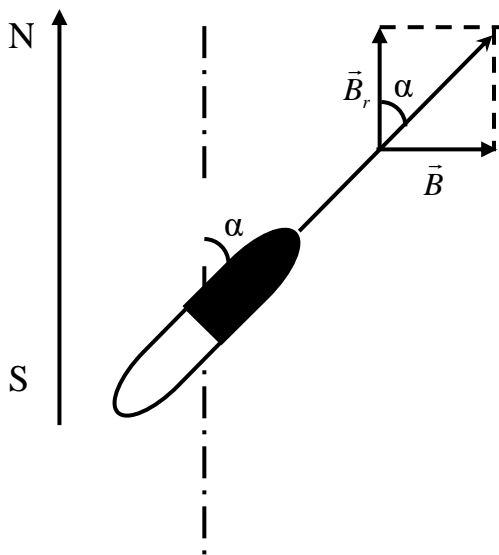


Рис.5.2.3.

Основною частиною цієї установки є тангенс-гальванометр. Він складається з колової рамки, розміщеної вертикально в площині магнітного меридіана. В центрі рамки на вертикальній осі закріплено невелику магнітну стрілку, яка може вільно обертатися тільки в горизонтальній площині. Вона повинна бути настільки малою, щоб можна було вважати індукцію, яка діє на полюси стрілки, такою, що дорівнює індукції в центрі колового струму.

При пропусканні струму через рамку магнітна стрілка зазнає дії двох магнітних полів, а саме: магнітного поля Землі і магнітного поля струму з індукцією \vec{B} , що проходить через рамку тангенс-гальванометра (рис.5.2.4).



Під дією цих полів магнітна стрілка встановлюється остаточно в певному напрямі під кутом α до напрямку магнітного поля Землі. Індукція магнітного поля струму зв'язана з горизонтальною складовою індукції магнітного поля Землі співвідношенням:

$$B_r = B \operatorname{ctg} \alpha. \quad (5.2.1)$$

Рис. 5.2.4.

Індукцію магнітного поля в центрі контуру можна обчислити як:

$$B = \frac{\mu_0 n I}{2R}, \quad (5.2.2)$$

де n - число витків контуру; I - сила струму, що проходить через контур і фіксується амперметром.

Аналізуючи співвідношення (5.2.1) і (5.2.2), отримаємо, що:

$$B_r = \frac{\mu_0 n}{2R} I \cdot \operatorname{ctg} \alpha \quad (5.2.3)$$

Якщо $\alpha = 45^\circ$ при струмові $I = I_0$, то отримаємо:

$$B_r = \frac{\mu_0 n}{2R} I_0. \quad (5.2.4)$$

Реостат R служить для регулювання сили струму в колі, що створюється джерелом постійного струму.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло згідно зі схемою, показаною, на рис.5.2.3.
2. Повертаючи підставку тангенс-гальвенометра, розташувати колову рамку в площині магнітного меридіана. При цьому один із полюсів магнітної стрілки знаходиться напроти нульової поділки шкали. Закріпити підставку в такому положенні.

- Замкнути коло і регулювати силу струму реостатом, досягти відхилення стрілки на кут 45° ; зафіксувати значення струму I_0 . Обчислити значення B_T згідно з формулою (5.2.4).
- Провести експеримент для інших значень струму I і обчислити B_T згідно з формулою (5.2.3).
- Змінити напрям струму на протилежний і провести аналогічні вимірювання.
- Визначити середнє значення горизонтальної складової магнітного поля Землі.
- Знаючи кут нахилу θ для певної місцевості і значення B_T , визначити повну індукцію магнітного поля як $B = B_T \cos \theta$.

Контрольні питання

- Що таке магнітне поле Землі? Як розміщуються магнітні полюси Землі?
- Охарактеризуйте основні параметри земного магнетизму.
- У чому суть явищ магнітної аномалії на Землі? Як змінюються основні характеристики магнітного поля Землі при цьому?
- У яких випадках горизонтальна складова індукції магнітного поля Землі дорівнює повній індукції і в яких випадках вертикальна складова - повній?
- Яка будова і принцип дії тангенс-гальванометра?
- Чому B_T найкраще визначити при кутах відхилення стрілки 45° ?

Задачі для самопідготовки

- По довгому вертикальному провіднику зверху вниз тече струм силою $I=10$ А. На якій відстані від провідника індукція поля, що складається з індукції магнітного поля Землі і поля струму, спрямована вертикально вгору (горизонтальна складова магнітного поля Землі $B_T = 2 \cdot 10^{-5} T$)?
- Конденсатор ємністю $C=10^{-5}$ Ф періодично заряджається від батареї з ЕРС $E=100$ В і розряджається через котушку з 32 витками, що має форму кільця діаметром $d=20$ см. Площина кільця співпадає з площиною магнітного меридіана. Розміщена в центрі кільця горизонтальна магнітна стрілка відхиляється на кут $\alpha = 45^\circ$. Перемикання конденсатора відбувається 100 раз на

секунду. Визначити горизонтальну складову напруженості магнітного поля Землі в цій точці.

Методичні поради

Частина теоретичного матеріалу цієї лабораторної роботи може бути використана вчителем фізики при вивченні теми "Магнітне поле Землі" в 8 класі. Тангенс-гальванометр і експериментальна установка, описана в цій роботі, може бути використана при проведенні фізичного практикуму в 10 класі з теми "Вимірювання індукції магнітного поля Землі" (замість лабораторної роботи "Вимірювання індукції магнітного поля постійного магніту").

5.3. Визначення питомого заряду електрона за допомогою магнетрона

Тема: Визначення питомого заряду електрона за допомогою магнетрона.

Мета: Визначити питомий заряд електрона, використавши магнетрон.

Обладнання: магнетрон, соленоїд, джерело живлення, реостати, амперметр, міліамперметр, вольтметри, ключі, мікрометр, касета ФПЕ-03, цифровий вольтметр.

Теоритичні відомості

Якщо частинка, яка має заряд, рухається в просторі при наявності електричного поля \vec{E} і магнітного поля \vec{B} , то на неї діє сила Лоренца. Рух цієї частинки описуватись рівнянням:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{E} + g[\vec{v}, \vec{B}]. \quad (5.3.1)$$

Важливим випадком руху заряджених частинок (електронів) є рух цих частинок при наявності двох цих полів –магнітного і електричного, перпендикулярних одне до одного ($\vec{E} \perp \vec{B}$). Це використовується в спеціальних вакуумних трубках –магнетронах, які можна використовувати для визначення питомого заряду електронів $\left(\frac{e}{m}\right)$.

Магнетрон є аналогом двоелектродної лампи, розміщеної в зовнішньому магнітному полі. Якщо катод і анод паралельні між собою, то такий магнетрон називається плоским. У цьому магнетроні можна вважати магнітне поле і електричне поле однорідним. При наявності магнітного поля траєкторія електронів викривляється під дією сили Лоренца і має вигляд циклоїди (рис.5.3.1.).

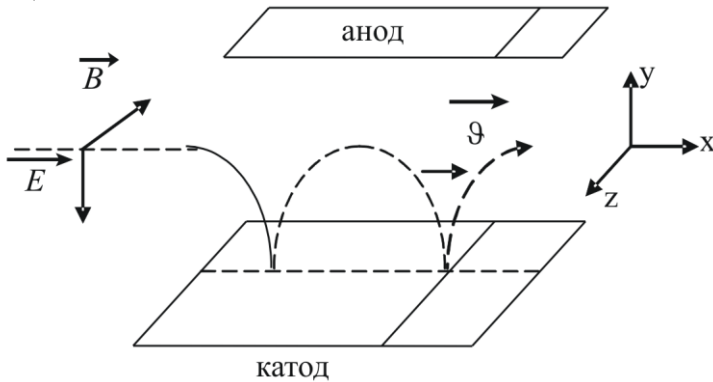


Рис. 5.3.1.

Покажемо, що справді в цьому випадку електрон рухається по циклоїді. Рівняння руху електрона (5.3.1) в кожному випадку буде мати вигляд:

$$m \frac{dv_x}{dt} = e v_y B; \quad m \frac{dv_y}{dt} = e E - e v_x B. \quad (5.3.2)$$

При таких початкових умовах: $t=0; x=y=0, v_x = v_y = 0$, розв'язком рівняння (5.3.2) буде:

$$x = t v - \rho \sin \omega_e t, \quad y = \rho (1 - \cos \omega_e t), \quad (5.3.3)$$

де ω_e – циклічна частота, а $\rho = \frac{v}{\omega_e}$. Рівняння (5.3.3) дає циклоїду в параметричній формі.

У випадку, коли циклоїда торкається анода, тобто $B=B_k$, будемо мати $2\rho = d$, де d – відстань між катодом і анодом.

Враховавши, що $E = \frac{U}{d}$, $v = \frac{E}{B}$, а $\omega_e = \left(\frac{e}{m}\right)B$, отримаємо:

$$\left(\frac{e}{m}\right)B = \frac{v}{\rho} = \frac{\frac{E}{B}}{\frac{d}{2}} = \frac{2U}{d^2 B} . \quad (5.3.4)$$

Звідки знайдемо

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{d^2 B^2} . \quad (5.3.5)$$

Тобто, знаючи параметри електричного і магнітного полів і геометричні розміри магнетрона, можемо знайти питомий заряд.

На практиці застосовуються циліндричні магнетрони. Їх анод є металевим циліндром, а катод має також циліндричну форму і розміщений на осі анода. Шлях руху електронів у циліндричному магнетроні більш складний (рис.5.3.2.).

Відповідні розрахунки показують, що питомий заряд електрона визначається згідно зі співвідношенням:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{b^2 B_{кр}^2 \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)^2} , \quad (5.3.6)$$

де a – радіус катода, b – радіус анода.

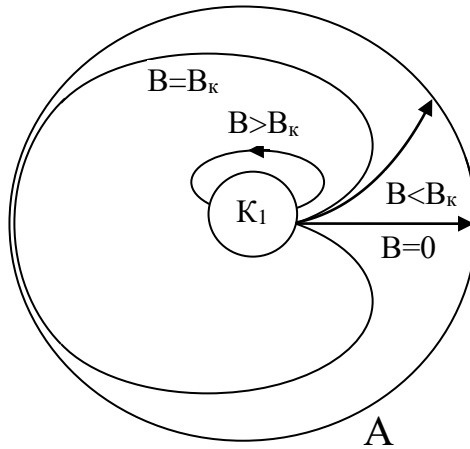


Рис. 5.3.2.

Зазначимо, що критичне значення $B_{кр}$ не змінюється під дією просторового заряду і має одне і те ж значення як у режимі струму насичення, так і в режимі просторового заряду.

Крім розглянутого вище способу визначення питомого заряду, існують й інші способи. Питомий заряд можна визначити за допомогою методу магнітного фокусування, методом електроннопроменевої трубки, методом зміщення β -пучків в електричних і магнітних полях. Сукупність усіх результатів із визначення $\frac{e}{m}$ для електронів приводить до такого значення:

$$\frac{e}{m_0} = 1,759 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}.$$

Відхилення заряджених частинок у магнітних і електричних полях дає можливість знайти їх питомий заряд.

Опис експериментальної установки

Експериментальна установка (рис.5.3.4.) складається з магнетрона (лампа СО-118), її сітку через великий опір приєднують

до анода. Великий опір вибирається так, щоб сітка дістала потенціал, близький до значення потенціалу анода в місці розміщення сітки. Потенціал сітки $U_e = bU_a$, де b – коефіцієнт, що визначається відносними відстанями між катодом, сіткою і анодом за такою формулою:

$$h = \frac{(lna - lnc)}{(lna - lnb)}, \quad (5.3.7)$$

де b , a , c – відповідно радіус анода, катода, сітки. Підрахувавши число витків соленоїда і його довжину, можна визначити, знаючи силу струму, індукцію магнітного поля $B = \frac{NI}{l}$. Тоді співвідношення для визначення питомого заряду матиме вигляд:

$$\frac{e}{m} = \frac{8UI^2}{N^2 I_{kp}^2 b^2 \left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)}. \quad (5.3.8)$$

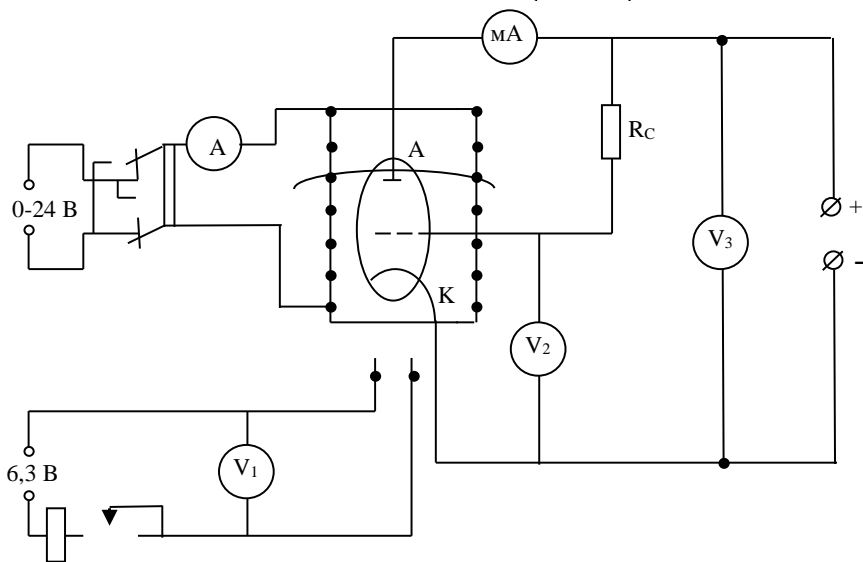


Рис. 5.3.3.

Порядок виконання роботи I варіант

1. Скласти схему експериментальної установки за рис.5.3.3.
2. Увімкнути живлення нитки розжарення катода лампи і за допомогою реостата підтримувати її сталу напругу.
3. Побудувати графік залежності анодного струму від струму соленоїда $I_a = f(I)$ при значеннях анодної напруги 60, 70, 80 В.
4. Обчислити критичну індукцію $B_{кр}$, для цього знайти значення сили струму соленоїда, при якому I_a починає спадати.
5. Обчислити за формулою (5.3.8) відношення $\frac{e}{m}$.
6. Змінити напрям струму в соленоїді і провести аналогічні вимірювання.
7. Обчислити середнє значення питомого заряду, провівши не менше 5-7 вимірювань.

II варіант

Схему касети подано на рис.5.3.4.

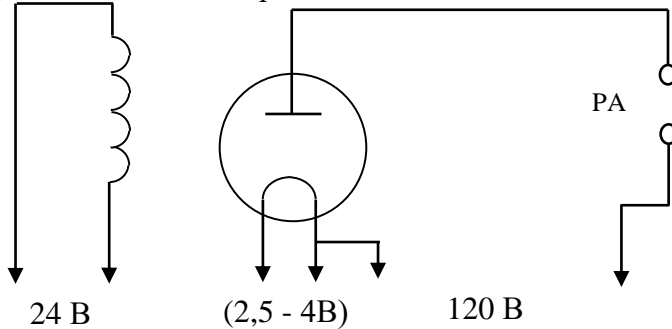


Рис. 5.3.4.

Принцип роботи функціональної групи ФПЕ-ОЗ із визначення питомого заряду електрона методом магнетрона полягає в зміні струму лампи V при внесенні її в магнітне поле котушки L , в якій змінюються струм від мінімального до максимального значення.

Порядок виконання роботи

1. Скласти схему вимірювальної установки, як показано на рис.5.3.5.

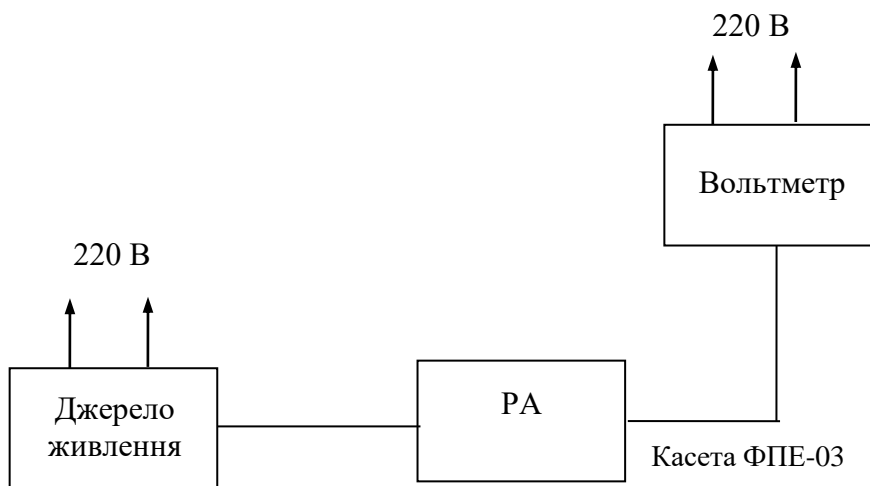


Рис. 5.3.5.

2. Потенціометром на блоці живлення встановити напругу $U_a=130\text{ В}$ між анодом і катодом лампи.
3. Встановити струм розжарення катода лампи $I_k=0,4\text{ А}$.
4. При постійному струмі розжарення катода і сталій анодній напрузі зняти залежність анодного струму I_a від струму соленоїда $I_c: I_a=f(I_c)$.
5. Побудувати графічну залежність $I_a=f(I_c)$ і визначити на ній критичний струм соленоїда I_{kc} (I_{kc} вибирається за критичною в точці, де I_a починає спадати).
6. За даними величинами R , n , N та виміряною анодною напругою і критичним струмом I_{kc} обчислити питомий заряд електрона за формулою:
$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{R^2(\mu_0 n I_{kc})}$$
, де R - радіус анода ($R=10\text{ мм}$),
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$$
; n - кількість витків на одиницю довжини соленоїда (у цій лабораторній роботі використовується соленоїд довжиною намотки l , числом витків $N=2700$).
7. Підрахувати відносну та абсолютну похибки при визначенні питомого заряду електрона. Порівняти знайдене експериментально значення з табличним. Записати остаточні результати і зробити висновки.

Контрольні питання

1. Яка сила діє на заряджену частинку при русі її в магнітному і електричному полях? Запишіть вираз для обчислення цієї сили.
2. Будова і принцип дії магнетрона.
3. Покажіть, що траєкторією руху електрона в магнетроні буде циклоїда.
4. Виведіть формулу для обчислення питомого заряду у випадку плоского магнетрона.
5. Запишіть формулу для обчислення питомого заряду, що використовується у цій лабораторній роботі.
6. Які ще методи використовуються для визначення відношення $\frac{e}{m}$? У чому суть цих методів?

Задачі для самопідготовки

1. На електронно-променевої трубку поміщено колову котушку радіусом R , кількістю витків N . По котушці протікає струм силою I . Електрон проходить у магнітному полі до екрана відстань l і зміщується на відстань x . Знайдіть питомий заряд електрона, якщо напруга між катодом і анодом U .
2. Електрон, який прискорюється електричним полем і має швидкість v , влітає в однорідне магнітне поле з індукцією B під кутом α до силових ліній. Визначити питомий заряд електрона і крок гвинтової лінії, якщо радіус кривизни R .

Методичні поради

Теоретичний матеріал цієї лабораторної роботи може бути використаний на уроці фізики в 10 класі з теми "Сила Лоренца", а також при розв'язуванні задач із зазначеної теми. Експериментальна установка, в якій використовується магнетрон, може бути використана для проведення роботи фізпрактикуму "Визначення питомого заряду електрона" на факультативних заняттях або в класах із поглибленим вивченням фізики.

5.4. Вивчення ефекту Холла

Тема: Вивчення ефекту Холла.

Мета: Встановити залежність ЕРС Холла в провіднику від індукції магнітного поля, визначити електропровідність зразка, концентрацію вільних заряджених частинок.

Обладнання: Зразок у вигляді прямокутного паралелепіпеда з відомими лінійними розмірами, джерело струму, реостат, електромагніт, потенціометр, двополюсний ключ.

Теоретичні відомості

У 1879 році американський фізик Е. Холл провів експеримент, у якому через золоту пластину відомих розмірів пропускав електричний струм, і коли пластину поміщали в однорідне магнітне поле, перпендикулярне її боковим граням, то потенціали протилежних точок верхньої і нижньої грані ставали різними і виникала різниця потенціалів $\varphi_A = \varphi_C = \Delta\varphi \neq 0$ (рис.5.4.1).

Це явище отримало назву ефекту Холла. Експериментально було встановлено, що :

$$\Delta\varphi = \frac{RIB}{b}, \quad (5.4.1)$$

де R - стала Холла, I - сила струму, b - ширина пластини, B - індукція зовнішнього поля.

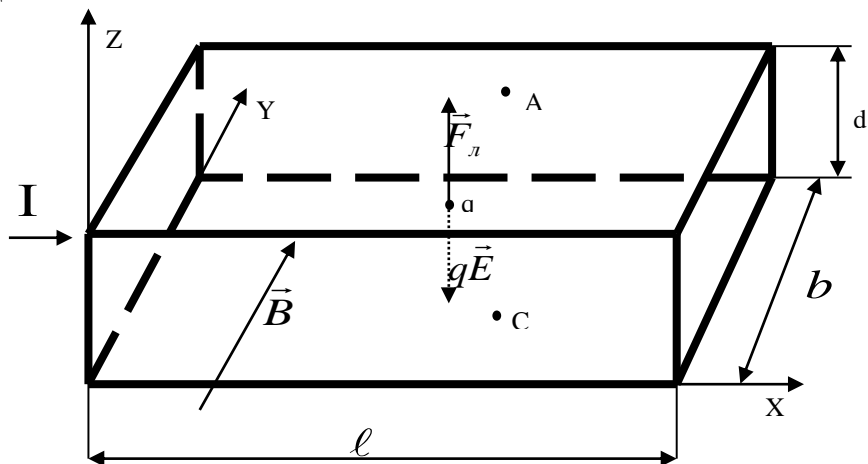


Рис. 5.4.1.

Подальші дослідження показали, що ефект Холла спостерігається для всіх провідників. Зміна напрямку струму чи вектора \vec{B} на протилежний зумовлює зміну знака різниці потенціалів $\varphi_A - \varphi_C$. Числові значення постійної Холла залежать від матеріалу, з якого виготовлена пластина, при чому цей коефіцієнт для одних речовин додатний, а для інших - від'ємний.

У класичній теорії провідності ефект Холла пояснюється тим, що в магнітному полі на рухомі заряджені частинки діє сила Лоренца :

$$\vec{F} = e[\vec{v} \times \vec{B}] , \quad (5.4.2)$$

де \vec{B} – Індукція магнітного поля, \vec{v} - швидкість руху частинок, e - заряд. Тоді напруженість електричного поля ефекту Холла знайдемо з умови:

$$F_{el} = F_l, \quad \text{тобто} \quad E_{хол} = vB . \quad (5.4.3)$$

Холлівська різниця потенціалів $\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_C = E_{хол}d$, і отримаємо:

$$\Delta\varphi = vBd . \quad (5.4.4)$$

Знайдемо швидкість руху заряджених частинок, знаючи, що:

$$I = \frac{\Delta q}{t} , \quad (5.4.5)$$

де Δq - загальний заряд, який переноситься за час t .

Заряд $\Delta q = nebdl$, де b , l , d - ширина, довжина і висота пластини. Отже, рівність (5.4.5) можемо записати у вигляді :

$$I = envbd , \quad (5.4.6)$$

а звідси :

$$v = \frac{I}{enbd} . \quad (5.4.7).$$

Підставимо це значення в рівність (4) і знайдемо різницю потенціалів:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{en} \frac{IB}{b} . \quad (5.4.8).$$

Порівнюючи вирази (5.4.1) і (5.4.8), отримаємо, що стала Холла дорівнює:

$$R = \frac{1}{en}. \quad (5.4.9).$$

Аналіз формули (5.4.8) показує, що при класичному ефекті Холла залежність $\Delta\varphi$ від B є лінійною. Проте в природі існують речовини, в яких лінійна залежність $\Delta\varphi$ від B не виконується. Це свідчить про існування іншої причини ефекту Холла, яка може бути зрозумілою тільки з точки зору квантової теорії фізики твердого тіла.

Формула (5.4.9) показує, що знак сталої Холла співпадає зі знаком заряду частинки e . Тому вимірювання сталої Холла для провідників дало можливість визначити провідність. Якщо $R < 0$, то провідність електронна, а якщо $R > 0$ - діркова. Якщо в напівпровіднику існує два види провідності, то за знаком постійної Холла можна визначити, який із цих видів переважає.

Вираз (5.4.9) для постійної Холла отримали, виходячи з класичної теорії, в якій швидкість руху v для всіх частинок однакова. З урахуванням того, що для чистих напівпровідників розсіювання носіїв проходить на вузлах кристалічної ґратки, для постійної Холла отримуємо вираз:

$$R = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{en}. \quad (5.4.10)$$

Звідки, вирахувавши значення $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, можна обчислити концентрацію носіїв струму:

$$n = \frac{3\pi}{8} \frac{1}{Re} = 7,4 \cdot 10^{-18} \frac{1}{R}. \quad (5.4.11)$$

Знаючи сталу Холла і питомий опір напівпровідників, можна знайти рухливість носіїв струму μ (швидкість, яку вони набувають в електричному полі з $E = 1B/m$). Якщо напруженість поля E , то швидкість руху буде $v = \mu E$. При концентрації носіїв струму n густина електричного струму через зразок дорівнює:

$$J = env = en\mu E, \quad (5.4.12)$$

а за законом Ома:
$$J = \frac{E}{\rho}, \quad (5.4.13)$$

то, порівнявши вирази (5.4.12) і (5.4.13), отримаємо, що рухливість:

$$\mu = \frac{1}{\rho en}, \quad (5.4.14)$$

де $\frac{1}{en} = R \frac{8}{3\pi}$.

Отже, рухливість носіїв струму виражається через сталу Холла таким чином:

$$\mu = 0,85 \frac{R}{\rho}. \quad (5.4.15)$$

Опис експериментальної установки

Схему установки для вивчення ефекту Холла і питомого опору показано на рис. 5.4.2.

Досліджуваний зразок виготовлений із напівпровідника у вигляді прямокутного паралелепіпеда і поміщений між полюси електромагніту. Для пропускання електричного струму служать контакти 1-1, джерелом струму є батарея ε_1 , сила струму регулюється за допомогою реостата R і фіксується міліамперметром. Електромагніт живиться від джерела постійного струму. Сила струму, яка проходить через електромагніт, фіксується амперметром, двополюсний перемикач служить для зміни напрямку струму в електромагніті. Значення індукції магнітного поля в електромагніті при різних значеннях струму визначається за допомогою таблиць або графіків.

Вимірювання спаду напруги між контактами 2-2 і різниці потенціалів $\Delta\varphi$ між холлівськими контактами здійснюється компенсаційним методом. Для цього використовується високоомний потенціометр Р37-1. На вхід X_1 подається напруга U_ρ , на вхід X_2 - різниця потенціалів $\Delta\varphi$.

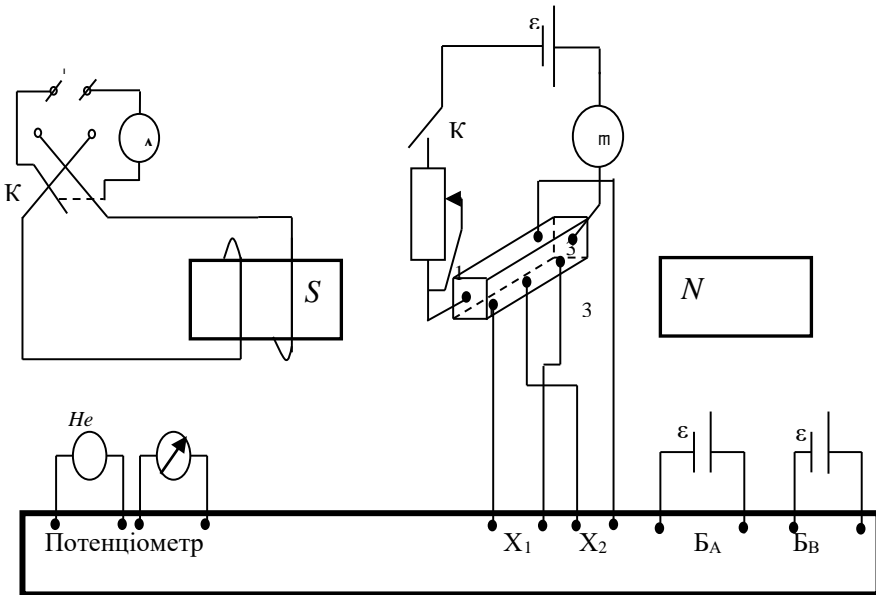


Рис.5.4.2.

Робочий струм у потенціометрі створюється батареями ε_2 і ε_3 . Величина робочого струму виставляється за еталонною напругою, створеною нормальним елементом (He).

Нуль-індикатором потенціометра є гальванометр. Нульові покази гальванометра свідчать про те, що у вимірній схемі досягнуто стану компенсації.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з роботою потенціометра згідно з інструкцією.
2. Встановити робочий струм I_A . Для цього перемикачами роду робіт встановити в положення I_A і ручками "середнє" і "точно", які відносяться до струму I_A , встановити стрілку гальванометра на нуль.
3. Перемикач роду робіт поставити в положеннях x_1 . Загрубити гальванометр.
4. Замкнути ключ K_1 , встановити струм 0,5 мА. Виміряти напругу U_p .

5. Загрубивши гальванометр, повторити дослід для декількох значень струму, вимірюючи U_ρ .
6. Обчислити питомий опір згідно зі співвідношенням $\rho = \frac{U_\rho}{I} \frac{bd}{l}$.
7. Поставивши перемикач роду робіт у положення I_B , встановити робочий струм за допомогою ручок середнього і тонкого регулювання.
8. Перемикач роду робіт поставити у положення x_2 . Встановити струм через зразок 1 мА, а через обмотку електромагніта 0,1 А.
9. Виміряти напругу $U_{хол}$.
10. Дослід повторити декілька разів при різних величинах індукції магнітного поля, збільшуючи струм через електромагніт.
11. Змінивши полярність на клеммах x_2 потенціометра (ключ K_2), виміряти $U_{хол}$ при тих же значеннях сили струму, що проходить через електромагніт.
12. Істинну величину ЕРС Холла $\Delta\varphi_{хол}$ визначити як
$$\Delta\varphi = \frac{|U_{хол+}| + |U_{хол-}|}{2}$$
.
13. Побудувати графік залежності $\Delta\varphi$ від B і визначити сталу Холла за тангенсом кута нахилу прямої $\Delta\varphi(B)$.
14. Встановити струм у зразку $I=3$ мА і повторити вимірювання.
15. За знайденими значеннями ρ і R обчислити n і μ .

Контрольні питання

1. У чому суть ефекту Холла?
2. Яка причина класичного ефекту Холла?
3. Вивести вираз для обчислення різниці потенціалів ефекту Холла.
4. Як експериментально визначається стала Холла?
5. Пояснити спосіб вимірювання напруги за допомогою потенціометра.

Задачі для самоконтролю

1. Вважаючи валентність алюмінію $z=2$, визначити різницю потенціалів, яка виникає вздовж ширини стрічки при переміщенні її в однорідному магнітному полі з індукцією 0,6 Тл.

- Ширина стрічки 5 см, густина струму $5 \cdot 10^5 \text{ A/m}^2$. Вектор магнітної індукції перпендикулярний до площини стрічки.
2. В однорідному магнітному полі з індукцією 1 Тл знаходиться мідна пластинка, у якій протікає струм силою 4,5 А. Вектор магнітної індукції перпендикулярний до площини пластини. Товщина пластини 0,01 мм. Виникаюча різниця потенціалів 2 мкВ. Визначити концентрацію вільних електронів і їх рухливість.

Методичні поради

Теоретичний матеріал цієї роботи можна використати при вивченні теми "Ефект Холла та його застосування" у 10 класі при поглибленому вивченні фізики.

5.5. Використання ефекту Холла для вивчення розподілу магнітного поля вздовж осі соленоїда

Тема: Вивчення розподілу магнітного поля вздовж осі соленоїда.

Мета: Експериментально дослідити розподіл магнітного поля вздовж осі соленоїда, дослідити залежність ЕРС Холла від значення вектора індукції магнітного поля.

Обладнання: касета ФПЕ-04, джерело живлення, цифровий вольтметр.

Теоретичні відомості

У центральній частині соленоїда магнітне поле практично однорідне. Його індукцію можна розрахувати за формулою:

$$B = \mu_0 n I . \quad (5.5.1)$$

При внесенні у магнітне поле провідної пластини, через яку проходить постійний струм, за рахунок дії магнітного поля на рухомі заряди цієї пластини виникає поперечна різниця потенціалів, або ЕРС Холла:

$$\varepsilon_x = R_x B j b , \quad (5.5.2)$$

де R_x - стала Холла, b - висота пластини, j – модуль вектора густини струму, B – модуль вектора магнітної індукції поля.

При вивченні ефекту Холла дослідно вимірюють не густину струму, а силу струму I :

$$j = \frac{I}{S} . \quad (5.5.3.)$$

Опис експериментальної установки

Для виконання другого варіанту цієї лабораторної роботи використовується установка, яка складається з робочого пристрою-касети ФПЕ-04, джерела живлення, цифрового вольтметра, зібрана за схемою (Рис. 5.5.1).

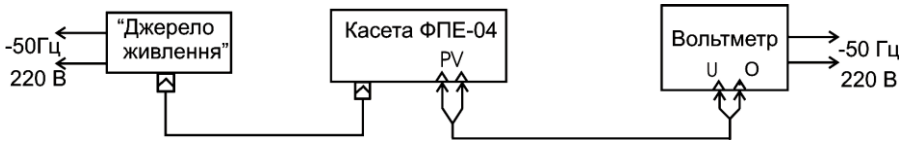


Рис. 5.5.1

Принцип роботи експериментальної установки базується на зміні магнітної індукції вздовж осі соленоїда і визначенні цієї залежності за допомогою датчика Холла. При внесенні датчика в магнітне поле і при подачі на нього постійного струму в датчику Холла виникає ЕРС, яка пропорційна індукції магнітного поля. Основною частиною функціональної групи ФПЕ-04 (Рис.5.5.2) є котушка, в якій уздовж її осі переміщується шток з датчиком Холла. На передній панелі касети встановлені два гнізда, до яких під'єднується мілівольтметр для вимірювання ЕРС Холла.

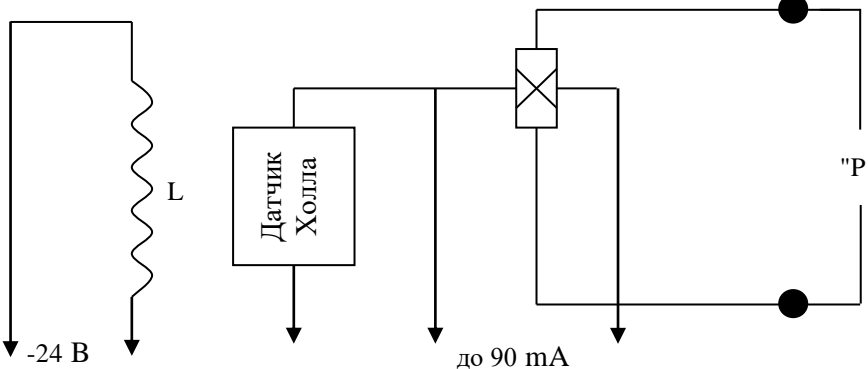


Рис. 5.5.2

У цій лабораторній роботі використовується соленоїд із довжиною намотки $L=168$ см і числом витків $N=1700$, а також датчик Холла ДХГ-2 розмірами $7 \times 10,5 \times 0,4$ см.

Порядок виконання роботи Тарування датчика Холла

1. Зібрати електричну схему виміральної установки згідно з рис. 5.5.1.
2. Увімкнути установку і для струмів 0,3; 0,6; 0,9 А. Визначити ЕРС Холла в центрі соленоїда.
3. Обчислити значення індукції магнітного поля для значень струмів за формулою (5.5.1).
4. Побудувати графік залежності ЕРС Холла від значення вектора індукції магнітного поля.
5. Використавши співвідношення (5.5.2), визначити сталу Холла.

Побудова графіка залежності величини індукції магнітного поля вздовж осі соленоїда.

1. Встановити струм соленоїда 0,9 А.
2. Переміщуючи за допомогою штока датчик Холла вздовж осі соленоїда, через кожні 10 мм виміряти ЕРС Холла і обчислити значення індукції магнітного поля.
3. Використовуючи отримані в п.2 результати, побудувати графік залежності величини індукції магнітного поля від відстані відносно центра соленоїда.
4. Зробити висновки про розподіл магнітного поля вздовж осі соленоїда.

Контрольні питання

1. Які параметри металів і напівпровідників можна визначити на основі ефекту Холла?
2. Як експериментально виміряти істинне значення холлівської різниці потенціалів? Вивести формулу для обчислення ЕРС Холла.
3. З якої умови визначається напруженість поля Холла?
4. У чому полягає суть теореми про циркуляцію вектора магнітної індукції? Застосувавши її, розрахуйте магнітне поле соленоїда.

5. Побудувати графік залежності модуля магнітної індукції B на осі довгого соленоїда від координати x . Вісь x співпадає з віссю соленоїда, а початок координат знаходиться в центрі соленоїда.
6. У скільки разів відрізняється потік вектора магнітної індукції через торцеву поверхню довгого соленоїда від потоку через поверхню поперечного перерізу соленоїда, який проходить через його середину?

Задачі для самопідготовки

1. Знайти магнітну індукцію і магнітний потік через поперечний переріз нікелевого осердя соленоїда, якщо напруженість однорідного магнітного поля в середині соленоїда $H=25 \text{ кА/м}$. Площа поперечного перерізу осердя $S=20 \text{ см}^2$, магнітна проникність нікелю $\mu =200$.
2. У прямому соленоїді, який має $n=15$ витків на сантиметр довжини, проходить струм $I=0,5 \text{ А}$. Довжина соленоїда $l=10 \text{ см}$, діаметр $d=4 \text{ см}$. Визначити напруженість магнітного поля у центрі соленоїда і у центрі однієї з основ.

Методичні поради

Ця лабораторна робота може бути проведена в 10 класі як робота фізичного практикуму з теми "Магнітне поле соленоїда".

5.6.Зняття кривої намагнічення і петлі гістерезису ферромагнетиків

Тема: Зняття кривої намагнічення і петлі гістерезису ферромагнетиків за допомогою осцилографа.

Мета: Користуючись осцилографом, зняти петлю гістерезису для ферромагнетиків. Отримати сім'ю петель гістерезису для різних зовнішніх магнітних полів і визначити основні характеристики.

Обладнання: тороїд із досліджуваної речовини, осцилограф, реостат, магазин опорів, батарея конденсаторів.

Теоретичні відомості

Речовини, які здатні дуже намагнічуватися в зовнішніх магнітних полях, називаються ферромагнетиками. Магнітна проникливість таких речовин дуже велика ($\mu \gg 1$). Ферромагнетиками, крім здатності сильно намагнічуватись, характеризуються

складною залежністю між індукцією поля \vec{B} і напруженістю поля H . Ця залежність була встановлена в роботах А.Г. Столстова для м'якого заліза. Індукція спочатку швидко збільшується, але з намагнічуванням магнетика її зростання сповільнюється.

Починаючи з деякого значення H_s , магнітна індукція зростає за лінійним законом залежно від напруженості магнітного поля. Суттєвою особливістю феромагнетиків є залежність магнітної проникливості μ від H .

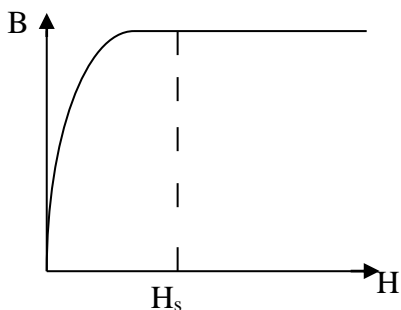


Рис. 5. 6.1.

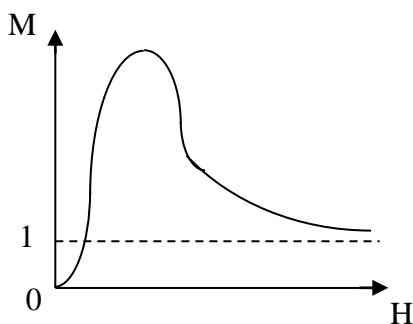


Рис. 5.6.2.

Відносна магнітна проникливість μ феромагнетиків спочатку швидко зростає з ростом H , досягає максимуму, а потім зменшується, прямуючи до 1 у дуже сильних намагнічуючих полях.

Феромагнетики мають особливість частково зберігати намагніченість після того, як їх забрати із зовнішнього магнітного поля.

Нехай у початковий момент часу феромагнетик не намагнічений, розмістимо його в середині котушки. Збільшення напруженості поля котушки від 0 до деякого значення H_1 призведе до зростання B від 0 до B_1 . При подальшому збільшенні H зростає B . Якщо потім зменшувати напруженість магнітного поля котушки, то зменшення B буде мати інший характер (характеризуватиметься не кривою OA , а кривою AB_0). Коли $H=0$, то індукція поля буде дорівнювати B_0 . Величина B_0 називається залишковою намагніченістю. Феромагнетик у цьому стані буде постійним магнітом. Якщо далі змінити напрям струму в котушці і перемагнічувати зразок у зворотному напрямку, то зміна індукції

буде описуватися відрізком кривої B_0A_1 . При значенні напруженості поля $-H_c$ індукція поля $B=0$. Величина H_c називається коерцитивною силою феромагнетика. Подальша зміна величини H поля у зворотному напрямі призводить до зміни індукції відповідно до кривої A_1H_cA . При циклічному перемагнічуванні феромагнетиків зміна індукції в ньому буде зображуватися петлеподібною замкнутою кривою $AB_0A_1H_c$.

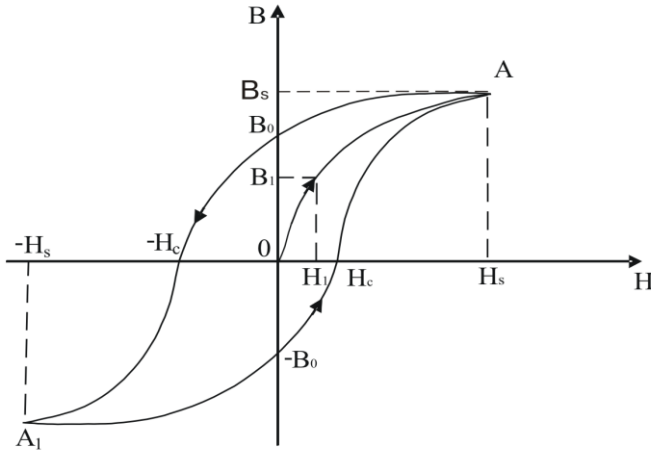


Рис.5.6.3.

Таким чином, значення індукції у феромагнетиках визначається не тільки існуючим зовнішнім полем, але залежить від попереднього стану намагнічування, при чому спостерігається відставання зміни індукції від зміни напруженості поля. Це явище отримало назву магнітного гістерезису, а показана на рис.5.6.3. петлеподібна крива залежності B від H при циклічному перемагнічуванні називається петлею гістерезису. Площа петлі гістерезису пропорційна кількості теплоти, що виділяється в одиниці об'єму феромагнетика за один цикл перемагнічування. В залежності від значення коерцитивної сили розрізняють магніто-м'які і магніто-тверді матеріали. Перші характеризуються малим значенням коерцитивної сили ($H_c \sim 0,8 \div 8$ А/м) і дуже малими втратами енергії при перемагнічуванні. Ці матеріали використовуються при виготовленні трансформаторів, електричних

машин. Магніто-тверді матеріали намагнічуються до насичення і перемагнічуються в порівняно сильних магнітних полях. Вони характеризуються високим значенням коерцитивної сили ($H_c \sim 10^4 \div 10^5$ А/м) і залишковою індукцією ($B_0 \sim 1$ Тл). Ці матеріали використовуються для виготовлення постійних магнітів.

Намагнічуваність феромагнетиків та існування петлі гістерезису можна пояснити з точки зору доменної структури феромагнетиків.

При відсутності зовнішнього поля феромагнетики розбиваються на домени таким чином, що їх результуючий магнітний момент близький до нуля. При наявності зовнішнього магнітного поля енергія окремих доменів стає неоднаковою. Тому виникає процес зміщення границь доменів, при яких об'єм доменів з меншою енергією зростає, а з більшою енергією зменшується. Тобто більша частина доменів орієнтується вздовж поля. У випадку дуже слабких полів ці зміщення границь оборотні, а при зростанні поля зміщення границь стає необоротним.

При достатній величині намагнічуючого поля енергетично не вигідні домени зникають зовсім. У дуже сильному полі магнітні моменти всіх доменів встановлюються паралельно до поля. У цьому стані феромагнетик має найбільший магнітний момент, тобто він намагнічений до насичення. Вказані процеси намагнічування проходять із деякою затримкою, тобто зміщення границь відстає від зміни поля, що і призводить до появи гістерезису.

Опис експериментальної установки

Схему експериментальної установки показано на рис. 5.6.4.

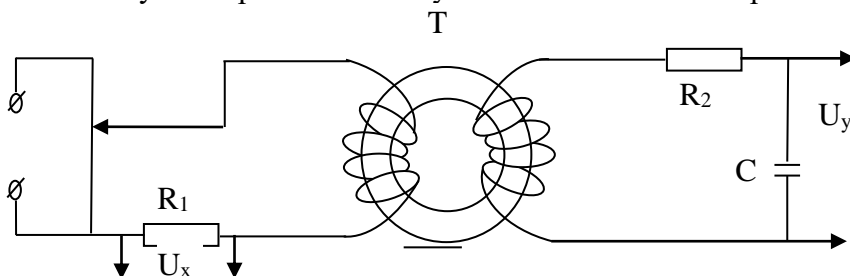


Рис. 5.6.4.

Зразок взято у вигляді тороїда. Магнітне поле, створене струмом, що проходить по обмотці тороїда, буде однорідним і не розсіюватиметься, оскільки магнітні силові лінії в тороїді замкнені. На первинну обмотку тороїда T через опір R_1 за допомогою потенціометра R підводиться змінна напруга від джерела струму. Напруга знімається з R_1 на горизонтально відхиляючі пластини осцилографа. У вторинному полі тороїда знаходиться опір $R_2=10^5\text{Ом}$ і конденсатор C (порядку 1мкФ), з якого напруга подається на вертикально відхиляючі пластини осцилографа.

Напруженість магнітного поля в середині соленоїда:

$$H=n_1I_1, \quad (5.6.1)$$

де n_1 – число витків на одиницю довжини первинної обмотки тороїда, а I_1 – сила струму.

Напруга на горизонтально відхиляючих пластинках осцилографа:

$$U_x = I_1R_1 = \frac{H}{n_1R_1}. \quad (5.6.2)$$

Через те що величина $\frac{1}{n_1R_1}$ – стала, то $U_x \sim H$.

У вторинній обмотці тороїда виникає ЕРС індукції:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad (5.6.3)$$

де $\Delta\Phi = \Delta B n_2 S$ – змінна магнітного потоку. Тоді (5.6.3) матиме вигляд:

$$\varepsilon = n_2 S \frac{\Delta B}{\Delta t}. \quad (5.6.4)$$

Оскільки опір R_2 великий, то $\varepsilon = IR_2$, тобто отримаємо співвідношення:

$$IR_2 = n_2 S \frac{\Delta B}{\Delta t}. \quad (5.6.5)$$

Звідки

$$I = \frac{n_2 S}{R_2} \frac{\Delta B}{\Delta t}. \quad (5.6.6)$$

Знайдемо спад напруги на конденсаторі:

$$U_c = U_y = \frac{q}{C} = \frac{I \Delta t}{C} = \frac{n_2 S}{R_2 C} \Delta B. \quad (5.6.7)$$

Оскільки величина $\frac{n_2 S}{R_2 C} = const$ для цього тороїда, то

$U_y \sim \Delta B$. При зміні індукції поля від 0 до B матимемо $U_y \sim B$.

Отже, якщо на одну пару відхиляючих пластин осцилографа подати напругу $U_x \sim H$, а на другу $-U_y \sim B$, то за один період синусоїдального змінного струму слід електронного променя на екрані опише повну петлю гістерезису, а за кожний наступний період її повторить. Тому на екрані весь час можна спостерігати петлю гістерезису.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати установку за схемою (рис.5.6.4).
2. Змінюючи величину напруги за допомогою потенціометра, спостерігати відповідні зміни форми петлі гістерезису. Замалювати ці петлі.
3. Встановити на екрані осцилографа петлю гістерезису, близьку до граничної, замалювати її.
4. Записати параметри схеми n_1 ; R_1 ; n_2 ; S ; R_2 ; C . Виміряти і записати величини відрізків OH_c , OB_0 , OC_s , OD_s (рис. 5.6.3).
5. Обчислити коерцитивну силу H_c зразка за формулою $H_c = n_1 \frac{(OH_c) \cdot C_x}{R_1}$, де C_x – чутливість осцилографа за каналом "X".

6. Обчислити залишкову індукцію зразка : $B_0 = \frac{R_3(OB_0)C_y}{N_2 S}$, де C_y – чутливість осцилографа за каналом Y.

7. Обчислити індукцію та напруженість насичення за формулами: $B_s = \frac{R_3 C(OB_s) C_y}{N_2 S}$ і $H_s = \frac{n_1 C(OH_s) C_x}{R_1}$.

8. Зменшити напругу на потенціометрі до нуля. При цьому петля гістерезису на екрані осцилографа перетвориться в точку,

відповідно $H \approx 0$, $B \approx 0$. Збільшуючи ступінчасто амплітуду змінної напруги, зареєструвати величини відрізків OB_s і OH_s . Ці відрізки несуть інформацію про точки на кривій намагнічування зразка $B(H)$. Побудувати графік залежності $B=f(H)$.

9. Визначити відносну магнітну проникливість середовища

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \text{ для кожної точки і побудувати графік } \mu = \psi(H).$$

II варіант

Мета: Ознайомитись із фізичними процесами, які відбуваються у феромагнетик у його намагнічуванні, зняти криву намагнічування та визначити втрати на перемагнічування.

Обладнання: Касета ФПЕ-07, джерело живлення, осцилограф, генератор сигналів низької частоти, підсилювач.

Опис експериментальної установки

Принцип роботи установки базується на явищі гістерезису, яке виникає у феромагнетиках. Досліджуванним зразком є осердя тороїдального трансформатора із марганець-цинкового фериту з двома обмотками. На первинну (намагнічуючу) обмотку подається сигнал із генератора низької частоти, вторинна (вимірювальна) під'єднується до осцилографа, на екрані якого спостерігаємо петлю гістерезису досліджуваного зразка.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему за рис. 5.6.5.

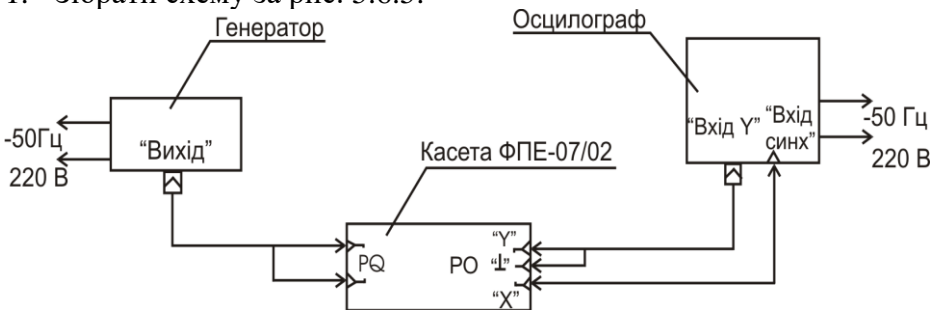


Рис. 5.6.5

2. Увімкнути осцилограф і вивести електронний промінь у центр координатної сітки.

3. Увімкнути генератор сигналів, підсилювач і джерело живлення в мережу і подати на касету сигнал із генератора частотою ~ 100 Гц максимальної амплітуди.
 4. За допомогою ручок "Підсилення по вертикалі", "Підсилення по горизонталі" досягти того, щоб петля гістерезису мала ділянку насичення і займала більшу частину екрану.
 5. Визначити координати n_x і n_y вершини петлі.
 6. Зменшуючи напругу вхідного сигналу, за допомогою потенціометра на панелі генератора НЧ, отримати на екрані осцилографа сімейство петель гістерезису, для кожної з яких виміряти координати вершин.
 7. Вимірювання проводити до тих пір, поки петля не зіллється в точку.
 8. Обрахувати значення K_x і K_y за формулами: $K_x = \mu_0 \frac{n_1}{R_2} u_x$;
 $K_y = \frac{R_1 C}{n_2 S} u_y$. Величини u_x і u_y паспорта до осцилографа.
 9. Обрахувати значення B_0 і B для координат вершин усіх отриманих петель гістерезису за формулами: $B_0 = K_x n_x$, $B = K_y n_y$.
 10. За отриманими даними побудувати графік залежності $B = f(B_0)$.
 11. Зняти на міліметровий папір одну із петель гістерезису, вибравши за осями X і Y такий же масштаб, як по координатній сітці.
 12. Підрахувавши число n міліметрових клітинок, що знаходяться у верхній частині петлі, обчислити число всіх клітинок за формулою: $N = 2n$.
 13. Обчислити теплові втрати на перемагнічення: $Q = \frac{K_x K_y}{\mu_0} \nu N$, де
 ν - частота сигналу з генератора НЧ.
 14. Обчислити похибки і зробити висновки.
- Контрольні питання**
1. Які речовини називаються феромагнетиками? Чим вони відрізняються від інших речовин?
 2. Як відбувається намагнічування феромагнетиків?

3. Що таке петля гістерезису? Які причини її викликають?
4. Поясніть явище гістерезису з точки зору доменної структури.
5. Що таке осцилографічний метод дослідження феромагнетиків?
6. Як визначити коерцитивну і залишкову індукцію, маючи петлю гістерезису, отриману за допомогою осцилографа?
7. Що називається магнітною проникливістю?
8. Якими магнітними моментами володіє електрон в атомі? Що таке магнітний момент атома?
9. Що таке вектор намагніченості? Яка величина може служити її аналогом в електростатиці?
10. Виведіть зв'язок між векторами магнітної індукції \vec{B} , напруженістю магнітного поля \vec{H} і вектором намагніченості \vec{M} ?

Задачі для самопідготовки

1. Покажіть, що площа петлі гістерезису пропорційна роботі перемагнічування на одиницю об'єму.
2. Шматок заліза внесли в магнітне поле напруженістю $H=10^3$ А/м. Визначіть: а) магнітну проникливість; б) намагніченість; в) магнітну сприйнятливість.

Методичні поради

Теоретичний матеріал цієї лабораторної роботи може бути використаний учителем фізики в 10 класі при вивченні тем "Магнітні властивості речовини", "Феромагнетики". Явище гістерезису доцільно вивчати в класах із поглибленим вивченням фізики.

5.7. Визначення точки Кюрі феромагнітних сплавів металів

Тема: Визначення точки Кюрі феромагнітних сплавів металів.

Мета: Визначити температуру Кюрі для феромагнітних сплавів.

Обладнання: електропіч із вимірювальною обмоткою та феритовим осердям, мікроамперметр, діод типу D 220, хромель-алюмілева

термопара, потенціометр для вимірювання ЕРС термопари, секундомір, джерело живлення.

Теоретичні відомості

Здатність пара- і феромагнетиків намагнічуватися різна при різних температурах, тобто їхня магнітна сприйнятливність залежить від температури. Вона зменшується зі збільшенням температури. Навпаки, магнітна сприйнятливність діамагнетиків практично не залежить від температури.

Для багатьох парамагнітних речовин зміна χ із температурою відбувається згідно з законом Кюрі:

$$\chi = \frac{C}{T}, \quad (5.7.1)$$

де T – температура зразка, C – постійна Кюрі, що залежить від роду речовини. Магнітна сприйнятливність таких речовин монотонно змінюється зі зміною температури. Подібні речовини називаються нормальними парамагнетиками.

Залежність магнітної сприйнятливності від температури для феромагнетиків має більш складний характер. При підвищенні температури здатність феромагнетиків намагнічуватися зменшується. При цьому падають значення їх магнітної сприйнятливності і проникливості при будь-якому значенні напруженості зовнішнього магнітного поля, послаблюється гістерезис і зменшується намагніченість насичення. При деякій температурі T_k , що називається температурою Кюрі, речовина стає звичайним парамагнетиком, магнітна сприйнятливність її визначається формулою:

$$\chi = \frac{C}{T - T_k}. \quad (5.7.2)$$

Ця залежність χ від температури називається законом Кюрі-Вейса. У точці Кюрі при переході від феромагнітного в звичайний парамагнітний стан спонтанна намагніченість дорівнює нулю (рис.5.7.1.) і спостерігається стрибок теплоємності речовини (рис.5.7.1.).

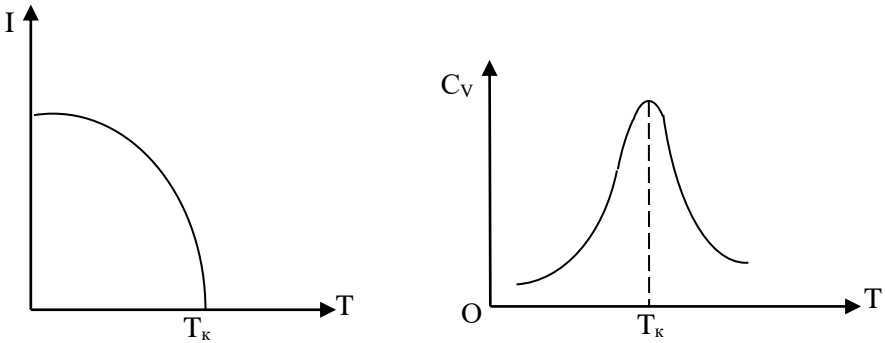


Рис. 5.7.1.

Перехід речовини із феромагнітного стану в парамагнітний стан, що відбувається в точці Кюрі, не супроводжується виділенням чи поглинанням теплоти. Тому такий перехід є прикладом фазового переходу другого роду.

Потрібно зазначити, що в точці Кюрі спостерігається особливо великий магнітокалоричний ефект, який полягає в тому, що при адиабатному процесі зміна намагніченості викликає зміну температури. Рівняння, що описує такий ефект, має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial t}(W + IH)dT = T \frac{\partial H}{\partial T} \partial I, \quad (5.7.3)$$

де W - енергія всього тіла, I - намагніченість, H - напруженість поля.

Ліва частина цього рівняння дорівнює:

$$\frac{\partial}{\partial T}(W + IH)dT = C_v dT, \quad (5.7.4)$$

де C_v - теплоємність при $I=0$. Праву частину ми можемо обчислити, використавши закон Кюрі-Вейса, із якого випливає, що $H = \frac{I}{C}(T - T_k)$, тому $\frac{\partial H}{\partial T} = \frac{I}{C}$. Отже:

$$T \frac{\partial H}{\partial T} \partial I = \frac{CT}{2(T - T_k)^2} d(H^2). \quad (5.7.5)$$

Остаточно рівність (5.7.3) набуває такого вигляду:

$$C_V dT = \frac{CT}{2(T - T_k)} d(H^2) . \quad (5.7.6)$$

При $T=T_k$, магнітокалоричний ефект буде досить значний. При температурах, близьких до температури Кюрі, тепла енергія доменів стає настільки великою, а самі ці структури настільки рухливими, що відбувається розорієнтація, тобто домени при таких температурах розміщуються хаотично.

Опис експериментальної установки

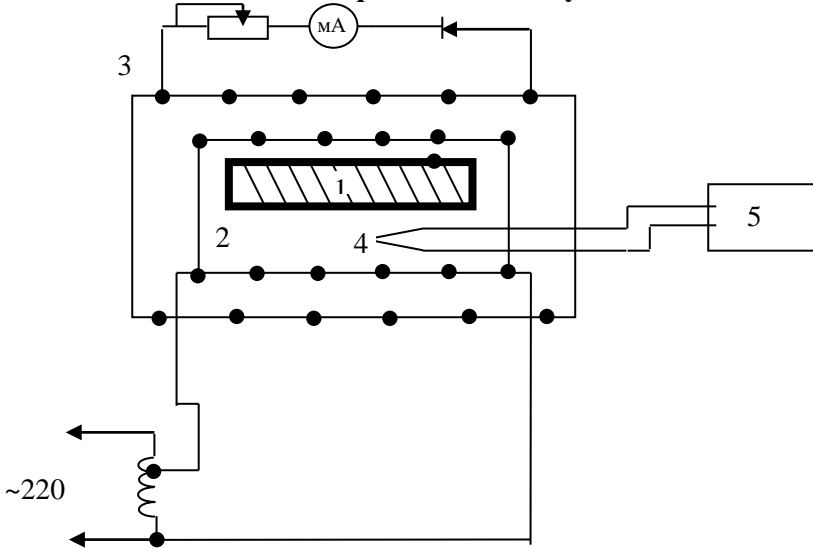


Рис. 5.7.2.

Установка для визначення точки Кюрі (рис. 5.7.2) складається з електропечі (1), в середині якої знаходиться феритове осердя (2). Для вимірювань намотано вимірювальну котушку (3). Силу струму в цій котушці фіксують за допомогою міліамперметра, а температуру феритового осердя за допомогою термопарі (4), що під'єднана до потенціометра (5).

В осерді магнітний потік змінюється за синусоїдним законом зміни струму в первинній обмотці (2). ЕРС індукції дорівнює:

$$\varepsilon_1 = I_1 R_1 - U_1 , \quad (5.7.7)$$

де $I_1 R_1$ -спад напруги на активному опорі обмотки, U_1 -ефективне значення напруги на вході обмотки. У вторинній обмотці (3) ЕРС дорівнює:

$$\varepsilon_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot \varepsilon_1, \quad (5.7.8)$$

де N_1, N_2 -кількість витків у первинній і вторинній обмотці.

Якщо $I_1 R_1 = U_1$, то ЕРС індукції у вимірювальній обмотці дорівнює нулю, а значить, і струм дорівнює нулю ($I_2=0$).

При температурах, близьких до точки Кюрі, магнітна проникливість феритового осердя різко спадає, а отже, зменшується і магнітний потік ($\Phi \rightarrow 0$), який і приводить до зменшення ε_2 . Спад сили струму у вимірювальній обмотці фіксується міліамперметром, температура визначається за е.р.с. термопар.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за схемою (рис. 5.7.2), увімкнути струм живлення електропечі, ввімкнути секундомір і одночасно занести до таблиці покази міліамперметра та ЕРС термопар.
2. Покази міліамперметра та значення ЕРС фіксувати через 10-15 с, а при зменшенні струму скоротити інтервал до 3-5 с.
3. Нагрівання припинити, коли струм припинить зменшуватися.
4. Побудувати графік залежності I_2 від часу t і температури T від часу t . Ділянка різкого зменшення струму відповідає температурі Кюрі.
5. Охолодити зразок і провести повторний експеримент.
6. Визначити середнє значення температури Кюрі для речовини.
7. Провести відповідні експерименти для іншого феромагнетика.
8. Порівняти температури Кюрі для різних феромагнетиків. Зробити висновки.

Контрольні питання

1. Від чого залежить здатність пара- і феромагнетиків намагнічуватися?
2. Запишіть закон зміни магнітної сприйнятливості від температури для пара і феромагнетиків.
3. Дайте визначення точки Кюрі і поясніть, які відбуваються процеси з точки зору доменної структури при цій температурі.

4. Покажіть графік залежності I від T і C_V від T , що відбувається з теплоємністю при $T=T_K$.
5. Чому перехід при $T=T_K$ називають фазовим переходом другого роду? В чому суть магнітокалоричного ефекту?
6. На яких фізичних явищах і законах ґрунтується розглядуваний метод визначення точки Кюрі?

Задачі для самопідготовки

1. Чи можна електромагнітним краном переносити дуже розігріті виливки?
2. Температура Кюрі для заліза становить 770°C , а для нікелю 360°C , який із цих матеріалів краще використовувати при високих температурах як магнітний матеріал?

Методичні поради

Перша частина цього теоретичного матеріалу може бути використана вчителем фізики на уроці в 10 класі при вивченні теми "Ферромагнетики", а експериментальна установка, в якій можна використовувати демонстраційний міліамперметр і електричний термометр, може бути використана для демонстрації "Розмагнічування за допомогою нагрівання".

Розділ VI. Лабораторні роботи змістового модуля "Електромагнітна індукція. Квазістаціонарні струми. Електромагнітні коливання і хвилі"

6.1. Дослідження роботи однофазного трансформатора

Тема: Дослідження роботи однофазного трансформатора.

Мета: Дослідити роботу однофазного трансформатора в режимі холостого ходу і при різних навантаженнях. Визначити основні характеристики трансформатора.

Обладнання: трансформатор, вольтметри, амперметри, реостат, ватметр.

Теоретичні відомості

Трансформатор – це пристрій, який служить для перетворення напруги і сили змінного струму. Він складається із замкнутого осердя, на якому розміщено дві обмотки – первинна і вторинна. Кінці первинної обмотки (вхід трансформатора) під'єднані до джерела змінного струму, а кінці вторинної обмотки – до споживача електричної енергії.

Трансформатори, в яких у вторинних обмотках число витків більше порівняно з первинною, називаються підвищувальними.

Розглянемо, як зв'язані між собою вхідна напруга U_1 і вихідна напруга U_2 . Нехай Φ – магнітний потік в осерді. ЕРС, що виникає в первинній обмотці, дорівнює:

$$E_1 = -N_1 \frac{d\Phi}{dt} . \quad (6.1.1)$$

ЕРС вторинної обмотки:

$$E_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} , \quad (6.1.2)$$

де N_1, N_2 - число витків у первинній і у вторинній обмотках.

Використавши закон Ома для ділянки кола з ЕРС, знайдемо напругу на вході трансформатора:

$$U_1 = I_1 R_1 - E_1 = I_1 R_1 + N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1.3)$$

і напругу на виході трансформатора:

$$U_2 = I_2 R_2 - E_2 = I_2 R_2 + N_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (6.1.4)$$

тут R_1, R_2 – опори первинної і вторинної обмотки, а I_1 і I_2 – сила струму в них.

Якщо вторинна обмотка розімкнута (режим холостого ходу), то $I_2=0$ і для первинної обмотки виконується умова $I_1 R_1 << E_1$, то, розділивши (6.1.4) на (6.1.3), отримаємо:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (6.1.5)$$

Відношення $k = \frac{N_2}{N_1}$ називається коефіцієнтом

трансформації.

Якщо $k > 1$ – трансформатор підвищувальний, а якщо $k < 1$ – знижувальний. У випадку, коли вторинна обмотка замкнута, то спадом напруги $I_2 R_2$ нехтувати не можна і замість виразу (6.1.5) отримуємо більш складне співвідношення.

Якщо розглядати навантажений трансформатор і знехтувати незначними втратами енергії на ньому, то можна вважати, що потужності в обох обмотках однакові: $U_1 I_1 = I_2 E_2$, звідки:

$$\frac{E_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (6.1.6)$$

Коефіцієнт корисної дії (ККД) трансформатора η , як і всякої машини, визначається відношенням корисної потужності P_2 до всієї підведеної потужності P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (6.1.7)$$

Втрати потужності в трансформаторі складаються з втрат у мідних проводах обмоток, пов'язаних із нагріванням провідників, а також у сталі осердя, зумовлених гістерезисом (перемагніченням) і вихровими струмами. Останні втрати визначаються величиною і частотою зміни магнітного потоку і від навантаження не залежать. Для зменшення втрат, пов'язаних із вихровими струмами, осердя трансформаторів виготовляють із листової сталі і окремі ділянки ізолюють, що приводить до зменшення вихрових струмів, а отже, і

зменшення втрат. Найбільший ККД мають трансформатори при рівності втрат у сталі і міді. Сучасні силові трансформатори забезпечують ККД 97–98%.

Опис експериментальної установки

Установку для дослідження роботи трансформатора показано на рис. 6.1.1.

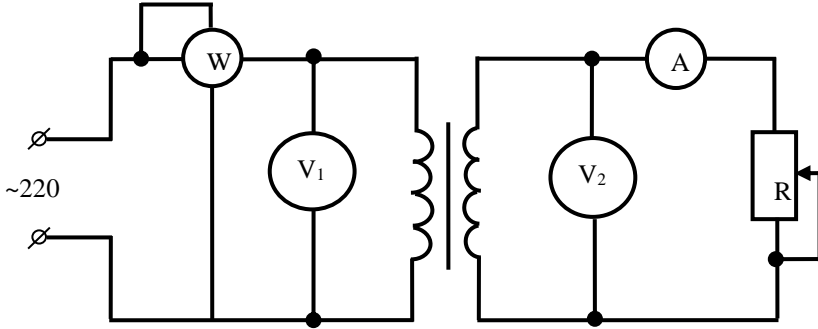


Рис. 6.1.1.

За допомогою вольтметрів визначають спад напруги в первинній і вторинній обмотках трансформатора. Амперметр служить для визначення сили струму у вторинній обмотці трансформатора, коли вона замкнута на навантаження R . Ватметром визначають потужність у первинній і вторинній обмотках трансформатора.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за схемою, показаною на рис. 6.1.1.
2. Залишивши перемикач незамкненим, визначити U_1 і U_2 , а також коефіцієнт трансформації k .
3. Знаючи кількість витків обмоток N_1 , N_2 , визначити k і порівняти з експериментальним значенням. Розрахувати значення ЕРС

$$E_0 = \frac{U_1}{N_1} = \frac{U_2}{N_2}.$$

4. Замкнувши вторинну обмотку при різних навантаженнях у межах номінальних значень струму I_2 , визначити P_1 і P_2 і обчислити η за формулою (6.1.7).
5. Побудувати графік залежності η від I_2 і встановити, при якому струмі I_2 ККД трансформатора максимальний.

Контрольні питання

1. Яка будова і яке призначення однофазного трансформатора?
2. На чому базується принцип дії трансформатора?
3. Як визначається коефіцієнт трансформації?
4. Як обчислюється коефіцієнт корисної дії трансформатора?
5. Які втрати енергії у трансформаторі і від чого вони залежать?
6. Які умови забезпечують максимальний ККД трансформатора?

Задачі для самопідготовки

1. При напрузі $U_1=100\text{ В}$ на первинній обмотці трансформатора з тороїдальним осердям, магнітна проникливість якої $\mu=2000$, напруга на розімкнутій вторинній обмотці $U_2=199\text{ В}$. Яка напруга була б на розімкнутій вторинній обмотці, якби магнітна проникливість осердя була $\mu_2=20$? Розсіювання магнітного потоку і втрати в осерді не враховувати. Коефіцієнт трансформації трансформатора $k=2$.
2. Первинна котушка трансформатора має 1000 витків. На тому ж осерді міститься чотири вторинні котушки з числом витків 250, 500, 1500 і 10000. Яка напруга буде на кожній котушці, якщо на первинну подати 220 В?

Методичні поради

Теоретичний матеріал цієї лабораторної роботи може бути використаний учителем фізики при проведенні уроку з теми: "Трансформатори" в 11 класі, а саме експериментальна установка, в якій використовується демонстраційний вольтметр і демонстраційний ватметри, може бути використана для демонстраційного експерименту.

6.2. Вивчення процесів зарядки і розрядки конденсатора

Тема: Вивчення процесу зарядки і розрядки конденсатора.

Мета: Дослідити процеси розрядки та зарядки конденсатора та визначити основні характеристики

Обладнання: касета ФПЕ – Пі/09, магазин опорів (2 шт), магазин ємностей, генератор, осцилограф, джерело живлення.

Теоретичні відомості

Якщо обкламки зарядженого конденсатора ємності C замкнуті через опір R , то через нього потече струм. Нехай I , q , U – миттєві значення струму, заряду і різниці потенціалів між обкладками конденсатора (рис. 6.2.1).

Запишемо закон Ома для зовнішньої ділянки кола з опором R :

$$I = \frac{U}{R} . \quad (6.2.1)$$

Будемо вважати струм додатнім, якщо він тече в напрямку обкладинки конденсатора, зарядженої позитивним зарядом. Врахувавши зв'язок між напругою U і зарядом конденсатора q , запишемо, що:

$$I = -\frac{dq}{dt} ; \quad U = \frac{q}{C} . \quad (6.2.2)$$

Враховуючи (6.2.2), рівність (6.2.1) запишемо в такому вигляді:

$$\frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} = 0 . \quad (6.2.3)$$

Розділивши змінні і проінтегрувавши, отримаємо розв'язок диференціального рівняння (6.2.3):

$$q = q_0 e^{-\frac{t}{\tau}} , \quad (6.2.4)$$

де q_0 - початковий заряд конденсатора, а τ - постійна величина, що дорівнює :

$$\tau = RC . \quad (6.2.5)$$

Постійна τ називається часом релаксації і вимірюється в секундах. Час релаксації – це час, протягом якого заряд

конденсатора q змінюється в e разів. Продиференціювавши (6.2.4) за часом, отримуємо закон зміни струму:

$$I = -\frac{dq}{dt} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (6.2.6)$$

де $I_0 = q_0/\tau$ - сила струму в початковий момент часу при $t=0$.

Графік залежності $q(t)$ -заряду конденсатора від часу, представлено на рис. 6.2.2. Графік залежності $I(t)$ має такий же вигляд:

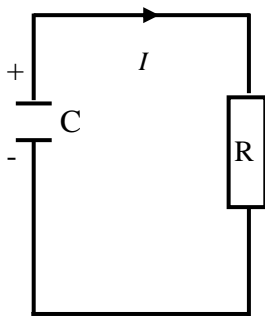


Рис. 6.2.1.

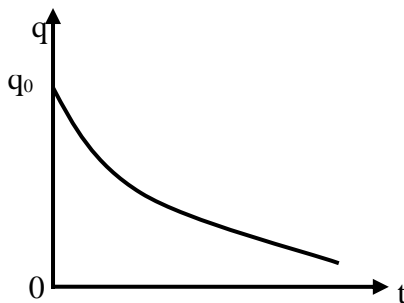


Рис. 6.2.2.

Розглянемо коло, яке складається з послідовно з'єднаних конденсатора ємністю C , резистора з опором R і джерела живлення з ЕРС ε (рис. 6.2.3). У початковий момент конденсатор заряджений (ключ K розімкнутий). У момент часу $t=0$ ключ замкнений і в колі пішов струм, заряджаючи конденсатор. Збільшення заряду на обкладинках конденсатора буде все більш перешкоджати проходженню струму, зменшуючи його. У такому випадку напрямок струму в колі будемо вважати додатнім, бо він тече до обкладки конденсатора, зарядженої позитивним зарядом. Запишемо співвідношення для миттєвих значень струму, заряду і різниці потенціалів на обкладках конденсатора:

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad U = \frac{q}{C}. \quad (6.2.7)$$

Згідно з другим законом Кірхгофа, ЕРС джерела живлення дорівнює сумі спадів напруг на резисторі і конденсаторі:

$$IR + U = \varepsilon. \quad (6.2.8)$$

Враховуючи (6.2.7), перепишемо рівність (6.2.8) наступним чином:

$$\frac{dq}{dt} + \frac{q}{RC} = \frac{\varepsilon}{R}. \quad (6.2.9)$$

Розв'язок диференціального рівняння має вигляд:

$$q = q_{\max} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (6.2.10)$$

де $q_{\max} = \varepsilon C$ - граничне значення заряду на конденсаторі, при t , прямує до нескінченності, а τ - час релаксації.

Продиференціювавши (6.2.10) за часом, знайдемо закон зміни сили струму:

$$I = \frac{dq}{dt} = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (6.2.11)$$

де $I_0 = \frac{\varepsilon}{R}$ - сила струму в початковий момент часу при $t=0$.

Графіки залежності сили $q(t)$ і $I(t)$ подані на рис 6.2.4.

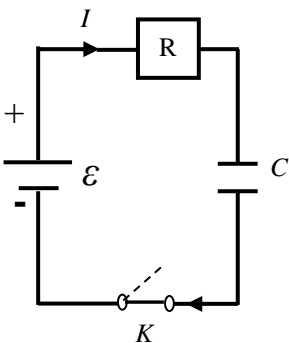


Рис. 6.2.3.

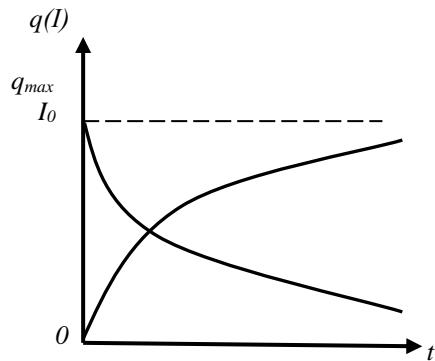


Рис. 6.2.4.

При зарядці (розрядці) конденсатора проходить зміна напруженості електричного поля E і електричного зміщення D у діелектрику.

Наприклад, для плоского конденсатора (рис 6.2.5.) з площею пластини S для довільного моменту часу можна записати:

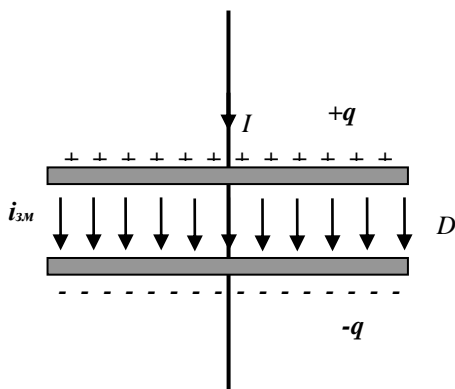


Рис. 6.2.5.

$$D = \epsilon \epsilon_0 E = \frac{q}{S}, \quad (6.2.12)$$

де $D = D(t)$, $E = E(t)$, $q = q(t)$, відповідно заряд

$$q = DS, \quad (6.2.13)$$

а його приріст при зарядці (або розрядці)

$$dq = SdD = d\Phi_D, \quad (6.2.14)$$

де Φ_D - потік вектора зміщення між обкладками конденсатора. Зміну потоку зміщення між обкладками конденсатора можна розглядати як електричний струм у діелектрику, який називається струмом зміщення:

$$i_{зм} = \frac{d\Phi_D}{dt} = \frac{SdD}{dt} = \frac{dq}{dt}. \quad (6.2.15)$$

Опис експериментальної установки

Принцип роботи установки базується на зарядці конденсатора через магазин опорів і залежності нахилу кривих (експонент) зарядки і розрядки конденсатора від параметрів елементів RC -кола. Принципову схему установки зображено на рис.6.2.6.

Із генератора синусоїдальний сигнал подається на касету Пі, з виходу якої прямокутні імпульси через магазин опорів подаються на магазин ємностей. Картина зарядки – розрядки конденсатора спостерігається на екрані осцилографа. Основною частиною

функціональної групи Пі касети ФПЕ-Пі/09 є плата зі

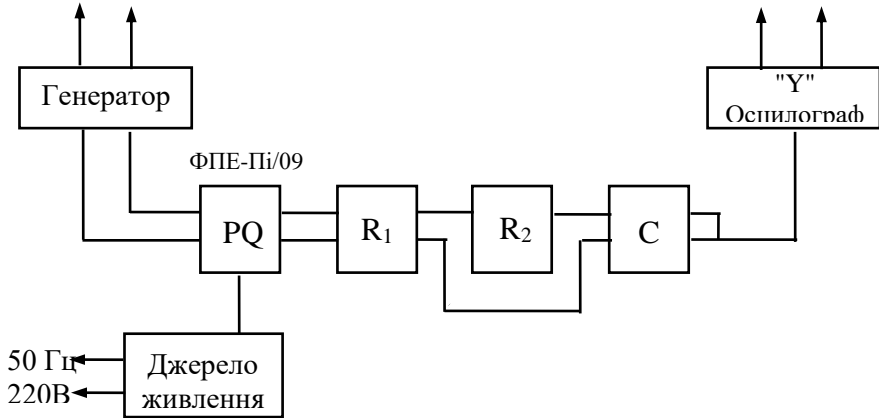


Рис. 6.2.6.

встановленими на ній елементами. На передній панелі встановлені 4 гнізда, 2 кнопкових перемикачі, ручка потенціометра R_1 і вивід, через який подається живлення на перетворювач імпульсів.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричну схему згідно з рис. 6.2.6.
2. Із генератора подати на касету Пі/09 частоту 100 Гц.
3. Отримати на екрані осцилографа криву зарядки – розрядки конденсатора.
4. Шляхом зміни опору на магазині опорів за мітками часу на екрані осцилографа дослідити залежність часу зарядки і розрядки конденсатора.
5. При встановленому опорі провести дослідження, аналогічні п.4 при різних значеннях ємності конденсатора.
6. Зробити висновки.

Контрольні питання

1. За яким законом змінюється заряд на обкладках конденсатора при його замиканні на опір R ?
2. Що таке час релаксації заряду?
3. Запишіть закон зміни струму конденсатора, що розряджається.
4. Що таке струм зміщення?
5. Як зміниться час релаксації, якщо збільшиться електричний опір?

6. Зобразіть на графіку залежність $q(t)$ і $I(t)$ для процесу зарядки конденсатора.

Задачі для самопідготовки

1. Конденсатор ємністю C заряджають до напруги U , після чого замикають на опір R . Яка кількість теплоти ділиться в опорі при розрядці конденсатора?
2. Обкладками конденсатора ємністю $1,5 \text{ мкФ}$ надають заряд $q_0 = 2 \text{ мкКл}$. Потім замикають через опір $R = 4 \text{ кОм}$. Знайти закон зміни струму, що проходить через опір R ; заряд, що пройшов через опір за час $2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$; кількість теплоти, що виділяється в опорі за цей же час.

Методичні поради

Експериментальну установку цієї лабораторної роботи доцільно використати у шкільному курсі фізики, як демонстраційну при вивченні теми "Електроємність. Енергія електричного поля" в 10 класі.

6.3. Вимірювання великих опорів

Тема: Вимірювання великих опорів.

Мета: Користуючись методом неонові лампи, визначити великі опори.

Обладнання: випрямлювач ВУП-2, неонові лампа НЛ, батарея конденсаторів C , панель з еталонним і невідомим опором, ключ K , секундомір, з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Великі (високоомні) опори порядку 10^5 Ом і вище не можна виміряти за допомогою містка Уїтстона. Справді, якщо до схеми містка Уїтстона в якості невідомого опору вмикнути опір, більший за 10^5 Ом , то через міст буде текти настільки слабкий струм, що стрілка гальванометра не буде відхилитися.

Тому для визначення великих опорів варто використовувати інші методи. Одним із них є метод неонові лампи.

Неонові лампа складається із скляного балона, в який впаяно два електроди: анод і катод у вигляді металевих пластинок,

розміщених на відстані 2-3 мм один від одного. В середині балон заповнений неонem Ne під низьким тиском (10–15 мм.рт.ст.).

Основна особливість неонової лампи полягає в тому, що вона починає проводити струм при визначеній напрузі на її електродах.

Якщо напруга на електродах лампи менша, ніж U_R , струм через лампу не проходить, через те що неон є ізолятором (діелектриком). При різниці потенціалів U_R відбувається пробій діелектрика, неон стає провідником і через лампу проходить струм. При цьому він світиться оранжевим світлом, лампа засвічується.

Критична різниця потенціалів U_k , яка залежить від відстані між електродами, від форми електродів, також від природи і тиску газу, який заповнює лампу, називається пробійною напругою, або потенціалом засвічення лампи.

Для того, щоб засвітити лампу, потрібно прикласти напругу U_k , але світитись вона може вже при більш низькій напрузі. Згасне вона при деякій напрузі U_{min} , яка, звичайно значно нижча як U_k .

Ідея методу

Розглянемо

схему рисунка 6.3.1.:

На ній: В – батарея; К – ключ; R – великий опір; нл – неонова лампа; С – конденсатор, ємність якого набагато більша ємності неонової лампи.

Замкнемо ключ.

Від батареї на обкладки

конденсатора і електроди лампи почнуть протікати заряди. Напруга на конденсаторі і електродах лампи буде зростати. Якщо ЕРС батареї вища за потетціал запалювання лампи U_k , то настане момент, коли напруга на конденсаторі і електродах лампи досягне величини U_k . Тоді між електродами лампи відбувається пробій діелектрика. Лампа спалахне, через неї пройде струм, конденсатор

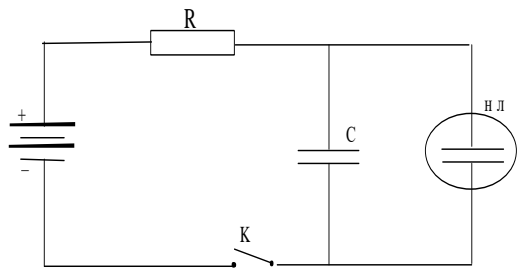


Рис. 6.3.1.

розрядиться, різниця потенціалів на електродах лампи впаде до величини U_{min} , лампа згасне, і ланцюг розімкнеться.

Після розмикання кола напруга на обкладках конденсатора і електродах лампи знову почне зростати, і коли вона досягне величини U_k , лампа знову запалиться.

Таким чином, лампа буде періодично запалюватися, а напруга на її електродах і на обкладинках конденсатора буде зростати і спадати, здійснюючи періодичні коливання від величини U_{min} до величини U_k .

Очевидно, чим більший опір R , тим меншої сили струм буде проходити в колі і повільніше буде заряджатися конденсатор. Тому пройде більше часу, поки напруга на його обкладинках досягне величини U_k , і тим рідше відбуватимуться спалахи лампи.

Таким чином, за проміжок часу t між спалахами лампи можна говорити про величину опору R . На цьому заснований метод визначення великих опорів.

Розглянемо процес розрядки конденсатора через великий опір більш детально.

Кількість електрики, яка необхідна для зарядки конденсатора ємністю C до напруги U_k , визначається рівнянням:

$$Q = C U_k . \quad (6.3.1)$$

Якщо середнє значення сили зарядного струму позначити через $I_{сер.}$, то кількість електрики може бути визначена як добуток $I_{сер.}$ на час t зарядки конденсатора:

$$Q = I_{сер.} t . \quad (6.3.2)$$

Напруга U_0 , одержана від батареї В, спадає в основному на двох ланках кола: на конденсаторі C і на опорі R (в порівнянні з великим опром, омичним опором останньої частинки кола можна знехтувати).

Якщо в початковий момент часу напруга на конденсаторі дорівнює U_{min} , то на опорі спадає решта напруги:

$$U_1 = U_0 - U_{min} . \quad (6.3.3)$$

З часом напруга на конденсаторі зростає, в деякий момент досягає величини U_k . Тоді на опорі залишається різниця потенціалів:

$$U_2 = U_0 - U_k . \quad (6.3.4)$$

Через те що U_k – величина стала, а $U_{min} < U_k$, то з формул (6.3.3) і (6.3.4) видно, що $U_1 > U_2$.

Таким чином, різниця потенціалів на опорі є величина змінна, яка коливається між значеннями U_{min} і U_k .

Для простоти міркувань замінимо цю змінну різницю потенціалів деякою середньою різницею потенціалів $U_{сеп}$. Тоді середня сила зарядного струму, який протікає через опір R , визначається із закону Ома:

$$I_{сеп} = \frac{U_{сеп}}{R} . \quad (6.3.5)$$

Підставимо знячення $I_{сеп}$ із виразу (6.3.5) у рівняння (6.3.2):

$$Q = \frac{U_{сеп}}{R} \cdot t . \quad (6.3.6)$$

Прирівняємо праві частини рівнянь (6.3.1) та (6.3.6).

Звідси:

$$\frac{U_{сеп}}{R} \cdot t = CU_k , \quad R = \frac{U_{сеп}}{CU_k} \cdot t . \quad (6.3.7)$$

Через те що величини U_k , C , $U_{сеп}$ для цієї схеми можна рахувати сталими (величину $U_{сеп}$ можна вважати сталою тільки для невеликого інтервалу змін), одержимо кінцеву формулу, яка поєднує величину великого опору з проміжками часу між спалахами лампи.

$$R = k \cdot t , \quad (6.3.8)$$

де $k = \frac{U_{сеп}}{CU_k}$.

Опис експериментальної установки

1. Зібрати схему (рис. 6.3.2.).
2. Увімкнути еталонний опір.
3. Визначити проміжок часу t_0 між двома спалахами. Величину t_0 визначають тричі.
4. Відомі величини R_0 і t_0 підставляють у формулу (6.3.8) і знаходять із неї значення сталого коефіцієнта k .

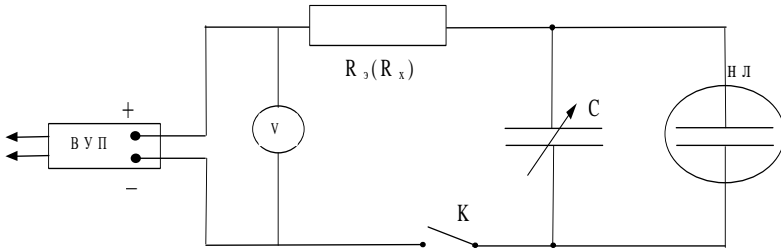


Рис. 6.3.2.

5. Замінюють у схемі еталонний опір досліджуваним опором і визначають період спалахів, як указано в п.3. Через те що величина k вже визначена, то із формули (6.3.8) знаходимо R_1 . Аналогічно визначають невідомий опір R_2 .
6. Вимірюють опір послідовного з'єднання R_1, R_2 і перевіряють, чи справедлива формула: $R_{noc} = R_1 + R_2$ в границях похибок вимірювань.

Дані вимірювання зручно записати у таблицю:

Виміри	t_0	t_1	t_2	t_{noc}
1.				
2.				
3.				
середнє				
похибки				
шукане значення				

$$\text{Через те що } k = \frac{R_0}{t_0}, R_1 = kt, \text{ то } R_1 = \frac{R_0}{t_0} \cdot t.$$

Тому похибку вираховують за формулою: $\frac{\Delta R}{R_1} = \frac{\Delta t_1}{t_1} + \frac{\Delta t_0}{t_0} + \frac{\Delta R_0}{R_0}$.

Похибкою опору знехтуємо, через те що R_0 – еталонний опір. Аналогічно визначають похибки величин R_2, R_1 і R_{noc} .

Контрольні питання

1. Поясніть принцип дії методу, що використовується у роботі.
2. Що буде, якщо вимкнути зі схеми конденсатор?

3. Як відіб'ється на періоді спалахів:
 - а) зменшення ємності конденсатора;
 - б) зменшення ЕРС батареї;
 - в) зменшення опору ?
4. Що таке пробійна напруга?
5. Вкажіть методи вимірювання опорів.
6. Який фізичний зміст сталої k у співвідношенні (6.3.8)?

Задачі для самопідготовки

1. Еталонний опір $R_0 = 10^6 \text{ Ом}$, неонова лампа при ввімкненні у схему спалахує 100 разів за секунду. Визначити невідомий опір, якщо для нього неонова лампа спалахує 150 разів за 100 с.
2. З якою швидкістю електрон повинен влетіти в однорідне електричне поле з різницею потенціалів 6 В, щоб іонізувати атом водню? Енергія іонізації атома водню $2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$.

Методичні поради

Ця лабораторна робота може бути проведена як робота фізичного практикуму в 10 класі з розділу "Електродинаміка".

6.4. Визначення ємності конденсаторів за допомогою містка Сотті

Тема: Визначення ємності конденсаторів за допомогою містка Сотті.

Мета: Користуючись містковою схемою для змінного струму, визначити ємність конденсаторів, а також їх ємність при паралельному і послідовному з'єднанні. Дослідити залежність ємнісного опору від частоти і від ємності.

Обладнання: Набір конденсаторів, реохорд, головні телефони, регулятор змінного струму з регулюючою частотою.

Теоретичні відомості

Нехай на конденсаторі зміна напруги відбувається за законом $U = U_0 \sin \omega t$. Миттєве значення напруги дорівнює

$U = \frac{q}{C}$. Отже:

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dq}{dt}. \quad (6.4.1)$$

Оскільки $U = U_0 \sin \omega t$, а $\frac{dq}{dt} = i$, тоді рівність (6.4.1)

можна записати як:

$$\omega U_0 \cos \omega t = \frac{i}{C}. \quad (6.4.2)$$

Звідки:

$$i = \omega C U_0 \cos \omega t = \omega C U_0 \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (6.4.3)$$

Тут $I_0 = \omega C U_0$ – амплітуда струму. Зазначимо, що струм у конденсаторі випереджує по фазі напругу на кут $\frac{\pi}{2}$, тобто сила струму досягає максимального значення на четверть періоду раніше, ніж напруга.

Співвідношення між амплітудними значеннями напруги і сили струму можна записати у вигляді:

$$U_0 = \frac{1}{\omega C} I_0 . \quad (6.4.4)$$

Коефіцієнт пропорційності $\frac{1}{\omega C}$ називається ємнісним опором:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} . \quad (6.4.5)$$

Як видно із останнього виразу, в колі змінного струму, ємнісний опір залежить від частоти і ємності. При малих частотах ($\omega \rightarrow 0$) ємнісний опір дуже великий ($X_C \rightarrow \infty$), а при великих частотах ($\omega \rightarrow \infty$) ємнісний опір малий ($X_C \rightarrow 0$). Знаючи значення X_C і ω , можна знаходити ємність. Найчастіше це роблять, використовуючи місток Сотті змінного струму.

Опис експериментальної установки

Схему, за допомогою якої визначають ємність конденсатора, показано на рис.6.4.1

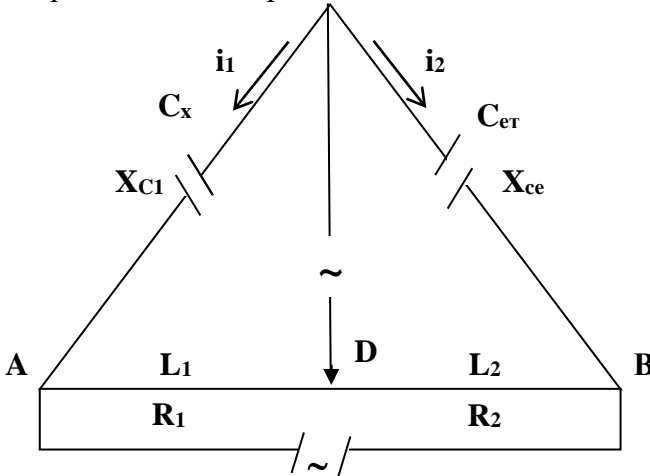


Рис. 6.4.1

Опори X_{C_x} і $X_{C_{ст}}$ – реактивні, а опори R_1 і R_2 – активні, тобто суми фазових кутів між струмом і напругою протилежних плечей містка рівні. Переміщуючи повзунок реостата, домагаються, щоб сигнал через головні телефони не проходив або був

мінімальний. Це означає, що потенціали $\varphi_A = \varphi_B$. Користуючись законом Ома для ділянок кола, можна записати:

$$U_1 = i_1 X_{Cx}; \quad U_2 = i_1 R_1; \quad U_3 = i_2 X_{Cem}; \quad U_4 = i_2 R_2, \quad (6.4.6)$$

але $U_1 = U_3 = \varphi_c - \varphi_B = \varphi_c - \varphi_A$; $U_2 = U_4 = \varphi_A - \varphi_D = \varphi_B - \varphi_D$. Отже, отримаємо:

$$i_1 X_{Cx} = i_2 X_{Cem}, \quad (6.4.7)$$

$$i_1 R_1 = i_2 R_2.$$

Розділивши перше рівняння на друге, будемо мати:

$$\frac{X_{Cx}}{R_1} = \frac{X_{Cem}}{R_2} \quad (6.4.8)$$

звідки

$$X_{Cx} = \frac{R_1}{R_2} X_{Cem}. \quad (6.4.9)$$

Оскільки $R_1 = \rho \frac{L_1}{S}$, а $R_2 = \rho \frac{L_2}{S}$, то співвідношення (6.4.9)

можемо записати як:

$$X_{Cx} = \frac{L_1}{L_2} X_{Cem}. \quad (6.4.10)$$

Врахувавши значення опорів $X_C = \frac{1}{\omega \tilde{N}_x}$ і $X_{Cem} = \frac{1}{\omega C_{em}}$,

отримаємо вираз для визначення невідомої ємності:

$$C_x = \frac{L_2}{L_1} C_{em}. \quad (6.4.11)$$

Порядок виконання роботи

1. Скласти схему, зображену на рис. 6.4.1. Переміщуючи повзунок реостата, досягти того, щоб сигнал у телефонах був мінімальний або відсутній.

2. Записати значення L_2 і L_1 , визначити C_x за формулою (6.4.11) і знайти X_{C_x} за формулою (6.4.10) при відомій частоті.
3. Повторити вимірювання для другого і третього невідомого конденсатора і їх батарей (при паралельному і послідовному з'єднанні), не змінюючи частоту.
4. Порівняти значення ємності при паралельному і послідовному з'єднанні, визначені теоретично, з експериментальними.
5. Побудувати графік залежності X_C від C (за результатами експериментів).
6. Змінюючи частоту генератора, знайти опір невідомого конденсатора і побудувати графік залежності X_C від ω .

Контрольні питання

1. Встановіть співвідношення між струмом і напругою в колі змінного струму, в якому є лише один конденсатор.
2. Що таке ємнісний опір?
3. Як ємнісний опір залежить від частоти і ємності?
4. Виведіть формулу для обчислення ємності конденсатора за допомогою містка Сотті.
5. Якої умови необхідно дотримуватися в місткових схемах змінного струму?
6. За якої умови два різних конденсатори C_1 і C_2 можуть мати однакові ємнісні опори?

Задачі для самостійної підготовки

1. Конденсатор ємністю 5 мкФ і провідник опором 150 Ом ввімкнені послідовно в коло змінного струму з напругою 120 В і частотою 50 Гц . Визначити максимальне і ефективне значення сили струму, зсув фаз між струмом і напругою.
2. Плоский конденсатор залитий нітробензолом, питомий опір якого $10^7 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ і діелектрична проникливість 32. Знайдіть різницю фаз між струмом і напругою при частоті 50 Гц .

Методичні поради

Теоретичний матеріал цієї лабораторної роботи вчитель фізики може використати на уроці 11 класі з теми "Ємнісний опір", а експериментальна частина в скороченому варіанті як робота фізичного практикуму в 11 класі.

6.5. Визначення активного опору, індуктивності і ємності в колі змінного струму

Тема: Визначення активного опору, індуктивності і ємності у колі змінного струму.

Мета: Визначити активний, індуктивний і ємнісний опір, обчислити індуктивність котушки і ємність конденсатора. Перевірити закон Ома для змінного струму.

Обладнання: Автотрансформатор, випрамляч, батарея конденсаторів, котушка індуктивності, реостат, амперметр, вольтметр, три двополюсні перемикачі.

Теоретичні відомості

Нехай генератор змінного струму замкнутий на зовнішнє коло, яке містить тільки активний опір. Змінний струм змінюється за законом $i = i_0 \sin \omega t$, де i_0 – амплітуда значення сили струму.

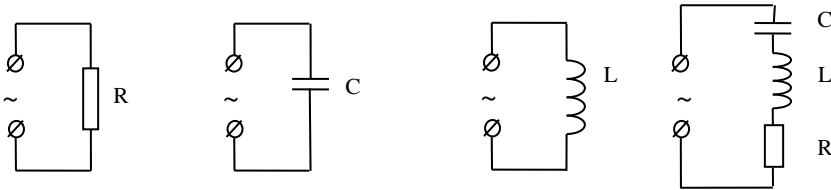


Рис. 6.5.1.

Використавши закон Ома (рис. 6.5.1), отримаємо:

$$U = iR = i_0 R \sin \omega t, \quad (6.5.1)$$

позначимо $i_0 R = U_0$ - амплітуду напруги, отримаємо закон зміни напруги: $U = U_0 \sin \omega t$.

Таким чином, напруга на кінцях ділянки кола змінюється так само, як і сила струму, при чому різниця фаз між коливаннями струму і напруги дорівнює нулю.

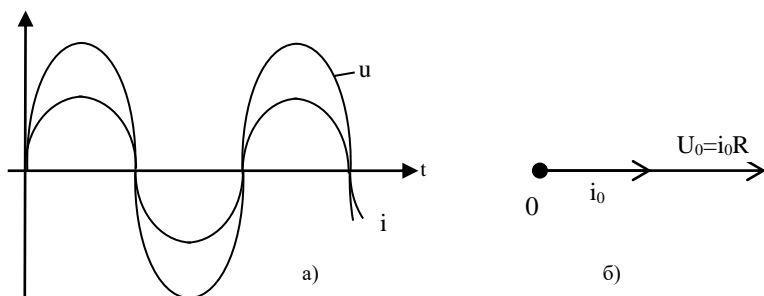


Рис. 5.6.2.

На векторній діаграмі вектор струму i і напруги будуть мати один і той же напрям.

Якщо ділянка кола містить тільки конденсатор ємністю C (рис. 6.5.1) і сила струму змінюється за законом $i = i_0 \sin \omega t$, то заряд конденсатора буде дорівнювати:

$$q = \int i dt = \int i_0 \sin \omega t dt = -\frac{i_0}{\omega} \cos \omega t. \quad (6.5.2)$$

Знаючи заряд, обчислимо напругу на конденсаторі:

$$U = \frac{q}{C} = -\frac{i_0}{\omega C} \cos \omega t = \frac{i_0}{\omega C} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (6.5.3)$$

Амплітуда напруги $U_0 = \frac{i_0}{\omega C}$ і, порівнявши цей вираз із законом Ома для ділянки кола, отримаємо, що ємнісний опір

$$X_c = \frac{1}{\omega C}. \quad (6.5.4)$$

Аналіз виразу (6.5.3) показує, що при синусоїдальних коливаннях сили струму в колі напруга на конденсаторі змінюється за законом синуса, але коливання напруги відстають у фазі від коливань струму на $\frac{\pi}{2}$ (рис. 6.5.2.а). Векторна діаграма для цього

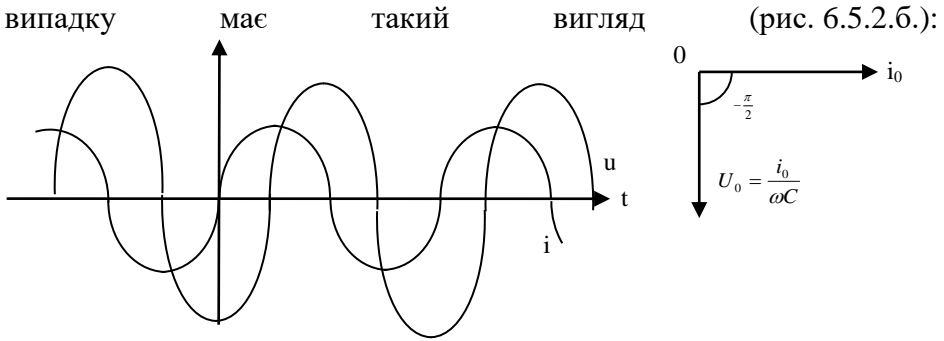


Рис. 6.5.3.

Коли ділянка кола містить тільки індуктивність (рис. 6.5.1), то при наявності змінного струму в котушці індуктивності виникає е.р.с. самоіндукції, і тому закон Ома можна записати як:

$$U = iR - E \quad (6.5.5)$$

але оскільки $R=0$, а $E = -L \frac{di}{dt}$, то отримаємо $U = L \frac{di}{dt}$.

Якщо сила струму в колі змінюється за законом $i = i_0 \sin \omega t$, то:

$$U = i_0 \omega L \cos \omega t = i_0 \omega L \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (6.5.6)$$

де $U_0 = i_0 \omega L$, а індуктивний опір $X_L = \omega L$.

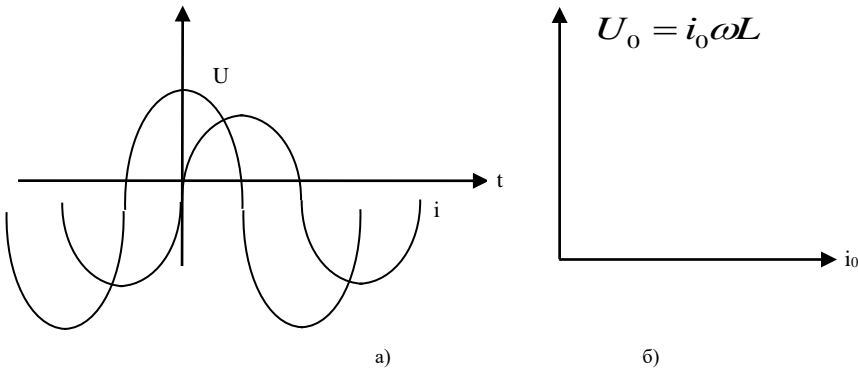


Рис. 6.5.4.

Аналіз виразу (6.5.6) показує, що коливання напруги на індуктивності випереджають у фазі коливання сили струму на $\frac{\pi}{2}$. Графічно це можна представити (рис.6.5.4.а) і показати за допомогою векторної діаграми (рис.6.5.4.б).

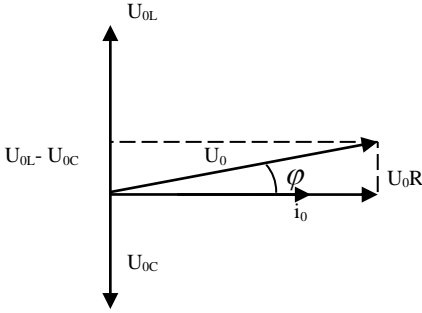


Рис. 6.5.5.

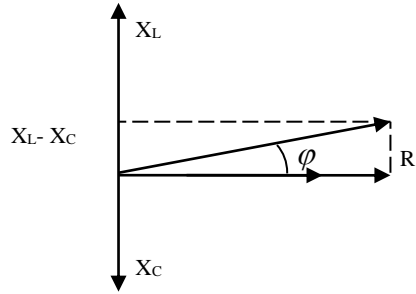


Рис. 6.5.6.

Якщо в колі змінного струму ввімкнути одночасно активний опір R , конденсатор ємністю C , котушки індуктивності L , то для обчислення загального опору кола використаємо закон Ома $Z = \frac{U_0}{i_0}$, для знаходження напруги на ділянці кола (рис.6.5.1 г) використаємо векторну діаграму напруг (рис.6.5.5).

З цієї діаграми $U_0 = \sqrt{U_{0R}^2 + (U_{0L} - U_{0C})^2}$. Тоді:

$$Z = \frac{\sqrt{U_{0R}^2 + (U_{0L} - U_{0C})^2}}{i_0} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (6.5.7)$$

Зсув фаз між напругою і силою струму в такому колі можна знайти, виходячи з векторної діаграми напруг:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{(U_{0L} - U_{0C})}{U_{0R}}. \quad (6.5.8)$$

Для знаходження $\operatorname{tg} \varphi$ часто користуються векторною діаграмою опорів (рис. 6.5.6.).

$$\text{Тоді} \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (6.5.9)$$

Якщо сила струму у цьому випадку змінюється за законом $i = i_0 \sin \omega t$, то напруга буде змінюватися за законом:

$$U = i_0 Z \sin(\omega t + \varphi) = U_0 \sin(\omega t + \varphi). \quad (6.5.10)$$

Опис експериментальної установки

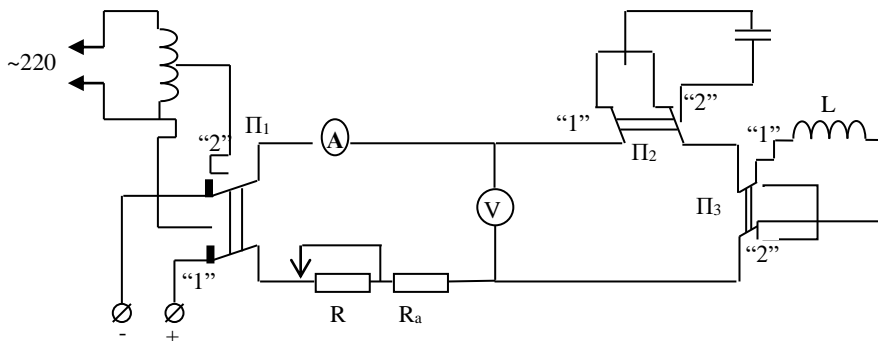


Рис. 6.5.7.

Експериментальну установку показано на рис. 6.5.7. Амперметр служить для фіксації сили струму, вольтметр – напруги (як постійної, так і змінної). Реостат R призначений для зменшення струмів замикання і розмикання, які можуть бути більшими, ніж номінальні значення приладів, увімкнених у коло.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути в коло постійного струму тільки активне навантаження, знайти опір $R = \frac{U}{I}$ і, вибравши певний масштаб, побудувати векторну діаграму для цього випадку.

2. Увімкнути в коло постійного струму котушку індуктивності, зафіксувати покази вольтметра і амперметра і визначити активний опір кола $R = \frac{U}{I}$. Увімкнути коло змінного струму,

виміряти значення I_{ef} і U_{ef} , визначити опір $Z = \frac{U_{ef}}{I_{ef}}$ і знайти

індуктивність котушки $L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega}$. Вимірювання повторити

декілька разів. Побудувати векторні діаграми для цього випадку.

3. Підключивши конденсатор спочатку в коло постійного струму, а потім у коло змінного струму, визначити ємність конденсатора за формулою $C = \frac{1}{\omega(\sqrt{Z^2 - R^2})}$. Дослід повторити декілька разів.

Побудувати векторні діаграми для цього випадку.

4. Знайти загальний опір кола та визначити згідно з формулами (6.5.7) та (6.5.9). Виміряти значення I_{ef} і U_{ef} , розрахувати і порівняти з обчисленням теоретичні значення.

Контрольні питання

1. Встановіть співвідношення між напругою і струмом у колі змінного струму з активним та індуктивним навантаженням.
2. За яким законом буде змінюватися напруга в колі з R , C , якщо сила струму змінюється за законом $i = i_0 \sin \omega t$?
3. Побудуйте векторну діаграму і запишіть закон Ома для кола, що містить L , C .
4. Виведіть закон Ома для кола з R , L , C . Обчисліть $tg\varphi$.
5. Поясніть, як можна знайти активний опір котушки.
6. Чому дорівнює опір конденсатора в колі постійного струму, змінного?

Задачі для самопідготовки

1. Конденсатор ємністю 5 мкф і провідник опором 150 Ом увімкнені послідовно в коло змінного струму з напругою 120 В і частотою 50 Гц. Визначити максимальне і ефективне значення сили струму, зсув фаз між струмом і напругою, а також ефективну потужність.
2. Послідовно з'єднаний реостат і котушка з індуктивністю $L=0,1$ Гц живляться змінним струмом частотою 50 Гц. Між струмом і напругою зсув фаз $\varphi=30^\circ$. Чому дорівнює опір реостата? Ввімкнення якої ємності C послідовно з реостатом могло б усунути зсув фаз?

Методичні поради

Теоретичний матеріал цієї лабораторної роботи може бути використаний на уроці фізики в 11 класі з тем "Змінний струм",

"Діюче значення напруги і сили струму". Векторні діаграми струму, напруги, опорів можна використовувати при розв'язуванні задач на коло змінного струму. Друга частина лабораторної роботи та на визначення індуктивності котушки може бути використане як робота фізичного практикуму в 11 класі з теми "Визначення індуктивності котушки".

6.6. Вимірювання потужності і зсуву фаз за допомогою ватметра

Тема: Вимірювання потужності і зсуву фаз за допомогою ватметра.

Мета: Визначити активну і реактивну потужність у різних колах змінного струму. Дослідити залежність $\cos\varphi$ від виду навантаження.

Обладнання: автотрансформатор, ватметр, амперметр, вольтметр, реостат, набір котушок, батарея конденсаторів.

Теоретичні відомості

Через те що змінний струм є періодичним процесом, то можна обчислити середнє значення потужності за один період. Робота змінного струму за малий проміжок часу dt у випадку активного навантаження дорівнює:

$$Pdt = i_0 U_0 \sin^2 \omega t dt, \quad (6.6.1)$$

а робота за повний період дорівнює:

$$A_T = i_0 U_0 \int_0^T \sin^2 \omega t dt. \quad (6.6.2)$$

Обчислимо:

$$\int_0^T \sin^2 \omega t dt = \frac{1}{2} \int_0^T \left(1 - \cos \frac{4\pi}{T} t \right) dt = \frac{1}{2} T. \quad (6.6.3)$$

Тому
$$A_T = i_0 U_0 \frac{T}{2}. \quad (6.6.4)$$

Звідси для середньої потужності отримаємо:

$$P = \frac{A_T}{T} = \frac{i_0 U_0}{2} \quad (6.6.5)$$

Враховуючи, що $U_o = Ri_o$, можемо записати:

$$P = \frac{Ri_o^2}{2} = \frac{U_o^2}{2R}. \quad (6.6.6)$$

Позначимо через I_{ef} і U_{ef} силу і напругу постійного струму, який виділяє на опорі R ту ж кількість теплоти, що і цей змінний струм. Тоді:

$$P = I_{ef} U_{ef} = RI_{ef}^2 = \frac{U_{ef}^2}{R}. \quad (6.6.7)$$

Порівнюючи (6.6.6) і (6.6.7), отримаємо:

$$I_{ef} = \frac{i_o}{\sqrt{2}}, \quad U_{ef} = \frac{U_o}{\sqrt{2}}. \quad (6.6.8)$$

Сила струму I_{ef} і напруга U_{ef} називаються ефективними значеннями сили струму і напруги. Знаючи ефективні значення, можемо записати, що ефективна потужність:

$$P = I_{ef} \cdot U_{ef}. \quad (6.6.9)$$

Якщо в колі існує, крім активного навантаження, і реактивне (наявна різниця фаз), то:

$$P dt = i U dt. \quad (6.6.10)$$

Напругу можна розкласти на дві складові

$$U_a = U_o \cos \varphi \sin \omega t, \quad U_p = U_o \sin \varphi \sin \left(\omega t \pm \frac{\pi}{2} \right). \quad \text{Повна робота за}$$

період T буде складатися з двох складових: активної і реактивної:

$$A_T = \sqrt{A_a^2 + A_p^2} = \sqrt{\left(i_o U_o \cos \varphi \int_0^T \sin^2 \omega t dt \right)^2 + \left(i_o U_o \sin \varphi \int_0^T \sin \omega t \sin \left(\omega t \pm \frac{\pi}{2} \right) dt \right)^2}. \quad (6.6.11)$$

Оскільки $\int_0^T \sin \omega t \sin \left(\omega t \pm \frac{\pi}{2} \right) dt = 0$, то повна робота за

період визначається тільки активною складовою навантаження:

$$A_T = i_o U_o \cos \varphi \int_0^T \sin^2 \omega t dt = \frac{i_o U_o T}{2} \cos \varphi. \quad (6.6.12)$$

Тому середня потужність дорівнює:

$$P = \frac{A_T}{T} = \frac{i_0 U_0}{2} \cos \varphi = I_{ef} U_{ef} \cos \varphi . \quad (6.6.13)$$

Множник $\cos \varphi$ в електротехніці називається коефіцієнтом потужності. Він показує, що потужність, яка виділяється в колі, залежить не тільки від сили струму, напруг, але і від зсуву фаз між напругою і струмом.

Якщо в колі тільки активне навантаження, то $\varphi = 0$ і $P = P_{\max} = I_{ef} U_{ef}$, а якщо тільки реактивне, то $\varphi = \frac{\pi}{2}$ і $P = P_{\min} = 0$, тобто в цьому випадку енергія, що передається за першу чверть півперіоду від генератора зовнішньому колу, дорівнює енергії, що повертається до генератора за наступну чверть періоду. У випадку електричного резонансу, коли $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, $\varphi = 0$ і $\cos \varphi = 1$, тобто енергія, яка передається в контур від генератора, має найбільше значення.

На практиці завжди намагаються розподілити навантаження таким чином, щоб $\cos \varphi$ був близьким до одиниці.

Опис експериментальної установки

Для визначення потужності, що споживається в електричному колі, використовується установка, схему якої зображено на рис.6.6.1.

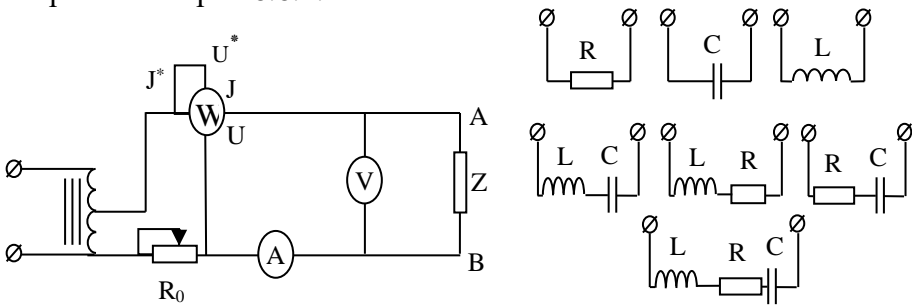


Рис. 6.6.1.

У цю схему на місце Z під'єднуються по черзі комбінації навантажень, які зображені на рис. 6.6.1. За допомогою ватметра визначають активну потужність, що споживається колом, а

амперметром і вольтметром - ефективні значення сили струму I_{ef} і напруги U_{ef} . Маючи ці значення, можемо знайти реактивну складову потужності:

$$P_p = \sqrt{I_{ef}^2 U_{ef}^2 - P_a^2} \quad (6.6.14)$$

та повний реактивний опір:

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = \frac{\sqrt{I_{ef}^2 U_{ef}^2 - P_a^2}}{I_{ef}^2} . \quad (6.6.15)$$

Порядок виконання роботи

1. Скласти коло згідно зі схемою рис. 6.6.1. Вмикаючи на ділянці АВ різноманітні навантаження, знайти покази ватметра, амперметра, вольтметра.
2. Визначити значення $\cos \varphi$ у залежності від виду навантаження і побудувати векторну діаграму.
3. Визначити реактивний опір у кожному із випадків.
4. Дослідити залежність $\cos \varphi$ залежно від величини індуктивного опору ωL . (Для цього потрібно для кожної котушки визначити значення $\cos \varphi$ та індуктивного опору згідно зі співвідношенням

$$\omega L = \frac{\sqrt{I_{ef}^2 U_{ef}^2 - P_a^2}}{I_{ef}^2} .$$

5. Побудувати графік залежності $\cos \varphi$ від ωL .

Контрольні питання

1. Що таке ефективне значення сили струму і напруги? Який зв'язок між ефективним значенням і амплітудним?
2. Виведіть формулу для обчислення потужності в колі змінного струму при наявності тільки активного навантаження.
3. Виведіть формулу для знаходження потужності в колі змінного струму при зсуві фаз між напругою і силою струму.
4. Що таке коефіцієнт потужності? Які його значення у випадку активного і реактивного навантаження і резонансу?
5. Виведіть формулу для обчислення реактивної складової потужності.

6. Як знайти реактивний опір кола, знаючи I_{ef} , U_{ef} , P_a ? Доведіть це.

Задачі для самопідготовки

1. У коло змінного струму з діючою напругою $U=220$ В ($f=50$ Гц) увімкнені послідовно конденсатор ємністю $C=18$ мкФ, активний опір $R=10$ Ом і дросель індуктивністю $L=0,6$ Гн, на якому напруга випереджає силу струму на кут $\alpha=60^\circ$. Визначити потужність, що виділяється на кожному елементі та коефіцієнт потужності всього кола.
2. На ділянку кола, що складається із послідовно з'єднаних активного опору $R_1=15$ Ом, дросель $L=0,1$ Гн і активним опором $R_2=10$ Ом, подається напруга 220 В ($f=50$ Гц). Яка потужність споживається ділянкою кола? Яка потужність буде споживатися, якщо послідовно під'єднати конденсатор, при якому різниця фаз між струмом і напругою дорівнює нулю? Яка ємність цього конденсатора?

Методичні поради

Матеріали цієї лабораторної роботи можуть бути використані при вивченні фізики в 11 класі з тем "Діюче значення сили струму і напруги", "Потужність у колі змінного струму". В класах з поглибленим вивченням фізики або на факультативних заняттях цей матеріал можна також застосовувати при розв'язуванні задач. У 11 класі вчитель фізики може запропонувати роботу фізичного практикуму "Вивчення ватметра і визначення коефіцієнта потужності в колі змінного струму".

6.7. Вивчення резонансу напруг

Тема: Вивчення резонансу напруг.

Мета: Встановити співвідношення між напругами в колі змінного струму. Знайти резонансну частоту та добротність контура.

Обладнання: автотрансформатор, амперметр, три вольтметри, магазин конденсаторів, котушка індуктивності.

Теоретичні відомості

Нехай у колі змінного струму послідовно з'єднаний активний опір R , конденсатор C , індуктивність L (рис.6.7.1).

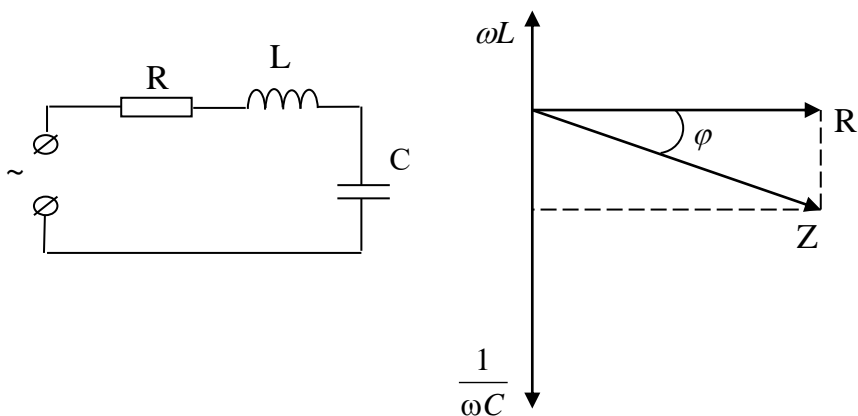


Рис. 6.7.1.

ЕРС змінюється за законом $E = E_0 \sin \omega t$, тоді сила струму в колі буде змінюватися за законом $i = i_0 \sin(\omega t - \varphi)$. Згідно з законом Ома для кола:

$$i_0 = \frac{E_0}{Z} = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} . \quad (6.7.1)$$

Зсув фаз у колі між струмом і напругою можна знайти, виходячи з векторної діаграми опорів (рис. 6.7.1):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} . \quad (6.7.2)$$

Зміна частоти в колі змінного струму приводить до зміни сили струму і зміни зсуву фаз. Проаналізуємо залежність i_0 від ω . Якщо $\omega=0$ (струм постійний), то $\frac{1}{\omega C} \rightarrow \infty$ і сила струму дорівнює нулю (конденсатор постійний струм не пропускає). Збільшення ω може привести до того, що при деякому значенні $\omega=\omega_0$ будемо мати $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$, тобто $Z=R$ і сила струму i_0 буде максимальною.

При $\omega > \omega_0$ квадрат реактивного опору $\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2$ знову не буде дорівнювати нулю і збільшується із збільшенням ω . Відповідно зростає і Z , а амплітуда струму i_0 зменшується, асимптотно наближається до нуля при збільшенні ω (рис. 6.7.2).

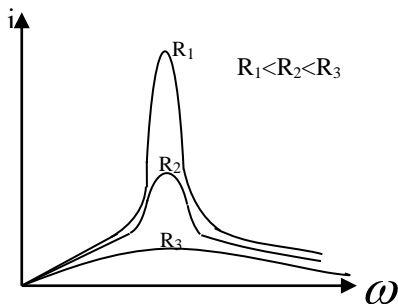


Рис. 6.7.2.

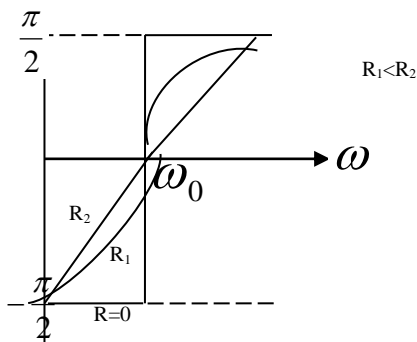


Рис. 6.7.3.

Розглянемо, як змінюється зсув фаз між силою струму і результуючою напругою. При дуже малих значеннях ω , $\operatorname{tg} \varphi \rightarrow \infty$, а $\varphi \rightarrow -\frac{\pi}{2}$. При частоті $\omega = \omega_0$, $\operatorname{tg} \varphi \rightarrow 0$, $\varphi \rightarrow 0$. При зростанні ω реактивний опір стає додатнім і збільшується зі зростанням ω . Зростання $\omega \rightarrow \infty$ приводить до того, що $\operatorname{tg} \varphi \rightarrow \infty$, а $\varphi \rightarrow \frac{\pi}{2}$. Залежність зсуву фаз частоти коливань показано на рис. 6.7.3.

Особливий інтерес викликає випадок $\omega = \omega_0$, коли сила струму досягає максимального значення, а зсув фаз між струмом і напругою дорівнює нулю. Цей випадок називається резонансом напруг.

Резонансна частота $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ не дорівнює частоті власних коливань $\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$, де α - коефіцієнт згасання. Однак практично $\alpha^2 \ll \omega_0^2$, і тому можна вважати, що ці частоти співпадають.

Визначимо значення амплітуди напруг U_{0L} і U_{0C} при резонансі. Напряга на котушці індуктивності:

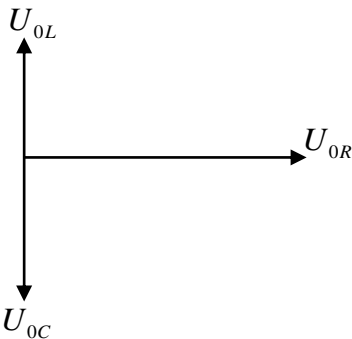
$$U_{0L} = i_0 x_L = \frac{U_0}{R} \omega_0 L = \frac{U_0}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (6.7.3)$$

де величина $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ - добротність контура.

$$\text{Напряга на конденсаторі: } U_{0C} = i_0 x_C = \frac{U_0}{R} \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{U_0}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Як показують розрахунки, при резонансі напруг $U_{0C} = U_{0L} = U_0 Q$.

Графічно це можна зобразити за допомогою векторної діаграми (рис.6.7.4):



З цієї діаграми видно, що при резонансі напруг

$$U_0 = \sqrt{U_{0R}^2 + (U_{0L} - U_{0C})^2} = U_{0R},$$

тобто загальна напруга дорівнює напрузі на активному опорі.

Рис. 6.7.4.

Опис експериментальної установки

Експериментальну установку показано на рис. 6.7.3. Амперметр служить для вимірювань сили струму в колі, вольтметр V – для вимірювань загальної напруги в колі, V_1 – напруги U_C , а V_2 – напруги U_L .

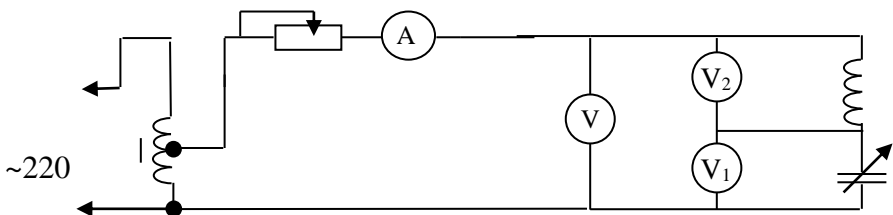


Рис. 6.7.5.

Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло за схемою (рис. 6.7.5), встановити робочу напругу порядку 40-60 В.
2. Змінюючи ємність через 2 мкФ , записати покази амперметра, вольтметрів і побудувати графіки залежності $I = f(C); U = f_1(C); U_L = f_2(C); U_C = f_3(C)$.
3. Знаючи індуктивність котушки і знайшовши значення C при якому $i = i_{\text{max}}$, знайти резонансну частоту ω_0 .

4. Обчислити добротність контура Q , логарифмічний декремент

$$\text{згасання, } \sigma = \frac{R}{2L} \cdot \sqrt{\frac{1}{LC}} \text{ коефіцієнт згасання } \alpha = \frac{R}{2L}.$$

Контрольні питання

1. Запишіть закон Ома для змінного струму і поясніть, як величина сили струму залежить від частоти.
2. Яка умова необхідна, щоб у коливальному контурі настав резонанс напруг? Запишіть формулу для обчислення резонансної частоти.
3. Зобразіть графік залежності сили струму від частоти. Поясніть, як активний опір впливає на вид резонансної кривої.
4. Що таке добротність, логарифмічний декремент згасання, коефіцієнт затухання? Як вони обчислюються?
5. Чи можуть при резонансі значення напруги U_L, U_C бути більші за U ? Чому?
6. Зобразіть векторну діаграму опорів і напруги при послідовному з'єднанні R, L, C .

Задачі для самопідготовки

1. Резонансна частота коливального контура, що складається із послідовно з'єднаних конденсатора і котушки індуктивності,

$\nu_0=4$ кГц. Визначити індуктивність котушки, якщо повний опір при частоті $\nu=1$ кГц становить $Z=1$ кОм, а активний опір котушки $R=10$ Ом.

2. Контур складається із котушки з індуктивністю $L=10^{-5}$ Г, опору $R=14$ Ом і конденсатора ємністю $C=0,002$ мкФ. Знайти : а) логарифмічний декремент затухання коливань в контурі; б) відношення енергії магнітного поля в котушці до енергії електричного поля в конденсаторі.

Методичні поради

Теоретичний матеріал цієї лабораторної роботи може бути використаний при вивченні теми "Електричний резонанс" в 11 класі. Якщо в експериментальній установці використати демонстраційний амперметр і демонстраційний вольтметр, то можна провести на уроці фізики експеримент. Векторні діаграми опорів, напруг можуть успішно використовуватися при розв'язуванні задач із теми "Змінний струм" в 11 класі. Установка може бути використана для проведення роботи фізичного практикуму з теми "Вивчення резонансу в коливальному контурі" в 11 класі.

6.8. Вивчення резонансу струмів

Тема: Вивчення резонансу струмів.

Мета: Дослідити залежність сили струму I , I_C , I_L від ємності конденсатора. Визначити хвильовий опір та добротність контура.

Обладнання: Автотрансформатор, три амперметри, реостат, магазин конденсаторів, катушка індуктивності.

Теоретичні відомості

Нехай коло складається з двох гілок (рис. 6.8.1), одна із яких містить конденсатор ємністю C , а інша –катушку індуктивності L . Через те що дротяні катушки завжди мають деякий активний опір, то в цій гілці потрібно його врахувати.

У цьому випадку спільною для двох гілок є напруга між точками A і B , а сили струмів у гілках I_C , і I_L різні. Повна сила струму дорівнює: $I = I_C + I_L$.

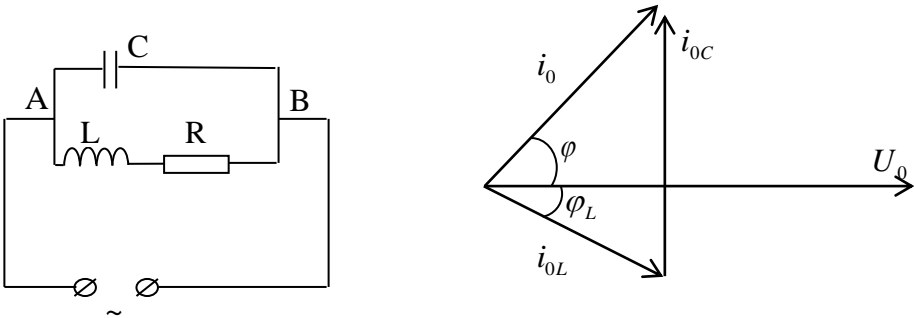


Рис. 6.8.1.

Нехай коливання напруги між точками A і B зображаються вектором U (рис. 6.8.1.) – вісь напруги. Тоді коливання струму в катушці індуктивності зобразяться вектором I_{0L} , довжина якого дорівнює:

$$i_{0L} = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} . \quad (6.8.1)$$

Цей вектор повернутий відносно осі напруги на кут φ_L у від'ємному напрямі (через те що струм у катушці відстає у фазі від напруги), при чому

$$\operatorname{tg} \varphi_L = \frac{L\omega}{R} . \quad (6.8.2)$$

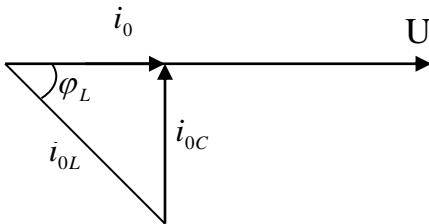
Коливання струму в конденсаторі зображається вектором, повернутим відносно осі напруг на кут $\frac{\pi}{2}$. Його довжина дорівнює:

$$i_{0C} = U_0 C \omega . \quad (6.8.3)$$

Із векторної діаграми можна знайти значення амплітуди i_0 повного струму і φ - кут, на який коливання струму випереджують коливання напруги. Тоді коливання повного струму виражаються формулою:

$$i = i_0 \sin(\omega t + \varphi) . \quad (6.8.4)$$

Якщо змінювати L і C або частоту ω , то можна досягти значення зсуву фаз φ , що дорівнює нулю. У цьому випадку контур веде себе як чисто активний опір. Векторна діаграма струмів у цьому випадку буде мати вигляд (рис. 6.8.2.). Цей випадок вимушених коливань у розгалуженому колі називається резонансом струмів.



Знайдемо умову, при якій настає резонанс струмів. З векторної діаграми (рис. 6.8.2) видно, що при резонансі

$$i_{0C} = i_{0L} \sin \varphi_L . \quad (6.8.5)$$

Рис. 6.8.2

Але

$$\sin \varphi_L = \frac{L\omega}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} , \quad \cos \varphi_L = \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} . \quad (6.8.6)$$

Амплітуди струмів мають значення

$$i_{0L} = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} ; \quad i_{0C} = U_0 C \omega . \quad (6.8.7)$$

Підставимо ці значення в (6.8.4), отримаємо:

$$U_0 C \omega = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \cdot \frac{L \omega}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} . \quad (6.8.8)$$

Врахувавши, що для котушки індуктивності величина $\omega^2 L^2 \gg R^2$, остаточно отримаємо:

$$U_0 C \omega = \frac{U_0}{L \omega} . \quad (6.8.9)$$

Звідси

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0 . \quad (6.8.10)$$

Таким чином, для резонансу струмів, так, як і для резонансу напруг, необхідно, щоб частота коливань ω зовнішньої напруги співпадала з частотою ω_0 власних коливань контура при відсутності затухань.

Обчислимо амплітуду i_0 повного струму при резонансі. З тієї ж векторної діаграми (рис. 6.8.2.) отримаємо:

$$i_0 = i_{0L} \cos \varphi_L . \quad (6.8.11)$$

Або

$$i_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega_0^2}} \cdot \frac{R}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega_0^2}} . \quad (6.8.12)$$

При $\omega^2 L^2 \gg R^2$ амплітуда сили струму дорівнює:

$$i_0 = U_0 \frac{R}{L^2 \omega_0^2} = U_0 \frac{RC}{L} . \quad (6.8.13)$$

Тому при резонансі повний опір дорівнює:

$$Z = \frac{L}{RC} . \quad (6.8.14)$$

Якщо $R \rightarrow 0$, то $Z \rightarrow \infty$. Добротність контура в цьому випадку складає:

$$Q = \sqrt{\frac{Z}{R}} = \frac{\sqrt{L}}{R\sqrt{C}} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} . \quad (6.8.15)$$

Опис експериментальної установки

Схему експериментальної установки показано на рис. 6.8.3

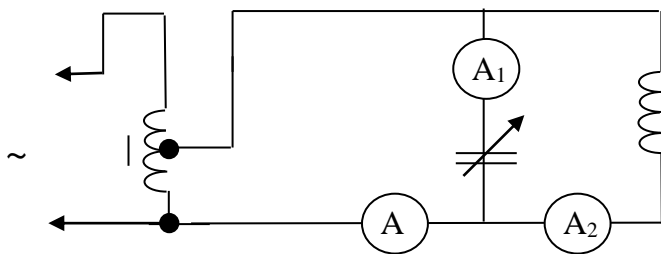


Рис. 6.8.3.

Амперметр А служить для вимірювання загального струму в колі; A_1 – для вимірювання сили струму, що проходить через конденсатор, а A_2 – для вимірювання сили струму, що проходить через котушку індуктивності. Ємність конденсатора можна змінювати.

Порядок виконання роботи

1. Скласти коло за схемою (рис. 6.8.3.), встановити напругу 50-60 В.
2. Змінюючи ємність батареї через 3-5 мкФ, записати покази амперметрів, побудувати графік залежностей $I = f(C); i_L = f(C); i_C = f(C)$.
3. Визначити резонансну ємність із графіків (їй відповідає мінімум сили струму) і обчислити повний опір при резонансі згідно з формулою (6.8.14).
4. Визначити добротність контура за формулою (6.8.15) і побудувати графік залежності Q від C для такого контура.

Контрольні питання

1. Побудуйте векторну діаграму струмів і напруг при паралельному з'єднанні L і C. Покажіть, як визначити i_{0C} і i_{0L} в цьому випадку.
2. Що таке резонанс струмів? Зобразіть векторну діаграму для цього випадку.
3. Чому дорівнює зсув фаз між загальним струмом і напругою при резонансі струмів?
4. Покажіть, яка умова необхідна для того, щоб спостерігати резонанс струмів.
5. Визначіть повний опір контура при резонансі струмів.
6. Для яких практичних цілей використовується резонанс струмів?

Задачі для самопідготовки

1. Коливальний контур складається з котушки індуктивності $L=10^{-4} \text{ Гн}$ (активний опір $R=0,5 \text{ Ом}$) і паралельно приєднаного конденсатора $C=4 \text{ мкФ}$. Напруга $U_0=10 \text{ В}$. Визначте резонансну частоту, струм I_{0C} , I_{0L} при резонансі, повний струм i_0 і загальний опір.
2. Добротність коливального контура $Q=10$. Визначити, на скільки відсотків відрізняється частота згасаючих коливань контура ω від частоти власних коливань ω_0 .

Методичні поради

Теоретичний матеріал цієї лабораторної роботи може бути використаний при вивченні фізики на факультетних заняттях і частково на уроці фізики в 11 класі з теми "Електричний резонанс".

6.9. Вивчення загасаючих електромагнітних коливань

Тема: Вивчення загасаючих електромагнітних коливань.

Мета: Ознайомитись з роботою коливального контуру і дослідити характеристики загасаючих коливань у коливальному контурі.

Обладнання : Касети ФПЕ-10/11 і ФПЕ-ПІІ/09, осцилограф, генератор сигналів, підсилювач, магазин опорів, джерело живлення.

Теоретичні відомості

Систему, що складається з послідовно з'єднаних конденсатора ємністю C , котушки індуктивністю L і провідника з омичним опором R , в якій можуть збуджуватись електромагнітні коливання, називають коливальним контуром (рис. 6.9.1).

Якщо зарядити конденсатор такого контуру, то при відсутності зовнішніх ЕРС конденсатор почне розряджатися і у контурі буде протікати струм. Коли заряд

змінний в часі струм. Коли заряд конденсатора дорівнюватиме нулю, струм у контурі досягне максимуму. Потім струм почне зменшуватися, не змінюючи свого

напрямку, що приведе до перезарядки конденсатора. Причиною плавного, а не стрибкоподібного збільшення і зменшення струму в контурі є ЕРС самоіндукції, яка виникає в контурі при зміні струму. Ця ж ЕРС є причиною перезарядки конденсатора і відповідно причиною виникнення коливань у контурі.

Якщо активний опір контура дорівнює нулю, то коливання в контурі будуть незагасаючими, тобто зможуть продовжуватися нескінченно довго (рис. 6.9.2, а). У реальному контурі активний опір не дорівнює нулю, тому завжди є втрати електричної енергії, пов'язанні з нагріванням провідників. У результаті у такому контурі амплітуда коливань буде постійно зменшуватися і в кінці кінців коливання закінчатся. Такі коливання називають загасаючими (рис. 6.9.2, б). Чим більший активний опір контура, тим сильніше загасання. Якщо величина активного опору перевищує деяке значення, яке називається критичним опором R_k , то коливання в контурі збуджуватися не будуть. Заряд конденсатора при цьому буде монотонно зменшуватися і асимптотично прямувати до нуля при $t \rightarrow \infty$.

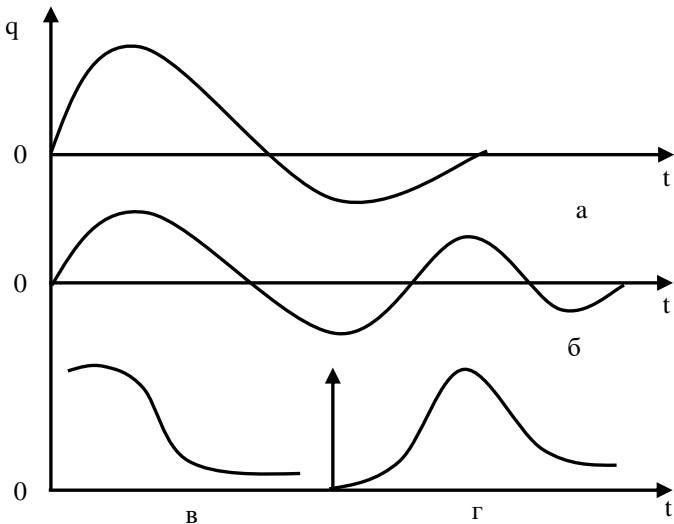


Рис.6.9.2.

Залежно від початкових умов процес розрядки конденсатора при $R > R_k$ буде відбуватися по кривій рис. 6.9.2, в або по кривій рис. 6.9.2, г. Такий процес називається аперіодичним.

Заряд конденсатора і струм у котушці коливального контуру постійно змінюється за величиною і напрямком. Припустимо, що у момент часу t заряд на обкладках конденсатора q , напруга U , а струм у колі змінюється зі швидкістю $\frac{dI}{dt}$. У котушці L виникає

ЕРС самоіндукції:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (6.9.1)$$

За законом Ома миттєве значення сили струму в колі:

$$I = \frac{U + \varepsilon}{R} = \frac{U - L \frac{dI}{dt}}{R}. \quad (6.9.2)$$

Оскільки $U = \frac{q}{C}$; $I = -\frac{dq}{dt}$; $\frac{dI}{dt} = -\frac{d^2q}{dt^2}$, тоді (6.9.2)

перепишемо у вигляді:

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0. \quad (6.9.3)$$

Рівняння (6.9.3) є диференціальним рівнянням загасаючих коливань у коливальному контурі. Поділимо це рівняння на L і введемо позначення :

$$\beta = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}. \quad (6.9.4)$$

З урахуванням (6.9.4) рівняння (6.9.3) переписується так :

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0, \quad (6.9.5)$$

де β - коефіцієнт загасання, ω_0 - власна частота коливань контуру.

Розв'язок рівняння (6.9.5) буде залежати від співвідношення між β і ω_0 .

I. $\beta^2 < \omega_0^2$, тобто $\frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{LC}$, що відповідає слабкому загасанню. Розв'язок рівняння (6.9.5) при такій умові буде:

$$q = q_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi), \quad (6.9.6)$$

де q_0 - максимальний заряд конденсатора, φ - початкова фаза коливання,

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (6.9.7)$$

Графік функції q подано на рис. 6.9.3. Загасаючі коливання не є періодичними, але при загасаючих коливаннях величина q перетворюється в нуль, а також досягає максимальних і мінімальних значень через рівні проміжки часу :

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \quad (6.9.8)$$

Величини T і ω умовно називають періодом (умовними періодами) і циклічною частотою (умовною циклічною частотою) загасаючих коливань.

$$\text{Величина} \quad \Delta q_a = q_0 e^{-\beta t} \quad (6.9.9)$$

називається амплітудою загасаючих коливань. Амплітуда загасаючих коливань зменшується з часом за експоненціальним законом і тим швидше, чим більший коефіцієнт загасання β .

Час τ , протягом якого амплітуда коливань зменшується в e разів, називають часом загасання :

$$\tau = \frac{1}{\beta}. \quad (6.9.10)$$

Загасаючі коливання характеризують логарифмічним декрементом загасання, який визначається як логарифм відношення двох послідовних максимальних значень амплітуди загасаючих коливань :

$$\delta = \ell n \frac{A_n}{A_{n+1}} = \ell n \frac{q_o \ell^{-\beta t}}{q_o \ell^{-\beta(t+T)}} = \beta T . \quad (6.9.11)$$

У радіотехніці замість логарифмічного декременту загасаючий коливальний контур характеризується добротністю. Добротність контуру Q показує, у скільки разів запас коливальної енергії у контурі більший за середню втрату енергії за час, протягом якого фаза коливань змінилася на 1 радіан.

$$Q = \frac{\pi}{\delta} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} . \quad (6.9.12)$$

II. $\beta^2 = \omega_0^2$. При цій умові циклічна частота загасаючих коливань ω згідно з (6.9.7) дорівнює нулю, а період T прямує до нескінченності, тобто коливання відбуватися не будуть, і настає аперіодичний розряд. Виконання умови $\beta^2 = \omega_0^2$ згідно з (6.9.4)

можливе, коли : $\frac{R^2}{4L^2} = \frac{1}{LC}$.

З цієї умови визначимо опір R :

$$R = 2\sqrt{\frac{L}{C}} , \quad (6.9.13)$$

який буде критичним опором коливального контуру.

III. $\beta^2 > \omega_0^2$. У цьому випадку частота загасаючих коливань буде уявною, коливання в контурі відбуватися не будуть, і процес буде носити аперіодичний характер.

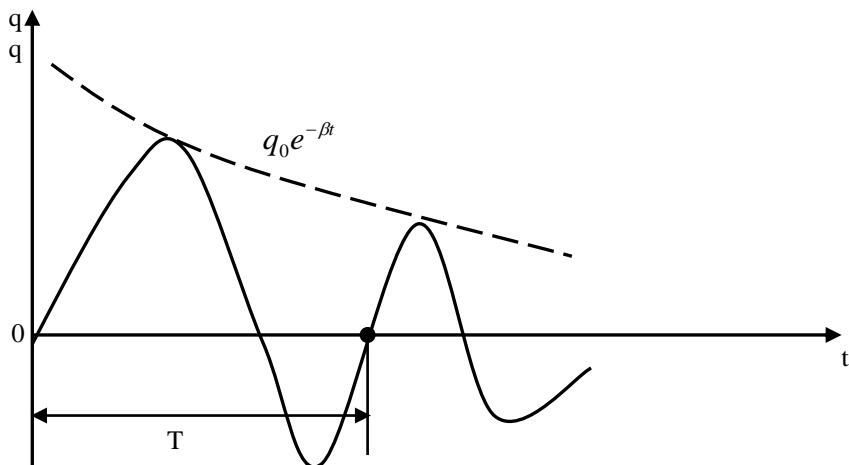


Рис. 6.9.3.

Опис експериментальної установки

Блок - схему експериментальної установки подано на рис. 6.9.4.

Конденсатор C і котушка індуктивності L , касети ФПЕ-10 і магазин опорів утворюють досліджуваний коливний контур. Для періодичного збудження коливань використовують генератор сигналів і перетворювач імпульсів - касета ФПЕ-Пі/09. Коливання в контурі відбуваються під час паузи прямокутних імпульсів, що подаються з касети ФПЕ-Пі/09 для зарядки конденсатора і спостерігаються на екрані осцилографа. Картина коливань особливо чітка, якщо коливання, викликані попереднім імпульсом встигають згаснути до моменту приходу наступного. Глибину прямокутних імпульсів можна регулювати за допомогою перемикача і потенціометра на касеті ФПЕ-Пі/09.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему, подану на рис. 6.9.4.
2. Увімкнути осцилограф і вивести електронний промінь у центр координатної сітки.

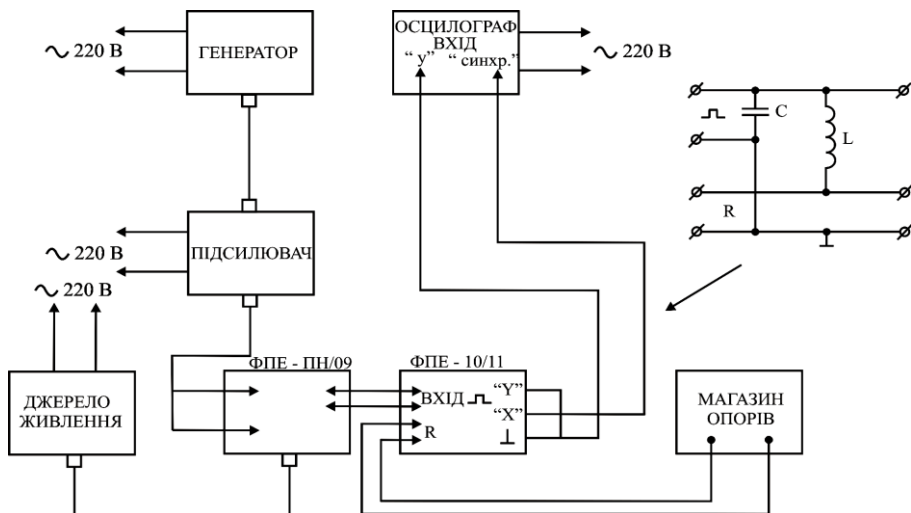


Рис. 6.9.4.

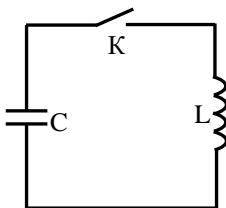
3. Увімкнути генератор сигналів, підсилювач і джерело живлення в мережу і подати на вхід касети ФПЕ-Пі/09 сигнал із генератора частотою 250 Гц.
4. Змінюючи глибину імпульсів, досягти стійкої картини загасаючих електромагнітних коливань на екрані осцилографа.
5. Визначити логарифмічний декремент загасання за співвідношенням: $\delta = \frac{1}{z-1} \ln \frac{A_1}{A_z}$, де A_1 - амплітуда першого максимуму; A_z - амплітуда максимуму з порядковим номером Z . Амплітуди максимумів визначають за масштабною сіткою на екрані осцилографа.
6. За мітками часу на екрані осцилографа визначити період коливань T і обчислити опір втрат за формулою: $R = \frac{2L\delta}{T}$.
7. Обчислити період коливань за формулою (6.9.8) і порівняти із визначеним експериментально у пункті 6.
8. Визначити добротність коливального контуру за формулою (6.9.12).
9. Використовуючи магазин опорів, знайти критичний опір, при якому настає аперіодичний розряд.

- Обчислити критичний опір контуру за формулою (6.9.13) і порівняти з експериментальним значенням.
- Обчислити похибки і зробити відповідні висновки.

Контрольні питання

- Що таке коливальний контур? Як виникають коливання в коливальному контурі? Що таке загасаючі електромагнітні коливання?
- Виведіть диференціальне рівняння загасаючих коливань.
- Який вигляд має розв'язок рівняння загасаючих коливань? За яким законом відбувається зміна заряду конденсатора, напруги на конденсаторі, а також струму в коливальному контурі?
- Що таке час загасання і логарифмічний декремент загасання?
- Що таке добротність коливального контуру і який її фізичний зміст?
- Що таке аперіодичний розряд і при яких умовах він відбувається?

Задачі для самопідготовки



- У колі, що складається із зарядженого конденсатора ємністю C і котушки індуктивністю L , замикають ключ K (рис. 6.9.5). За яким законом повинна змінюватися в часі ємність конденсатора, щоб струм у колі збільшувався прямопропорційно?

- Рис. 6.9.5.
- У коливальному контурі, який складається з послідовно з'єднаних опору R , катушки індуктивності L і конденсатора C , проходять загасаючі коливання. За деякий час амплітуда струму в контурі зменшилася від значення I_1 до значення I_2 . Яка кількість теплоти виділилася за цей час на опорі?

Методичні поради

Матеріал цієї роботи можна використати при проведенні уроку фізики в 11 класі з теми "Загасаючі електромагнітні коливання" у класах із поглибленим вивченням фізики.

6.10. Вивчення вимушених коливань

Тема: Вивчення вимушених коливань.

Мета: Визначити залежності амплітуди коливань від частоти, добротність та смугу пропускання, побудувати фазо-частотну характеристику.

Прилади і матеріали: Касета ФПЕ-11/10, генератор низької частоти, підсилювач, осцилограф, магазин опорів, магазин ємностей, джерело живлення.

Теоретичні відомості

Електричний опір реального коливального контуру не дорівнює нулеві, тому вільні електричні коливання у контурі поступово загасають. Щоб дістати незагасаючі коливання, треба зовні підводити в коливальний контур енергію, яка компенсує втрати на теплоту та на випромінювання електромагнітних хвиль. При цьому виникають *вимушені електромагнітні коливання*. Для їх реалізації необхідна періодична дія на коливальний контур. Це можна здійснити, якщо увімкнути послідовно з елементами контуру змінну ЕРС.

Розглянемо вимушені коливання у контурі під дією ЕРС, яка змінюється за законом

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cos \omega t.$$

На основі другого правила Кірхгофа можна записати

$$U_c + IR = \varepsilon + \varepsilon_{ci}, \quad (6.10.1)$$

де $U_c = \frac{q}{C}$ - напруга на обкладках конденсатора, IR - спад напруги

на активному опорі, $\varepsilon_{ci} = -L \frac{dI}{dt} \varepsilon$ - ЕРС самоіндукції. Враховуючи,

що $I = \frac{dq}{dt}$, а $\frac{dI}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2}$, рівняння (6.10.1) можна переписати так:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \frac{\varepsilon_0}{L} \cos \omega t. \quad (6.10.2)$$

Рівняння (6.10.2) є диференціальним рівнянням вимушених коливань. Загальний розв'язок такого рівняння складається із суми розв'язків відповідного однорідного рівняння і часткового

розв'язку неоднорідного рівняння (6.10.2). Розв'язком відповідного однорідного диференціального рівняння є загасаючі коливання, тому через порівняно короткий час після початку коливань впливом цього доданка на загальний розв'язок рівняння (6.10.2) можна нехтувати. Частковий розв'язок рівняння (6.10.2) шукатимемо у вигляді

$$q = q_m \cos(\omega t + \varphi), \quad (6.10.3)$$

де q_m - амплітуда усталених коливань, φ - зсув фаз між змінами заряду і зовнішньої ЕРС.

Величини q_m і φ потрібно визначити. Для цього з (6.10.3) знайдемо:

$$\frac{dq}{dt} = -q_m \omega \sin(\omega t + \varphi); \quad \frac{d^2q}{dt^2} = -q_m \omega^2 \cos(\omega t + \varphi).$$

Підставивши q , $\frac{dq}{dt}$, $\frac{d^2q}{dt^2}$ у рівняння (6.10.2), дістанемо

$$\begin{aligned} & -q_m \omega^2 \cos(\omega t + \varphi) - 2\beta q_m \omega \sin(\omega t + \varphi) + \\ & + q_m \omega_0^2 \cos(\omega t + \varphi) = \frac{\varepsilon_0}{L} \cos \omega t \quad . \end{aligned} \quad (6.10.4)$$

Розкладемо синус і косинус суми за відомими тригонометричними формулами і запишемо рівняння (6.10.4) так:

$$\begin{aligned} & q_m [(\omega_0^2 - \omega^2) \cos \varphi - 2\beta \omega \sin \varphi] \cos \omega t - \\ & - q_m [(\omega_0^2 - \omega^2) \sin \varphi + 2\beta \omega \cos \varphi] \sin \omega t = \frac{\varepsilon_0}{L} \cos \omega t \quad . \end{aligned} \quad (6.10.5)$$

Рівняння (6.10.5) задовольнятимуть усі значення t за умови, що коефіцієнти біля виразів $\cos \omega t$ і $\sin \omega t$ у лівій і правій частинах рівняння (6.10.5) однакові. Звідси маємо:

$$\begin{cases} q_m (\omega_0^2 - \omega^2) \cos \varphi - 2\beta \omega q_m \sin \varphi = \frac{\varepsilon_0}{L}, \\ q_m (\omega_0^2 - \omega^2) \sin \varphi + 2\beta \omega q_m \cos \varphi = 0. \end{cases} \quad (6.10.6)$$

Піднесемо до квадрата рівняння (6.10.6) і додамо їх. Тоді отримаємо:

$$q_m^2 [(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2] = \frac{\varepsilon_0^2}{L^2},$$

звідки

$$q_m = \frac{\frac{\varepsilon_0}{L}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}. \quad (6.10.7)$$

Із другого рівняння системи (6.10.6) знайдемо:

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (6.10.8)$$

Підставивши у формули (6.10.7) і (6.10.8) $\beta = \frac{R}{2L}$, $\omega_0^2 = \frac{1}{CL}$,

дістанемо:

$$q_m = \frac{\varepsilon_0}{\omega \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - L\omega\right)^2}}, \quad (6.10.9)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{R}{\frac{1}{\omega C} - L\omega}. \quad (6.10.10)$$

Отже, частковий розв'язок диференціального рівняння (6.10.2) має вигляд:

$$q = \frac{\varepsilon_0}{L\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}} \cos\left(\omega t + \operatorname{arctg}\left(-\frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right)\right). \quad (6.10.11)$$

Таким чином, вимушене коливання є гармонічним, амплітуда і фаза якого визначаються формулами (6.10.7) і (6.10.8). Характерною особливістю розв'язку (6.10.11) є те, що він не залежить від початкових умов. Із (6.10.7) і (6.10.8) видно, що амплітуда вимушених коливань, які встановилися, та зсув фаз між зміщеннями і зміною зовнішнього ЕРС залежить від різниці квадратів частот, а також від коефіцієнта загасання β коливального контуру. Амплітуда зміни заряду вимушених коливань залежать також від амплітуди змінної ЕРС ε_0 .

Якщо поділити заряд q на ємність конденсатора, то дістанемо закон зміни (коливань) напруги на конденсаторі:

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{q_m}{C} \cos(\omega t + \varphi) = U_{mC} \cos(\omega t + \varphi), \quad (6.10.12)$$

де $U_{me} = \frac{q_m}{C} = \frac{\varepsilon_0}{\omega C \sqrt{R^2 + (1/\omega C - L\omega)^2}}$.

Диференціюючи за часом рівність (6.10.3), дістанемо закон зміни струму в коливальному контурі

$$I = \frac{dq}{dt} = -\omega q_m \sin(\omega t + \varphi) = I_m \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right). \quad (6.10.13)$$

Амплітуда струму виражається формулою:

$$I_m = \omega q_m = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + (L\omega - 1/C\omega)^2}} \quad (6.10.14)$$

Формула (6.10.13) збігається з $I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}$.

Резонансна частота для заряду q і напруги на конденсаторі U_C визначається так:

$$\omega_q = \omega_U = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}}.$$

Амплітуда сили струму матиме максимальне значення за умови $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$, тобто під час резонансу.

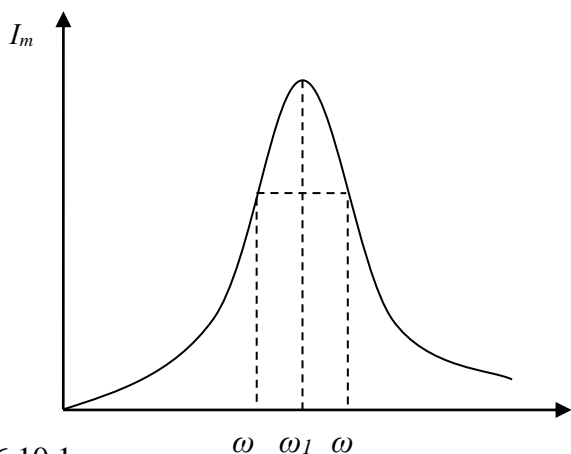


Рис.6.10.1

На рис.6.10.1 показано залежність амплітуди вимушених коливань сили струму I_m від циклічної частоти зміни зовнішньої ЕРС. Ці криві називають резонансними. Однією із характеристик резонансної кривої є значення амплітуди у максимумі. Іншою важливою характеристикою є ширина резонансної кривої, під якою розуміють різницю циклічних частот $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$, для яких енергія коливань у два рази менша від енергії для частоти, при якій амплітуда змінної величини досягає максимуму. Ширина резонансної кривої зв'язана з добротністю коливального контуру Q співвідношенням

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \frac{\omega_0}{Q}. \quad (6.10.15)$$

Коливання будуть найбільш інтенсивними при частоті $\omega = \omega_0$. Явище збудження інтенсивних електричних коливань при дії зовнішньої зміни ЕРС з частотою, яка дорівнює власній частоті контуру або близька до неї, називають резонансом. Уся радіотехніка приймання ґрунтується на явищі резонансу. Щоб радіоприймач селективно (вибірково) реагував на електромагнітні хвилі, які випромінюють радіостанції, треба досягти збігання частоти власних коливань коливального контура радіоприймача з частотою електромагнітних хвиль, які випромінює певна

радіостанція. Чутливість радіоприймача пов'язана з добротністю його коливального контура. Чим більша добротність контура, тим вища чутливість приймача. Оскільки добротність коливального контура зв'язана із шириною резонансної кривої, то на основі (6.10.15) можна зробити висновок, що чутливість радіоприймача і ширина резонансної кривої обернено пропорційна. Під шириною резонансної кривої $\Delta\omega$ треба розуміти смугу частот, які здатний сприймати радіоприймач. Із метою уникнення частотних спотворень $\Delta\omega$ не може бути меншим за 9 кГц. Це означає, що при великій чутливості радіоприймач приймає тільки досить вузьку смугу частот. Чим вища чутливість радіоприймача, тим менше перешкоджають прийманню інші радіостанції, які працюють на близьких частотах.

Опис експериментальної установки

Касета ФПЕ-11/10 є конструкційна самостійна одиниця коробчастої форми. Принципову електричну схему касети подано на рис. 6.10.1.

Принцип роботи функціональної групи ФПЕ-11 побудовано на одержанні вимушених коливань у коливальному контурі, що складається з індуктивності L_1 , пов'язаної з магазином опорів і магазином ємностей при зовнішньому збудженні коливань з частотами близькими до резонансної. Зовнішнє збудження подається від звукового генератора через гнізда X_1 та X_2 . Резистор R_1 під'єднаний послідовно з елементами контуру, напруга якого подається через гнізда X_3 і X_4 на вхід Y осцилографа, а на вхід X осцилографа через гнізда X_5 і X_4 подається вхідна напруга для дослідження залежності амплітуди і фази вимушених коливань від частоти примусової дії.

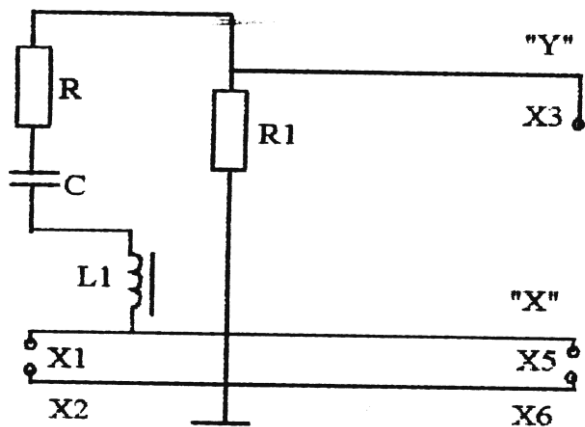


Рис.6.10.1.

Порядок виконання роботи

I. Вивчення залежності амплітуди коливань від частоти і визначення добротності та смуги пропускання контура.

1. Зібрати схему вимірної установки, як показано на рис. 6.10.2.

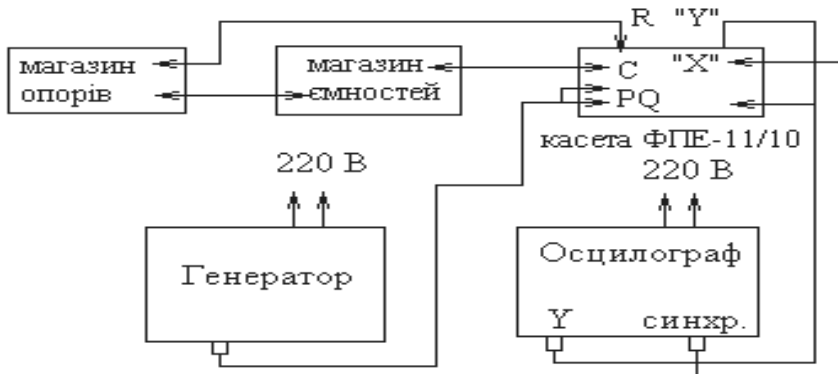


Рис. 6.10.2.

2. Встановити значення ємності на магазині ємностей $C = 0,1 \text{ мкФ}$ і опору на магазині опорів $R = 200 \text{ Ом}$.

3. Визначити за заданими значеннями $L = 0,1 \text{ Гн}$ і C циклічну резонансну частоту контуру $\omega_{рез} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ та резонансну

частоту: $\nu_{рез} = \frac{\omega}{2\pi}$.

4. Встановити відповідні до знайденого значення $\nu_{рез}$ діапазон частот НЧ, і регулюючи вихідну напругу та величину напруги по вертикалі, отримати стійку картину синусоїдальних коливань на екрані осцилографа.
5. За допомогою вертикальної шкали на екрані осцилографа виміряти величину спостережуваного сигналу для різних значень частоти вхідної напруги. Відлік частоти слід робити з інтервалом 10 Гц при постійному значенні амплітуди вихідної напруги і підсилення по вертикалі.
6. Провести аналогічні вимірювання для інших значень опору 100 і 200 Ом , змінюючи його при допомозі магазину опорів.
7. За результатами вимірювань побудувати резонансні криві для різних значень R_L .
8. Користуючись отриманими графіками, визначити в кожному випадку резонансну частоту $\nu_{рез}$, ширину резонансної кривої $\Delta\nu$, яка відповідає значенню $I_0 = 0,7 \text{ А}$ та добротність контура $Q = \nu_{рез} / \Delta\nu$. Порівняти отримані значення з теоретично розрахованими: $Q = \omega / 2\nu$.
9. Зробіть висновок про залежність Q та $\Delta\nu$ від величини R_L .

II. Побудова фазочастотної характеристики.

1. Регулюючи підсилення осцилографа за осями X та Y (схему подано на рис.6.10.2), отримати однакову величину сигналу за цими осями.

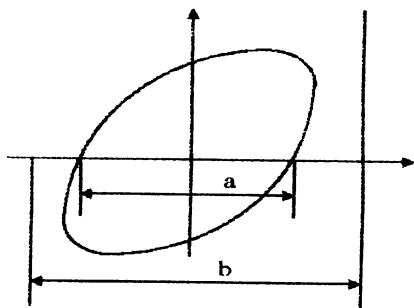


Рис. 6.10.3

2. Змінюючи частоту генератора за допомогою отриманих на екрані фігур, що мають форму еліпса (рис. 6.10.3), визначити зсув фаз між струмом у контурі та напругою на вході контуру за формулою:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{a}{b}\right).$$

3. Провести вказані вимірювання для трьох різних значень R .
4. Користуючись отриманими даними, побудувати графіки залежності при різних значеннях R_I .
5. Зробити висновок про характер коливань в коливній системі, про вплив параметрів системи на явище резонансу.

Контрольні питання

1. Запишіть диференціальне рівняння вимушених коливань.
2. Що таке резонансна частота і як її можна обчислити?
3. Що називається добротністю контура? Як вона пов'язана із шириною резонансної кривої? Фізичний зміст цих понять.
4. Доведіть, що вимушені коливання є гармонічними.
5. Як визначається амплітуда і фаза вимушених коливань?
6. Чим визначається частота коливань і амплітуда напруги в контурі, який складається з індуктивності і ємності, а активний опір дуже малий?
7. У чому полягає процес встановлення вимушених коливань?

Задачі для самопідготовки

1. Коливальний послідовний контур має параметри: $L=0,1 \text{ Гн}$; $C=5 \text{ мкФ}$; $R=10 \text{ Ом}$. На яких двох частотах амплітуда вимушених коливань дорівнює половині амплітуди при резонансі?
2. Якою має бути добротність коливального контура вхідного кола радіоприймача, щоб його смуга пропускання $\Pi_{0,7}$ не перевищувала 10 кГц при прийманні модульованого сигналу з несучою частотою $2,0 \text{ МГц}$?

Методичні поради

Теоретичний матеріал цієї лабораторної роботи можна використати на уроці фізики в 11 класі при вивченні теми "Вимушені коливання. Резонанс." Обладнання роботи - для проведення демонстраційного експерименту.

6.11. Дослідження релаксаційних коливань

Тема: Дослідження релаксаційних коливань.

Мета: Ознайомитись із роботою генератора релаксаційних коливань, дослідити його основні характеристики.

Обладнання: Касета ФПЗ –12/13, магазин опорів, магазин ємностей, осцилограф, цифровий вольтметр, джерело живлення.

Теоретичні відомості

Якщо за період автоколивань розсіюється вся нагромаджена в системі енергія, то автоколивання дуже відрізняються від гармонічних. Такі автоколивання називаються релаксаційними, а системи, що їх утворюють, – релаксаційними генераторами.

Схема найпростішого генератора релаксаційних коливань подана на рис. 6.11.1., в якому паралельно до конденсатора

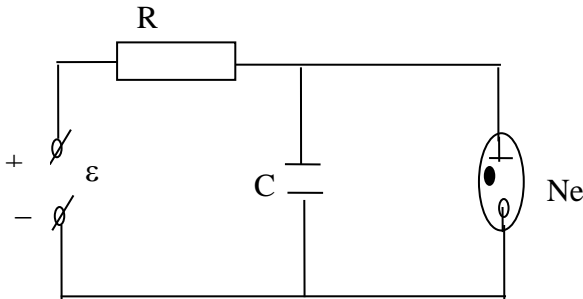


Рис. 6.11.1

увімкнено неонову лампу НЛ. Конденсатор C заряджається від джерела струму E через досить великий опір R . Якби не було неонові лампи НЛ, то напруга на обкладках конденсатора U_c зростала б із часом і асимптотично прямувала б до E/RC джерела E . При наявності неонові лампи, коли напруга U_c досягає напруги запалювання газового розряду, вона почне проводити струм.

Опір неонові лампи при цьому практично зменшується до нуля, і конденсатор досить швидко розряджається через лампу. Коли напруга зменшується до значення напруги гасіння розряду U_r , розряд у лампі припиняється. З цього моменту конденсатор знову заряджається, поки його напруга не досягне напруги запалювання, газового розряду.

Криву напруги на конденсаторі як функцію часу подано на рис. 6.11.2. Період коливань генератора T дорівнює часу зарядки τ

конденсатора від напруги U_2 до напруги U_3 . Для знаходження періоду запишемо другий закон Кірхгофа для кола генератора при погашеній газонаповненій лампі.

$$\varepsilon = RI + U = R \frac{dq}{dt} + U_C = RC \frac{dU_C}{dt} + U_C . \quad (6.11.1)$$

Цей вираз перетворимо наступним чином:

$$RC \frac{dU_C}{\varepsilon - U_C} = dt . \quad (6.11.2)$$

Проінтегрувавши (6.11.2) від U_Γ до U_3 , отримаємо:

$$T = \tau \ln \frac{\varepsilon - U_3}{\varepsilon - U_\Gamma} , \quad (6.11.3)$$

де $\tau = RC$ - час заспокоювання контуру або час релаксації.

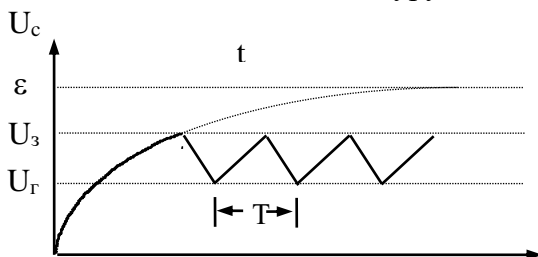


Рис. 6.11.2

Час релаксації – це час протягом якого напруга на лампі змінюється в e разів.

Опис експериментальної установки

Схему експериментальної установки подано на рис. 6.11.3. Основою цієї установки є касета ФПЗ-12/13. Картина релаксаційних коливань спостерігається за допомогою осцилографа.

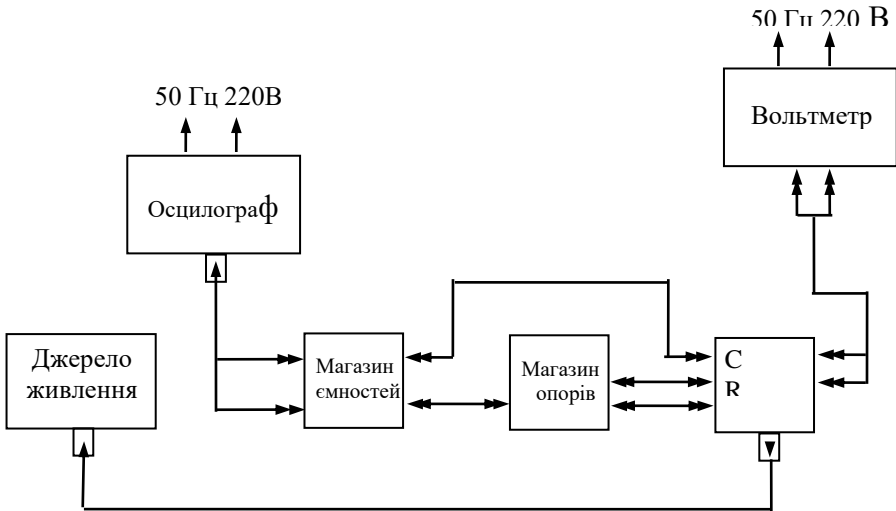


Рис. 6.11.3.

Порядок виконання роботи

1. Зібрати коло згідно з рис. 6.11.3.
2. Увімкнути джерело живлення і вольтметр.
3. Змінюючи напругу на неоновій лампі від 20 до 120 В і навпаки, за допомогою потенціометра на панелі джерела живлення через кожні 5 В зняти значення струму, що проходить через лампу, за допомогою цифрового вольтметра, перевівши попередньо перемикач на панелі касети в положення "В/А х-ка".
4. За отриманими значеннями побудувати вольт-амперну характеристику і визначити напругу запалювання U_3 і гасіння U_2 неонові лампи.
5. Увімкнути осцилограф і вивести електронний промінь у центр координатної сітки.
6. Перемикач на панелі касети перевести в положення "ГЕН", встановити напругу живлення генератора 120 В. Змінюючи опір і ємність за допомогою магазинів, отримати на екрані осцилографа стійку картину релаксаційних коливань.
7. За мітками часу на екрані осцилографа визначити період релаксаційних коливань.
8. Розрахувати період коливань релаксаційного генератора за співвідношенням (6.11.3) і порівняти з експериментальним

- значенням, отриманим у пункті 7.
- Змінюючи опір і ємність за допомогою магазинів опорів і ємностей, дослідити, як змінюється період коливань.
 - Дані розрахунків занести у таблицю. Обчислити похибки. Зробити висновки.

Контрольні питання

- Що таке релаксаційні коливання?
- Який принцип роботи генератора релаксаційних коливань?
- Що таке період релаксаційних коливань?
- Виведіть формулу для обчислення періоду релаксаційних коливань.
- Що таке час релаксації генератора?
- Як вимірюється період коливань за допомогою осцилографа?

Задачі для самопідготовки

- Визначити час релаксації релаксаційних коливань, якщо $C=10$ мкФ, активний опір 10 кОм.
- Побудувати графік залежності періоду релаксаційних коливань від електрорушійної сили, якщо $R=5$ кОм, $C=5$ мкФ, а напруга запалювання 120 В.

Методичні поради

Ця лабораторна робота може бути поставлена як робота фізичного практикуму в 11 класі при вивченні теми "Електричні коливання і хвилі".

**Розділ VII. Задачі змістових модулів "Електростатика.
Постійний струм", "Електричний струм
у різних середовищах", "Магнітне поле.
Магнітні властивості речовини"**

**7.1. Основні співвідношення для розрахунків характеристик
електричного і магнітного полів**

Закон збереження електричного заряду:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = const. \quad (7.1.1)$$

Закон Кулона:

$$F = \frac{|q_1||q_2|}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} = k \frac{|q_1||q_2|}{r^2}, \quad (7.1.2)$$

де $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{Н \cdot м^2}{Кл^2}$, q_1 і q_2 – електричні заряди, ϵ – відносна діелектрична проникність середовища, в якому знаходяться заряди (для вакууму $\epsilon = 1$), $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала, r – відстань між електричними зарядами.

Заряд тіла, де N – число надлишкових елементарних зарядів:

$$q = \pm Ne, \quad (7.1.3)$$

де $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – елементарний заряд.

Об'ємна густина заряду:

$$\sigma_v = \frac{q}{V}. \quad (7.1.4)$$

Поверхнева густина заряду:

$$\sigma_s = \frac{q}{S}. \quad (7.1.5)$$

Лінійна густина заряду:

$$\sigma_l = \frac{q}{l}. \quad (7.1.6)$$

Напруженість електричного поля точкового заряду:

$$E = \frac{F}{q} = \frac{|q|}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}. \quad (7.1.7)$$

Напруженість електричного поля нескінченної рівномірно зарядженої площини:

$$E = \frac{\sigma_s}{2\epsilon\epsilon_0}. \quad (7.1.8.)$$

Напруженість між двома різнойменними зарядженими нескінченними площинами:

$$E = \frac{\sigma_s}{\epsilon\epsilon_0}. \quad (7.1.9)$$

Напруженість поля, створеного зарядженою нескінченно довгою ниткою:

$$E = \frac{\sigma_l}{2\pi\epsilon\epsilon_0 a_0}, \quad (7.1.10)$$

де a – відстань до нитки.

Напруженість поля, створеного зарядженою сферою:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}, \quad (7.1.11)$$

де r – відстань від центру сфери, більша за радіус сфери або рівна з ним.

Принцип суперпозиції полів:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = const. \quad (7.1.12)$$

Потік вектора напруженості:

$$\Phi = E \cdot S \cos \alpha, \quad (7.1.13)$$

де Φ – вектор напруженості, α - кут між \vec{E} і нормаллю \vec{n} до площини S .

Теорема Остроградського – Гауса:

$$\Phi = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum q. \quad (7.1.14)$$

Потенціал електростатичного поля:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} \quad (7.1.15)$$

або

$$\varphi = \frac{W_{II}}{q_0}, \quad (7.1.16)$$

де W_{II} – потенціальна енергія пробного позитивного заряду q_0 , який знаходиться в певій точці.

Принцип суперпозиції електричних полів для потенціалів:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n = \text{const}, \quad (7.1.17)$$

де φ – потенціал результуючого поля, φ_n – потенціал n -го поля.

Робота електричного поля під час переміщення заряду q_0 між двома точками поля:

$$A = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0 U, \quad (7.1.18)$$

де $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ – різниця потенціалів (напруга) між цими точками.

Робота однорідного електричного поля під час переміщення заряду q_0 уздовж силових ліній цього поля:

$$A = q_0 E d, \quad (7.1.19)$$

де E – напруженість електричного поля, d – модуль переміщення заряду.

Робота електричного поля при зміні відстані між двома взаємодіючими зарядами q_1 і q_2 :

$$A = W_1 - W_2 = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon \epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (7.1.20)$$

де r_1 і r_2 – початкова і кінцева відстані між зарядами, W_1 і W_2 – енергії взаємодії зарядів у цих точках.

Зв'язок між напруженістю однорідного електричного поля E та напругою (різницею потенціалів) U

$$E = \frac{U}{d}, \quad (7.1.21)$$

де d – відстань між точками, розміщеними на одній силовій лінії.

Ємність конденсатора:

$$C = \frac{q}{U}, \quad (7.1.22)$$

де q – заряд конденсатора, U – напруга між пластинами.

Ємність плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (7.1.23)$$

де ε - діелектрична проникність середовища між пластинами, S – площа пластин, d – відстань між ними.

Напруженість поля між пластинами плоского конденсатора:

$$E = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0 S}, \quad (7.1.24)$$

де q – значення заряду, S – площа пластин.

Електроємність провідної кулі:

$$C = 4\pi \varepsilon \varepsilon_0 R, \quad (7.1.25)$$

де R – радіус кулі.

Електроємність батареї конденсаторів при їх паралельному з'єднанні:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (7.1.26)$$

Електроємність батареї конденсаторів при їх послідовному з'єднанні:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (7.1.27)$$

Енергія зарядженого конденсатора:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2}. \quad (7.1.28)$$

Об'ємна густина енергії електричного поля

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2}, \quad (7.1.29)$$

де W – енергія поля, E – напруженість, V – об'єм простору, де створено поле.

Сила постійного струму:

$$I = \frac{q}{t}, \quad (7.1.30)$$

де q – заряд, перенесений через поперечний переріз провідника за час t .

Сила струму в провіднику:

$$I = q_0 n v S, \quad (7.1.31)$$

де q_0 – заряд носія струму, n – концентрація вільних зарядів, v – середня швидкість спрямованого руху вільних зарядів, S – площа поперечного перерізу провідника.

Опір провідника:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (7.1.32)$$

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

Опір провідника при температурі t :

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (7.1.33)$$

де R_0 – опір при 0°C (273 К), α – температурний коефіцієнт опору.

Опір ділянки кола n послідовно з'єднаних провідників:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n, \quad (7.1.34)$$

де R_1, R_2, \dots, R_n – опори окремих провідників.

Загальний опір ділянки кола при паралельному з'єднанні n провідників:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (7.1.35)$$

Електрорушійна сила (ЕРС) джерела струму:

$$\varepsilon = \frac{A_{cm}}{q}, \quad (7.1.36)$$

де A_{cm} – робота сторонніх сил із переміщення позитивного заряду q вздовж електричного кола.

Напруга на ділянці кола:

$$U = \frac{A + A_{cm}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon, \quad (7.1.37)$$

де ε – ЕРС на ділянці.

Закон Ома для однорідної ділянки кола:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (7.1.38)$$

Закон Ома для неоднорідної ділянки кола (тобто ділянки, що містить джерело ЕРС):

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon}{R}, \quad (7.1.39)$$

де $\varphi_1 - \varphi_2$ - різниця потенціалів на кінцях ділянки.

Закон Ома для повного кола:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (7.1.40)$$

де R - зовнішній опір, r - внутрішній опір (опір джерела).

Перше правило Кірхгофа:

$$I_1 + I_2 + \dots + I_n = 0, \quad (7.1.41)$$

де I_1, I_2, \dots, I_n - струми, які входять і виходять із вузла.

Друге правило Кірхгофа:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 + \dots + I_n R_n = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \dots + \varepsilon_n \quad (7.1.42)$$

або

$$\sum IR = \sum \varepsilon, \quad (7.1.43)$$

де $I_1 R_1, I_2 R_2, \dots, I_n R_n$ - спади напруг у замкнутому контурі, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ - ЕРС, які діють у цьому контурі.

При послідовному з'єднанні n однакових джерел струму:

$$\varepsilon = n\varepsilon_1; \quad r = nr_1, \quad (7.1.44)$$

де ε_1 - ЕРС одного джерела, r_1 - його опір.

При паралельному з'єднанні m однакових джерел струму:

$$\varepsilon = \varepsilon_1; \quad r = \frac{r_1}{m}. \quad (7.1.45)$$

При мішаному з'єднанні джерел у батарею, яка складається з m паралельно з'єднаних ланок, у кожній із яких n послідовно з'єднаних джерел:

$$\varepsilon = n\varepsilon_1; \quad r = r_1 \frac{n}{m}. \quad (7.1.46)$$

Робота електричного струму на ділянці кола:

$$A = qU = UIt = I^2 Rt = \frac{U^2}{R} t, \quad (7.1.47)$$

де t - час проходження струму.

Потужність електричного струму на ділянці кола:

$$P = \frac{A}{t} = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (7.1.48)$$

ККД джерела струму:

$$\eta = \frac{R}{R+r}. \quad (7.1.49)$$

Принцип суперпозиції магнітних полів:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n, \quad (7.1.50)$$

де \vec{B} - індукція результуючого магнітного поля.

Сила Ампера:

$$F_A = BIl \sin \alpha, \quad (7.1.51)$$

де B – індукція магнітного поля, I – сила струму, l – довжина активної частини провідника, α - кут між напрямом струму і магнітною індукцією.

Обертальний момент, що діє на контур із струмом у магнітному полі:

$$M = BIS \sin \alpha, \quad (7.1.52)$$

де S – площа контуру, α - кут між нормаллю до контуру і магнітною індукцією.

Закон Біо – Савара – Лапласа:

$$\Delta B = \mu \mu_0 \frac{I \Delta l \sin \alpha}{4\pi r^2}, \quad (7.1.53)$$

де μ - магнітна проникність середовища, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{A^2}$ - магнітна стала, I – сила струму, Δl - довжина частини провідника, α - кут між напрямом у точку спостереження і напрямом струму на ділянці Δl , r – відстань від розглядуваної частини провідника до точки, ΔB - індукція магнітного поля в розглядуваній точці.

Якщо напруженість магнітного поля дорівнює H , то індукція цього поля:

$$B = \mu \mu_0 H. \quad (7.1.54)$$

Магнітна проникність середовища:

$$\mu = \frac{B}{B_0}, \quad (7.1.55)$$

де B – магнітна індукція в середовищі, B_0 – магнітна індукція у вакуумі.

Магнітна індукція прямолінійного провідника нескінченної довжини зі струмом:

$$B = \mu \mu_0 \frac{I}{2\pi r}, \quad (7.1.56)$$

де r – відстань від провідника.

Магнітна індукція колового струму (у центрі витка):

$$B = \mu \mu_0 \frac{I}{2r}, \quad (7.1.57)$$

де r – радіус витка.

Магнітна індукція соленоїда:

$$B = \mu \mu_0 \frac{IN}{l}, \quad (7.1.58)$$

де N – кількість витків, l – довжина соленоїда.

Магнітний момент:

$$P_{\text{маг}} = I \cdot S, \quad (7.1.59)$$

де I – сила струму, S – площа, яку охоплює струм.

Сила Лоренца:

$$F_{\text{Л}} = qvB \sin \alpha, \quad (7.1.60)$$

де q – заряд рухомої частинки, v – її швидкість, B – магнітна індукція, α – кут між напрямом швидкості і лініями магнітної індукції.

Радіус кола, яке описує рухома заряджена частинка в однорідному магнітному полі з індукцією \vec{B} :

$$R = \frac{mv}{qB}, \quad (7.1.61)$$

де m , q і v – маса, заряд і швидкість частинки. Вектор швидкості \vec{v} лежить у площині кола і перпендикулярний до вектора \vec{B} .

Магнітний потік однорідного магнітного поля з індукцією \vec{B} через поверхню площею S :

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha, \quad (7.1.62)$$

де α – кут між напрямом нормалі до поверхні і вектором \vec{B} .

Закон електромагнітної індукції:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \quad (7.1.63)$$

де ε_i – середнє значення ЕРС індукції у контурі, $\Delta\Phi$ – зміна магнітного потоку через контур за час Δt .

ЕРС індукції у котушці, що містить N витків:

$$\varepsilon_i = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (7.1.64)$$

Закон електромагнітної індукції, за яким визначають миттєве значення ЕРС індукції ε_i :

$$\varepsilon_i = -\dot{\Phi}(t) \quad (7.1.65)$$

або

$$\varepsilon_i = -N\dot{\Phi}(t), \quad (7.1.66)$$

де $\dot{\Phi}(t)$ – похідна магнітного потоку за часом.

ЕРС індукції в рухомому провіднику:

$$\varepsilon_i = Blv \sin \alpha, \quad (7.1.67)$$

де B – магнітна індукція, l – довжина провідника, v – швидкість руху провідника, α – кут між векторами \vec{v} і \vec{B} .

Магнітний потік через контур:

$$\Phi = LI, \quad (7.1.68)$$

де L – індуктивність контуру, I – сила струму.

$$\text{ЕРС самоіндукції} - \varepsilon_i = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (7.1.69)$$

де $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ – швидкість зміни струму в провіднику.

Індуктивність провідника (соленоїда):

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l}, \quad (7.1.70)$$

де N – кількість витків, S – площа поперечного перерізу, l – його довжина.

Енергія магнітного поля провідника:

$$W = \frac{LI^2}{2}. \quad (7.1.71)$$

Густина енергії магнітного поля:

$$\omega = \frac{B^2}{2\mu_0}. \quad (7.1.72)$$

Перший закон Фарадея для електролізу:

$$m = kq, \quad (7.1.73)$$

де m – маса речовини, що виділилася на електроді, k – електрохімічний еквівалент речовини, q – заряд, який пройшов через електроліт.

Об'єднаний закон Фарадея для електролізу:

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{n} It, \quad (7.1.74)$$

де M – молярна маса речовини, I – сила струму, t – час проходження струму, $F = eN_A = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}$ – стала Фарадея, n – валентність елемента.

Електрохімічний еквівалент речовини:

$$k = \frac{M}{eN_A n} = \frac{M}{Fn}. \quad (7.1.75)$$

Електричний заряд будь-якого іона:

$$q = \pm \frac{nF}{N_A}. \quad (7.1.76)$$

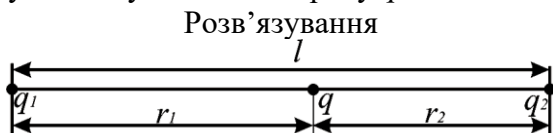
Умова початку іонізації газу електронним ударом:

$$eEl > W_i, \quad (7.1.77)$$

де e – заряд електрона, E – напруженість електричного поля, l – довжина вільного пробігу електрона, W_i – енергія іонізації.

7.2. Приклади розв'язування задач із змістових модулів "Електростатика. Постійний струм", "Електричний струм у різних середовищах", "Магнітне поле. Магнітні властивості речовини"

Задача 1. Маємо два додатні заряди $q_1 = ne$ і $q_2 = me$. Відстань між зарядами – l . Як потрібно розташувати третій заряд q , щоб він знаходився у рівновазі, якщо заряди q_1 і q_2 : 1) закріплені; 2) вільні? Знайти в цьому випадку значення заряду q .



1. Для того, щоб заряд був у рівновазі, сила F_1 , яка діє на нього з боку заряду q_1 , повинна дорівнювати силі F_2 , яка діє на нього з боку заряду q_2 (рис.7.2.1).

За законом Кулона,

$$\frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q_1 q}{r_1^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q_2 q}{r_2^2}.$$

Через те, що $r_1 = l - r_2$, то

$$\frac{q_1}{(l - r_2)^2} = \frac{q_2}{r_2^2},$$

або

$$\frac{ne}{(l - r_2)^2} = \frac{me}{r_2^2},$$

звідки

$$r_2 = \frac{l\sqrt{m}}{\sqrt{m} + \sqrt{n}}.$$

Для стійкої рівноваги заряд q повинен бути додатнім. Якщо він зміститься з положення рівноваги ближче до заряду q_2 , то сила відштовхування з боку цього заряду зросте, а з боку заряду q_1 – зменшиться, і заряд q повернеться в положення рівноваги.

2. У цьому випадку заряд q повинен бути від'ємним, але рівновага буде нестійкою. Якщо, наприклад, заряд q_1 зміститься в бік заряду q , то сила притягання з боку заряду q перевищить силу відштовхування з боку заряду q_2 , і рівновага порушиться, при чому заряди q_1 і q зімкнуться, а заряд q_2 полетить у нескінченність.

Умовою рівноваги системи буде рівність нулю суми сил, які діють на кожний із зарядів:

$$F_1 = F_2 ; F_{21} = F_1 ; F_2 = F_{21},$$

де F_1 – сила взаємодії зарядів q і q_1 ; F_2 – сила взаємодії зарядів q і q_2 ; F_{21} – сила взаємодії зарядів q_1 і q_2 .

Із цих рівнянь з урахуванням того, що $r_1 + r_2 = l$, отримуємо значення r_1 і r_2 , як у випадку 1. Потім записуємо:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{l^2} = \frac{q q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_2^2}; \quad \frac{q_1}{l^2} = \frac{q}{r_2^2},$$

звідки

$$q = q_1 \frac{m}{(\sqrt{m} + \sqrt{n})^2}.$$

Задача 2. Плоский повітряний конденсатор ємністю C заряджається від батареї, різниця потенціалів на клеммах якої дорівнює U . Визначити різницю потенціалів на обкладках конденсатора після збільшення відстані між пластинами в n разів і роботу зовнішніх сил, яку потрібно виконати для збільшення відстані між пластинами, якщо: 1) після зарядки конденсатор від'єднують від джерела; 2) конденсатор залишається під'єднаним до джерела.

Розв'язування

1. При зарядженні конденсатора на його пластинах з'явився заряд $q = CU$. Якщо конденсатор від'єднується від джерела, заряд лишається незмінним. При розсовуванні пластин на відстань, у n разів більшу, ємність конденсатора дорівнює $C_1 = C/n$. Різниця потенціалів на пластинах після їх розсування:

$$U_1 = \frac{q}{C_1} = \frac{nq}{C} = nU.$$

Відповідно до закону збереження енергії $A = W_2 - W_1$, де W_2 – енергія поля конденсатора в кінцевому стані; W_1 – в початковому стані, при чому:

$$W_2 = \frac{q^2}{2C_1} = \frac{nq^2}{2C}; \quad W_1 = \frac{q^2}{2C}.$$

Після підстановки отримуємо:

$$A = \frac{nq^2}{2C} - \frac{q^2}{2C} = \frac{q^2}{2C}(n-1) = \frac{1}{2}CU^2(n-1).$$

2. Якщо конденсатор не від'єднується від джерела, то різниця потенціалів на його обкладках залишається постійною, а при їх розсовуванні змінюється ємність конденсатора і заряд його пластин.

Аналогічно до описаного:

$$A = W_2 - W_1 = \frac{1}{2}C_1U^2 - \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}U^2\left(\frac{C}{n} - C\right) = \frac{1}{2}CU^2\left(\frac{1-n}{n}\right).$$

Перевіряємо одиницю одержаної величини:

$$[A] = \Phi \cdot B^2 = \frac{Кл}{В} \cdot B^2 = A \cdot c \cdot B = Дж.$$

Задача 3. Два вольтметри, що з'єднані послідовно, під'єднані до джерела струму і показують 8 і 4 В. Якщо під'єднати тільки другий вольтметр, він покаже 10 В. Чому дорівнює ЕРС джерела?

Розв'язування

Для випадку, коли під'єднані обидва вольтметри, можна записати рівняння:

$$\varepsilon = Ir + U_1 + U_2, \quad (1)$$

де Ir – спад напруги в середині джерела; U_1, U_2 – спад напруги на першому і другому вольтметрах відповідно.

Якщо під'єднаний тільки другий вольтметр, то:

$$\varepsilon = I_1r + U'_2, \quad (2)$$

де I_1r – спад напруги в середині джерела; U'_2 – показання вольтметра у другому випадку.

Відповідно до закону Ома для ділянки кола:

$$U_2 = IR_2; \quad U'_2 = I_1R_2, \quad (3)$$

де R_2 – опір вольтметра.

Із (3) маємо:

$$R_2 = \frac{U_2}{I}; \quad I_1 = \frac{U'_2}{R_2} = \frac{U'_2 I}{U_2}. \quad (4)$$

З (1) отримуємо:

$$Ir = \varepsilon - (U_1 + U_2). \quad (5)$$

Підставивши (4) в (2), знаходимо:

$$\varepsilon = \frac{U'_2}{U_2} Ir + U'_2. \quad (6)$$

Із (5) і (6)

$$\varepsilon = \frac{U'_2}{U_2} (\varepsilon - (U_1 + U_2)) + U'_2,$$

звідки

$$\varepsilon = \frac{U'_2 U_1}{U'_2 - U_2} \approx 13,3 \text{ В.}$$

Задача 4. Електрон зі швидкістю 10 Мм/с влітає в однорідне магнітне поле з індукцією 10 мТл під кутом α до ліній індукції. Визначити радіус і крок спіральної лінії, по якій буде рухатися електрон, якщо: а) $\alpha = 60^\circ$; б) $\alpha = 90^\circ$.

Розв'язування

Відомо, що коли заряджена частинка влітає в однорідне магнітне поле так, що вектор швидкості \vec{v} спрямований під кутом α до вектора \vec{B} , то у випадку, якщо дією всіх сил, крім сили Лоренца \vec{F}_L , можна знехтувати, траєкторією руху частинки буде гвинтова лінія. У цьому можна переконатися, якщо у вибраній системі координат ОХУ (рис.7.2.3) знайти проєкції вектора \vec{v} на осі Х і Y:

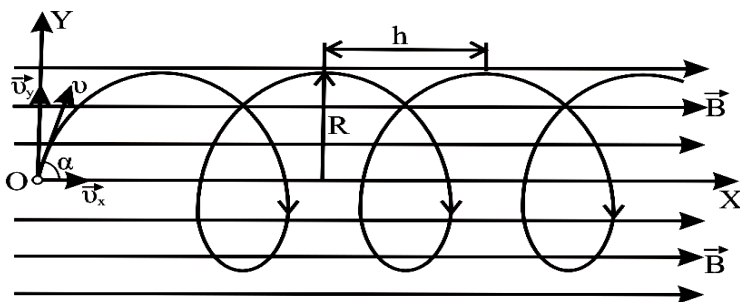


Рис.7.2.3.

$$v_x = v \cos \alpha; \quad v_y = v \sin \alpha. \quad (1)$$

Уявимо рух електрона як суперпозицію його руху по колу з деяким радіусом R у вертикальній площині і горизонтального руху вздовж ліній індукції магнітного поля. Якщо скористатися відомим із кінематики принципом незалежності рухів, то стане очевидним, що період обертання електрона по колу радіусом R дорівнює часу зміщення електрона на один крок уздовж поля. Оцінімо характер кожного з незалежних рухів.

При вказаних на малюнку напрямках векторів \vec{B} і \vec{v} сила Лоренца \vec{F}_L , що діє на електрон, за правилом лівої руки, спрямована перпендикулярно до площини рисунка (до нас), тобто $\vec{F}_L \perp \vec{v}$. Оскільки іншими силами, що діють на електрон, ми нехтуємо, то сила Лоренца, як відомо з кінематики, змінює тільки напрям складової v_y ; модуль же $v_y = \text{const}$. Це означає, що складова v_y буде весь час розташована у вертикальній площині, перпендикулярній до площини малюнка. Отже, рух електрона по колу у вертикальній площині буде рівномірним.

Рух же електрона вздовж ліній індукції поля буде рівномірним і прямолінійним, бо в цьому напрямі на нього взагалі не діють сили.

Оскільки сила Лоренца:

$$F_L = ev_y B = ev B \sin \alpha \quad (2)$$

надає електрону в площині, перпендикулярній до ліній індукції, доцентрове прискорення:

$$a = \frac{v_y^2}{R} = \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{R}, \quad (3)$$

то, за другим законом Ньютона, $F_{\perp} = ma$ або з урахуванням рівностей (2) і (3) $e v_y B = m \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{R}$, звідки:

$$R = \frac{m v \sin \alpha}{e B}. \quad (4)$$

Перевіряємо одиницю отриманої величини:

$$[R] = \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\text{Кл} \cdot \text{Тл}} = \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}}}{\text{А} \cdot \text{с} \cdot \frac{\text{В}}{\text{А} \cdot \text{м}}} = \frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{\frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{\text{м}}} = \text{м}.$$

Оскільки вздовж ліній індукції електрон рухається прямолінійно з постійною швидкістю $v_x = \text{const}$, крок гвинтової лінії $h = v_x T$, де $T = 2\pi R / v_y$ - період обертання електрона. Отже, з урахуванням рівностей (1) і (4):

$$h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{e B}. \quad (5)$$

Підставляючи числові значення у співвідношення (4) і (5), знаходимо:

$$R = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad h = 3,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}; \\ R = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad h = 0.$$

Зверніть увагу на співвідношення (5), з якого випливає, що траєкторії заряджених частинок, що влітають в однорідне магнітне поле перпендикулярно до ліній магнітної індукції ($\alpha = 90^\circ$), є дугами кіл (крок гвинтової лінії $h = 0$).

Задача 5. Замкнутий ізольований провідник завдовжки 1 м розміщений по периметру круглої горизонтальної площадки. Який заряд пройде через провідник, якщо надати йому форму квадрата? Опір провідника 0,5 Ом, вертикальна складова магнітного поля Землі 50 мкТл.

Розв'язування

Знайдемо площу S_1 круглої площадки, охопленої провідником завдовжки $l = 1$ м. Довжина провідника l дорівнює довжині кола радіусом r : $l = 2\pi r$, звідки $r = \frac{l}{2\pi}$. Площа круга

$S_1 = \pi r^2 = \frac{l^2}{4\pi}$. Тоді магнітний потік через круглу площадку площею S_1 :

$$\Phi_1 = BS_1 = \frac{Bl^2}{4\pi}, \quad (1)$$

де B – вертикальна складова вектора магнітної індукції магнітного поля Землі; $B = 50$ мкТл $= 5 \cdot 10^{-5}$ Тл.

Коли провідник вигинають, надаючи йому форму квадрата, довжина провідника дорівнює периметру квадрата із стороною a , тобто $l = 4a$, $a = \frac{l}{4}$. Тоді площа квадрата $S_2 = a^2 = \frac{l^2}{16}$.

Магнітний потік Φ_2 через квадратну площадку:

$$\Phi_2 = BS_2 = \frac{Bl^2}{16}. \quad (2)$$

Зміна магнітного потоку в контурі, обмеженому провідником, внаслідок зміни форми контура з колової на квадратну викликає ЕРС індукції ε_i . За законом електромагнітної індукції:

$$\varepsilon_i = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Delta t},$$

де Δt – час, за який змінюється форма провідного контуру. Якщо контур замкнений і його електричний опір дорівнює R , у контурі виникає індукційний струм I_i . За законом Ома:

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R\Delta t}. \quad (3)$$

За означенням, сила струму:

$$I_i = \frac{\Delta q}{\Delta t}, \quad (4)$$

де Δq - заряд, що проходить через провідник за час Δt .

Із формул (3) і (4) знаходимо:

$$\Delta q = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R},$$

або з урахуванням виразів (1) і (2):

$$\Delta q = \frac{1}{R} \left(\frac{Bl^2}{4\pi} - \frac{Bl^2}{16} \right) = \frac{Bl^2(4 - \pi)}{16R\pi} = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ Кл.}$$

Перевіряємо одиницю одержаної величини:

$$[\Delta q] = \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}^2}{\text{Ом}} = \frac{\frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} \cdot \text{м}^2}{\frac{\text{В}}{\text{А}}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}} \cdot \frac{\text{А}}{\text{В}} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{В}} = \frac{\text{Дж}}{\text{В}} = \frac{\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}}{\text{В}} = \text{А} \cdot \text{с} = \text{Кл.}$$

Задача 6. Дві електролітичні ванни з розчинами FeCl_3 і CuSO_4 з'єднані послідовно. Скільки міді виділиться за час, протягом якого виділилося залізо масою m_1 ?

Розв'язування

Якщо електролітичні ванни з'єднані послідовно, то через них течуть однакові струми і кількість електрики, яка пройшла через кожну з ванн, буде однаковою.

Тому

$$m_1 = \frac{1}{F} \frac{A_1}{n_1} q; \quad m_2 = \frac{1}{F} \frac{A_2}{n_2} q \quad \text{і} \quad \frac{m_1}{m_2} = \frac{A_1 n_2}{A_2 n_1},$$

$$\text{тобто} \quad m_2 = m_1 \frac{A_2 n_1}{A_1 n_2},$$

де m_2 – маса міді; A_2 , n_2 – атомна маса і валентність міді; A_1 і n_1 – атомна маса і валентність заліза. Підставивши числові дані, маємо

$$m_2 = m_1 \frac{64 \cdot 3}{56 \cdot 2} \approx 1,71 m_1.$$

7.3. Задачі з теми "Електричне поле"

7.3.1. Закон збереження заряду. Точковий і розподілений заряди. Закон Кулона

Рівень А

1. Внаслідок тертя із поверхні скляної палички було випущено $32 \cdot 10^{12}$ електронів. Визначити електричний заряд палички.
2. Під час електризації ебонітової палички її маса збільшилася на $182 \cdot 10^{-20}$ кг. Визначити знак і величину електричного заряду палички.
3. Яка основна властивість електричних зарядів використовується в електроскопі?
4. Визначити розподіл заряду 0,6 Кл на лінії довжиною 10 м.
5. Чому дорівнює заряд прямокутника площею 2 м^2 , якщо поверхневий розподіл становить $0,26 \text{ Кл/м}^2$?
6. Визначити, який об'єм займає заряд 0,04 Кл, якщо його об'ємна густина дорівнює $8 \cdot 10^{-3} \text{ Кл/м}^3$.
7. На відстані 5 см дві частинки, що мають однакові за величиною заряди, притягуються в повітрі одна до одної з силою 20 мН. Визначити заряди частинок.
8. З якою силою взаємодіють два заряди по 12 нКл, розташовані на відстані 0,05 м один від одного?
9. На якій відстані один від одного заряди 0,1 мкКл і 2 нКл взаємодіють із силою 12 мкН?
10. Електричні заряди двох хмар дорівнюють 20 Кл і 30 Кл, а середня відстань між ними 30 км. З якою електричною силою взаємодіють хмари?

Рівень В

11. Чому небезпека виникнення пожежі різко зростає, якщо під час буріння свердловини з-під землі виривається потужний фонтан нафти? При якій погоді – сухій чи вологій – небезпека спалахування нафти буде більшою?

12. Як, користуючись наелектризованою ебонітовою паличкою, можна зарядити електроскоп позитивним електричним зарядом?
13. Внаслідок електризації маса першої кульки збільшилася на $91 \cdot 10^{-20}$ кг, а маса другої кульки зменшилася на $455 \cdot 10^{-18}$ кг. Визначити величину електричних зарядів кульок.
14. Визначити довжину, по якій розподілено заряд 2 нКл, якщо його лінійна густина 32 Кл/см.
15. Довжина прямокутної площадки, по якій розподілено заряд 0,04 Кл дорівнює 8 см. Знайти її ширину, якщо поверхнева густина заряду дорівнює 13 Кл/м².
16. Чому дорівнює об'єм піраміди, якщо об'ємна густина заряду дорівнює 0,4 Кл/м³, а кількість електронів в її об'ємі дорівнює $64 \cdot 10^{17}$?
17. Дві кульки, розташовані на відстані 10 см одна від одної, мають однакові негативні заряди й взаємодіють із силою 0,23 мН. Визначити кількість "надлишкових" електронів на кожній кульці.
18. Заряди 40 нКл і -10 нКл закріплені на відстані 10 см один від одного. Який треба взяти третій заряд і де його розмістити, щоб система перебувала в рівновазі?
19. Дві однакові провідні кульки з зарядами $+q_1$ і $-q_2$ внаслідок притягання доторкнулися і знову розійшлися на відстань r . Визначити заряд кожної кульки після дотику і силу взаємодії між ними.
20. Дві кульки однакової маси підвішені на тонких шовкових нитках довжиною 0,2 м кожна так, що їх поверхні торкаються одна одної. Після того, як кульки зарядили однаковими за величиною електричними зарядами по $4 \cdot 10^{-7}$ Кл, вони відштовхнулися одна від одної і розійшлися на кут 60° . Визначити масу кульок.

Рівень С

21. Чи можна наелектризувати воду?
22. Чому вкритий пилом заряджений провідник швидко втрачає заряд?

23. Між двома паралельними горизонтальними пластинами, зарядженими однаковими за величиною і протилежними за знаками електричними зарядами, висить краплина олії об'ємом $125 \cdot 10^{-10} \text{ см}^3$. Визначити величину сили, з якою електричне поле діє на краплину, якщо густина олії становить 800 кг/м^3 . Скількох електронів не вистачає краплині, якщо її заряд становить $32 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$?
24. Кола довжиною 1 м надали форму квадрата. Знайти заряд квадрата, якщо $\sigma_s = 12 \text{ Кл/м}^2$.
25. Знайти об'ємну густину заряду правильної трикутної піраміди, сторона основи якої дорівнює 5 см, а висота 12 см, якщо кількість електронів, що міститься в її об'ємі, дорівнює $48 \cdot 10^{14}$ штук.
26. На двох однакових краплях води знаходиться по одному зайвому електрону, при чому сила електричного відштовхування крапель врівноважує силу їхнього взаємного притягання. Які радіуси крапель?

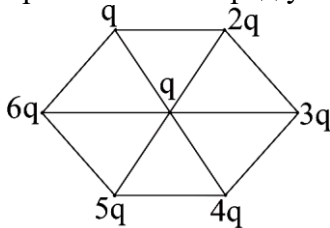


Рис. 7.3.1.



Рис.7.3.2.

27. Дві кульки з однаковим радіусом та вагою, підвішені на нитках однакової довжини, опускаються в діелектрик, густина якого ρ_1 і діелектрична проникність ϵ_1 . Якою повинна бути густина речовини кульок, щоб кути їх розходження в повітрі і в діелектрику були однакові?
28. У вершинах правильного шестикутника зі стороною a розташовані точкові заряди $q, 2q, 3q, 4q, 5q, 6q$ (рис. 7.3.1). Знайти силу, яка діє на точковий заряд q , що лежить на перетині діагоналей шестикутника.
29. Знайдіть питомий заряд кульки, якщо вона обертається з частотою $0,8 \text{ об/с}$ по колу радіусом 3 см, у центрі якого знаходиться заряд 5 нКл .

30. Дві однакові металеві кульки радіусом r і густиною ρ нанизані на тонкий непровідний стержень (рис. 7.3.2.). Верхня кулька закріплена, нижня може вільно переміщуватися уздовж стержня. Кульки опущені в рідину, діелектрична проникність якої – ε , густина – ρ_1 . У кожного мільярдного атома верхньої кульки забрали по одному електрону і перенесли на рухому кульку. На якій відстані буде знаходитися нижня кулька від верхньої в стані рівноваги, якщо стержень розміщений вертикально?

7.3.2. Напруженість електричного поля

Рівень А

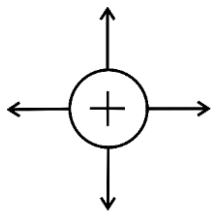


Рис.7.3.3.

31. Чому лінії напруженості електричного поля не перетинаються?
32. Зобразити картину ліній напруженості електричного поля між двома зарядами у випадках: а) q і $-q$; б) q і q ; в) q і $2q$.
33. На рис. 7.3.3. зображено електричне поле заряду $+q$. Зобразіть поле заряду $-2q$.
34. Заряд $0,1$ мкКл знаходиться в електричному полі в точці з напруженістю 5 Н/Кл. Яка сила діє на цей заряд?
35. У деякій точці поля на заряд 2 нКл діє сила $0,4$ мкН. Визначити напруженість поля в цій точці.
36. Яка величина точкового заряду, на який однорідне електричне поле напруженістю 600 кН/Кл діє із силою $0,3$ мН?
37. Визначити напруженість поля заряду 36 нКл у точках, віддалених від нього на 9 см і 18 см.
38. На якій відстані від заряду $1 \cdot 10^{-8}$ Кл напруженість поля дорівнює 300 Н/Кл?
39. Визначити заряд, що створює електричне поле, якщо на відстані 5 см від заряду напруженість поля становить $1,5 \cdot 10^5$ Н/Кл.

Рівень В

40. Визначте напруженість електричного поля в точці, віддаленій на відстань 10 см від точкового заряду, якщо в точці, віддаленій від нього на 5 см, напруженість дорівнює 40 В/м.
41. З яким прискоренням рухається електрон у полі, напруженість якого дорівнює 10 кН/Кл?
42. Віддаль між двома точковими зарядами $+1 \cdot 10^{-7}$ Кл і $-5 \cdot 10^{-8}$ Кл дорівнює 10 см. Яка напруженість поля, створеного цими зарядами у точці, яка знаходиться посередині між ними?
43. Негативний заряд -30 нКл і позитивний заряд 20 нКл знаходяться на відстані 1 м один від одного. В якій точці напруженість електричного поля дорівнює нулю?
44. Два однакові точкові заряди по 3 нКл кожний розміщені на відстані 6 см один від одного. Знайдіть напруженість поля у точці, що знаходиться на відстані 5 см від кожного із зарядів.
45. Чому дорівнює напруженість вертикально спрямованого електричного поля, в якому крапля масою 20 нг і зарядом 1 нКл знаходиться в стані рівноваги?
46. Напруженість поля між двома горизонтально розміщеними пластинами дорівнює $6 \cdot 10^3$ Н/Кл. У полі цих пластин зависла заряджена пилинка масою $3 \cdot 10^{-8}$ г. Який заряд пилінки?
47. На який кут відхилиться нитка, на якій підвішено бузинуву кульку масою 0,5 г, заряджену електричним зарядом 49 нКл, якщо її розмістити в горизонтально спрямованому електричному полі напруженістю 100 нВ/м?

Рівень С

48. Два точкові заряди q_1 і q_2 знаходяться на відстані d один від одного. На прямій, що проходить через ці заряди, існує точка, у якій напруженість електричного поля дорівнює 0. Де міститься ця точка, якщо $\frac{q_1}{q_2} = n$? Розгляньте випадки: а) $n > 1$; б) $0 < n < 1$; в) $n < 0$.
49. Чотири позитивні точкові заряди по 40 нКл кожний розміщені в вершинах квадрата із стороною 2 м. Якою буде напруженість

- поля на відстані 4 м від центра квадрата на продовженні діагоналі?
50. Тонке кільце радіусом 8 см має заряд, рівномірно розподілений із лінійною густиною 10 нКл/м. Яка напруженість електричного поля в точці, рівновіддаленій від усіх точок кільця на відстань 10 см?
 51. Відстань між двома довгими тонкими дротинами, розташованими паралельно одна одній, дорівнює 16 см. Дротины рівномірно заряджені різнойменними зарядами з лінійною густиною 50 мкКл/м. Яка напруженість поля в точці, віддаленій на 10 см як від першої, так і від другої дротини?
 52. Електричне поле створено двома нескінченними паралельними пластинами, що мають однаковий рівномірно розподілений по площі заряд 1 нКл/м². Визначити напруженість поля: 1) між пластинами; 2) поза пластинами.
 53. Дві прямокутні однакові паралельні пластини, довжина яких 10 см і 15 см, розташовані на малій (у порівнянні з лінійними розмірами пластин) відстані одна від одної. На одній із пластин рівномірно розподілений заряд 50 нКл, на іншій – заряд 150 нКл. Визначити напруженість електричного поля між пластинами.
 54. Дві нескінченні паралельні пластини рівномірно заряджені з поверхневою густиною 10 нКл/м² і -30 нКл/м² відповідно. Визначити силу взаємодії між пластинами, яка діє на площу 1 м².
 55. По тонкій сферичній оболонці радіусом 7 см рівномірно розподілений заряд із поверхневою густиною 100 нКл/м². Визначити напруженість електричного поля на відстанях 10 см, 5 см від центра сфери та на її поверхні.
 56. Електричний заряд 10 пКл рівномірно розподілений по об'єму ебонітової кулі радіусом 5 см. Визначити напруженість електричного поля на відстанях 10 см і 3 см від центра кулі та на її поверхні.
 57. Тонка пряма нитка довжиною 50 см несе на собі заряд 10 нКл. Визначити напруженість поля в точці, яка знаходиться недалеко від середньої частини нитки, на відстані 3 см від неї.

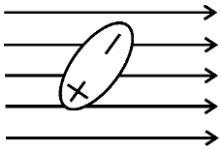
58. Прямий металевий стержень діаметром 5 см і довжиною 4 м несе рівномірно розподілений по поверхні заряд 500 нКл. Визначити напруженість поля в точці, яка знаходиться напроти середини стержня на відстані 1 см від його поверхні.
59. Два довгих плоских проводи, розміщені паралельно на відстані d один від одного, рівномірно заряджені різнойменними зарядами з лінійною густиною $+\sigma_l$ і $-\sigma_l$. Визначити напруженість поля у точці, що знаходиться у площині симетрії на відстані x від проводів.
60. Точковий заряд 50 нКл знаходиться на осі прямого колового циліндра на відстані 5 см від його основи. Знайти число електричних силових ліній, які проходять через його бічну поверхню, якщо висота циліндра 10 см, а радіус основи 5 см.
61. У центрі колового конуса на його осі на відстані $\frac{h}{2}$ від вершини знаходиться точковий заряд 100 нКл. Висота конуса 10 см, радіус основи 5 см. Визначити, на скільки число електричних силових ліній, які проходять через бічну поверхню конуса, менше від загального числа ліній, створених точковим зарядом.
62. У точці, рівновіддаленій від усіх точок кола на відстані 3 см від його площини, знаходиться заряд 7 нКл. Визначити число силових ліній поля, які проходять в середині кола радіусом 5 см.

7.3.3. Провідники та діелектрики в електричному полі

Рівень А

63. Чому провідники, які використовують в електростатичних експериментах, роблять порожнистими?
64. Зарядіть паперову гільзу, підвішену на шовковій нитці. Наблизьте руку до гільзи. Чому вона притягується до руки?
65. Чи однаково притягуються до наелектризованої палички легкі папірці, що лежать на столі і на пластинці парафіну? Перевірити і пояснити.

66. Якщо доторкнутися пальцем до стержня зарядженого електроскопа, то він розрядиться. Чи розрядиться електроскоп, якщо поблизу нього розташувати заряджене тіло?
67. Поставте електрометр на ізолювану підставку. Наелектризуйте його корпус за допомогою натертої скляної чи ебонітової палички. Чи відхилилася стрілка електрометра? Торкніться рукою до стержня електрометра. Чи відхилилася стрілка тепер?



Поясніть.

68. Як переміщатиметься молекула-диполь у зовнішньому однорідному електричному полі (рис. 7.3.4)? Чому?
69. Два електричні заряди взаємодіють у воді (рис. 7.3.4). З якою силою вони будуть взаємодіяти у парафіні?
70. З якою силою взаємодіють у воді іони Na^+ і Cl^- , що знаходяться на відстані 0,1 нм один від одного.
71. Два точкові заряди по 0,1 мкКл розміщено в технічній олії на відстані 1 см один від одного, і вони взаємодіють із силою 0,4 Н. Визначте діелектричну проникність олії.
72. Напруженість однорідного електричного поля у вакуумі $6,6 \cdot 10^7$ В/м; у спирті напруженість того самого поля зменшується до $2 \cdot 10^6$ В/м. Визначити діелектричну проникність спирту.
73. Напруженість поля точкового заряду в деякій точці у вакуумі становить $9 \cdot 10^8$ В/м. Яка напруженість у тій самій точці у воді та гасі?

Рівень В

74. Чи завжди поверхнева густина заряду у провідної кулі в усіх точках однакова?
75. Маємо металеву заряджену кульку на ізолюваній ручці. Як передати електроскопу заряд, що дорівнює заряду кульки?
76. Металева заряджена кулька оточена товстим сферичним шаром діелектрика. Зобразить картину ліній напруженості електричного поля в середині та зовні діелектрика.
77. Заряджений металевий лист скрутили в циліндр. Як зміниться поверхнева густина заряду?

78. Тіло, ковзаючи по похилій площині, наелектризувалося. Чи вплине це на тривалість ковзання і швидкість руху в кінці площини?
79. Чи можна за допомогою електризації через вплив дістати два шматки діелектрика, наелектризованих різнойменно, якщо діелектрик розрізати навпіл?

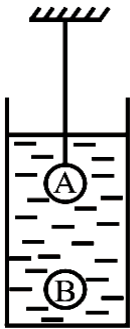


Рис.7.3.5.

80. Дуже маленьку заряджену кульку занурили в гас. На якій відстані від кульки напруженість поля буде така сама, якою вона була до занурення на відстані 29 см?
81. На якій відстані від кульки А (рис. 7.3.5), зануреної в гас, треба розташувати сталюю порошок В об'ємом 9 мм^3 , щоб вона перебувала в рівновазі? Заряд кульки дорівнює 7 нКл , а заряд порошинки – $2,1 \text{ нКл}$.
82. Маленька кулька, що має заряд 10 нКл , знаходиться на відстані 3 см від плоскої металевої заземленої стінки. З якою силою вони взаємодіють?
83. Позитивно заряджена кулька, що має масу $0,18 \text{ г}$ і густину речовини 1800 кг/м^3 , перебуває у завислому стані в рідкому діелектрику, густина якого 900 кг/м^3 . У діелектрику однорідне електричне поле напруженістю 45 кВ/м , спрямоване вертикально вгору. Визначити заряд кульки.

Рівень С

84. Якщо до зарядженого металевого тіла піднести незаряджене металеве тіло, то напруженість електричного кола помітно зміниться. Як і чому змінюється напруженість? Розв'язування поясніть малюнком.
85. Дві маленькі кульки з однойменними зарядами підвісили на шовкових нитках завдовжки L в одній точці. Що станеться з кульками в умовах невагомості?



С

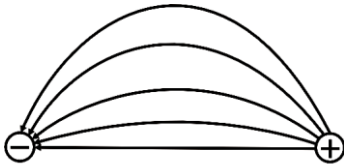


86. У поле позитивного точкового заряду А вносять негативний точковий

- Рис. 7.3.6. заряд В (рис. 7.3.6). Як при цьому зміниться напруженість поля в точці С? Відповідь обґрунтуйте.
87. Позитивно заряджену кулю розмістили біля металеві кулі. Вимірювання показали, що сила електричної взаємодії куль дорівнює 0. Чи заряджена металева куля?
88. Кульку масою 0,1 г, що має заряд 9,8 нКл, підвісили на нитці в однорідному електричному полі, напруженість якого спрямована горизонтально, а її модуль дорівнює $1 \cdot 10^5$ В/м. Визначити кут відхилення нитки від вертикалі.
89. Однакові кульки, підвішені на закріплених в одній точці нитках однакової довжини, зарядили однаковими за модулем однойменними зарядами. Кульки відштовхнулися, і кут між нитками став дорівнювати 60° . Після занурення кульок у рідкий діелектрик кут між нитками зменшився до 50° . Визначте діелектричну проникність середовища. Виштовхувальною силою знехтувати.
90. Дві однакові кулі підвішені в одній точці на нитках однакової довжини. Кулькам надають однакові електричні заряди, і нитки розходяться на деякий кут. Коли опустили кульки у гас, кут між нитками не змінився. Знайдіть густину кульок.
91. Металева куля радіусом 5 см заряджена зарядом 6 нКл і оточена сферичним шаром парафіну завтовшки 5 см. Обчисліть напруженість поля в точках А, В і С, що лежать на відстанях 3 см, 6 см і 12 см від центра кулі. Побудуйте графік залежності напруженості від відстані від центра кулі.
92. Дві вертикально розташовані пластини заряджені так, що напруга між ними дорівнює 400 В. Пластини занурюють у масло. Яка поверхнева густина зв'язаних зарядів, якщо товщина масляного шару 2 мм?

**7.3.4. Робота електричного поля при переміщенні заряду.
Різниця потенціалів. Зв'язок між напругою і напруженістю**

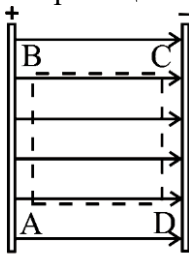
Рівень А



93. Порівняти роботи, затрачені на переміщення заряду q по кожній із ліній напруженості електричного поля (рис. 7.3.7).

Рис. 7.3.7.

94. Електричний заряд $+q$ перемістили по замкнутому контуру ABCDA (рис. 7.3.8). На яких ділянках робота поля, виконана під час переміщення заряду, додатна, від'ємна, дорівнює нулеві?
95. Чому дорівнює робота поля, виконана під час переміщення заряду по всьому контуру? (рис.7.3.8.)

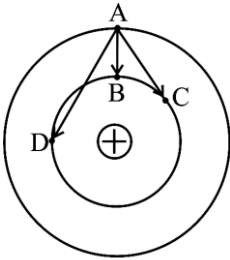


96. Визначити роботу, яку виконує електричне поле при переміщенні негативного заряду $2 \cdot 10^{-2}$ Кл від точки з потенціалом 10 В до точки з потенціалом 20 В.
97. При переміщенні електричного заряду між точками з різницею потенціалів 80 В сили електричного поля здійснили роботу 4 Дж. Яка величина заряду?
98. Яку роботу виконує поле під час переміщення заряду 20 нКл з точки, потенціал якої 700 В, у точку з потенціалом 200 В?

Рис.7.3.8.

99. Яка напруга між точками поля, якщо при переміщенні заряду 25 мкКл між цими точками електричне поле виконало роботу 5 мДж?
100. Яку роботу треба виконати, щоб перемістити заряд $5 \cdot 10^{-8}$ Кл між двома точками електричного поля з різницею потенціалів 1600 В?

101. Напряга між двома точками, що лежать на одній лінії напруженості однорідного електричного поля, дорівнює 2 кВ. Відстань між цими точками 10 см. Яка напруженість поля?

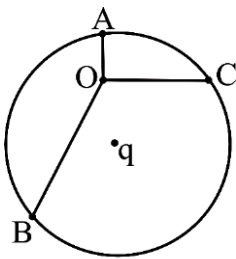


102. Визначити напругу між двома точками поля, напруженість якого 12 кВ/м. Відстань між точками 5 см.
103. Яка відстань між точками, якщо напруга між ними дорівнює 250 В, а напруженість поля 0,5 кВ/м?

Рис.7.3.9.

Рівень В

104. Порівняти роботи, виконані полем під час переміщення заряду з точки А в точки В, С і D (рис. 7.3.9).
105. Один і той же заряд по чергово переміщували в полі позитивного заряду з точки О в А, з О в В, з О в С (рис. 113). Порівняйте роботи.
106. В однорідному полі з напруженістю 60 кВ/м перемістили позитивний заряд 10 нКл. Яку роботу виконало електричне поле, якщо вектор переміщення дорівнює за модулем 4 см і утворює з напрямком ліній напруженості кут 60° , 120° ?

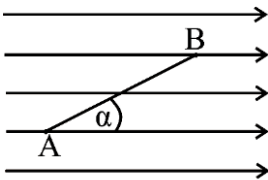


107. Точка А (рис.7.3.10) лежить на лінії напруженості однорідного поля, напруженість якого 60 кВ/м. Визначити різницю потенціалів між цією точкою і деякою точкою В, розміщеною на відстані 10 см від точки А. Розглянути випадки, коли точки А і В лежать: а) на одній лінії напруженості; б) на прямій, перпендикулярній до лінії напруженості; в) на прямій, спрямованій під кутом 45° до ліній напруженості.

Рис.7.3.10.

108. Точковий заряд розташували між пластинами плоского конденсатора. Різниця потенціалів між пластинами 20 В. Яка величина заряду, якщо на нього діє сила 10 Н і відстань між пластинами 5 см?

109. Електрон рухається в однорідному електричному полі вздовж ліній напруженості поля; модуль напруженості дорівнює 120 В/м. Яку відстань пролетить електрон до повної втрати швидкості, якщо його початкова швидкість 1 Мм/с? За який час буде пройдено цю відстань?
110. Електрон із кінетичною енергією 10 еВ влітає в однорідне електричне поле в напрямі ліній напруженості і проходить у цьому напрямі різницю потенціалів 8 В. Яку швидкість і кінетичну енергію (в еВ) матиме електрон у кінці шляху?
111. Між двома вертикальними пластинами, що знаходяться на відстані 2 см, висить на нитці заряджена непровідна кулька масою 0,1 г. Після того, як на пластини подали напругу 10^3 В, нитка з кулькою відхилилася на кут 5^0 . Визначити заряд кульки.
112. Два електрони рухаються під дією сил електростатичного відштовхування. Яку найбільшу швидкість будуть мати електрони на великій відстані один від одного, якщо в початковий момент вони знаходилися у спокої на відстані 10 см один від одного?



113. Визначити напругу між точками А і В (рис. 7.3.11), якщо $|AB| = 8$ см, а $\alpha = 30^0$ і напруженість поля становить 50 кВ/м.
Рис.7.3.11.

114. На скільки зміниться кінетична енергія заряду 1 нКл під час його руху в полі точкового заряду 1 мкКл з точки, віддаленої на 3 см від цього заряду, в точку, що лежить на відстані 10 см від нього? Початкова швидкість заряду дорівнює нулю.

Рівень С

115. Обґрунтуйте, чи може існувати електричне поле, силові лінії якого паралельні і густина яких різна в кожній точці поля.
116. Чому дорівнює потенціал φ електричного поля в центрі рівномірно зарядженого (заряд дорівнює q) кільця радіуса R ?

117. Два точкові однойменні заряди $2 \cdot 10^{-7}$ Кл і $3 \cdot 10^{-7}$ Кл розташовані на деякій відстані у вакуумі. Щоб зменшити відстань між ними на 30 см, треба виконати роботу 10^{-2} Дж. Визначити початкову відстань між зарядами.
118. Точкові заряди $-1,7 \cdot 10^{-8}$ Кл і $2 \cdot 10^{-8}$ Кл розташовані від точкового заряду $3 \cdot 10^{-8}$ Кл на відстанях 2 см і 5 см відповідно. Яку роботу треба виконати, щоб поміняти місцями перші два заряди?
119. Протон, що летить у напрямі до двічі іонізованого ядра атома гелію, в деякій точці поля з напруженістю 1 МВ/м має швидкість 1 км/с. На яку найменшу відстань зможе протон наблизитися до ядра?
120. Знайдіть максимальну швидкість електрона, який починає рух із центра тонкого кільця радіусом 17,6 см, рівномірно зарядженого зарядом -2 нКл.
121. Маленьку кульку, маса якої 1 г і заряд 0,15 мкКл, кинута з далекої віддалі зі швидкістю 1 м/с у сферу, заряджену зарядом 0,3 мкКл. За якого найменшого значення радіуса сфери кулька досягне її поверхні?
122. Металеву кулю радіусом 1 см заряджено до потенціалу 500 В і оточено концентричною незарядженою металевою сферою. Після заземлення сфери потенціал кулі зменшився до 300 В. Знайдіть радіус сфери.
123. Яка робота виконується при перенесенні точкового заряду 20 нКл із нескінченності в точку, яка знаходиться на відстані 1 см від поверхні кулі радіусом 1 см із поверхневою густиною заряду 10 мкКл/м²?
124. На відстані 4 см від нескінченно довгої зарядженої нитки знаходиться точковий заряд 0,66 нКл. Під дією поля заряд наближається до нитки на відстань 2 см; при цьому виконується робота $5 \cdot 10^{-6}$ Дж. Знайти лінійну густина заряду на нитці.

7.3.5. Електроємність конденсатора. Енергія зарядженого конденсатора. Енергія електричного поля

Рівень А

125. Ємність конденсатора дорівнює 40 пФ. Виразити цю ємність у фарадах та мікрофарадах.
126. Відокремленому провідникові надали заряду $1 \cdot 10^{-9}$ Кл, зарядивши його до потенціалу 100 В. Визначити електроємність провідника у фарадах, мікрофарадах і пікофарадах.
127. На конденсаторі написано: 100 пФ; 300 В. Чи можна використати цей конденсатор для нагромадження заряду 50 нКл?
128. Яку ємність має конденсатор, якщо під час його заряджання до напруги 1,4 кВ він дістав заряд 28 нКл?
129. До якої напруги зарядили конденсатор ємністю 20 мкФ, якщо він дістав заряд 4 мКл?
130. Найбільша ємність шкільної демонстраційної батареї конденсаторів 58 мкФ. Який заряд вона нагромадить, якщо її приєднати до полюсів джерела струму з напругою 50 В?
131. Що станеться з електроємністю плоского повітряного конденсатора, якщо між його пластинами вставити скло?
132. Як зміниться електроємність шкільного розсувного конденсатора, якщо збільшити відстань між його пластинами?
133. Площа пластин слюдяного конденсатора 15 см^2 , а відстань між пластинами 0,02 см. Яку ємність має конденсатор?
134. Пластини конденсатора мають площу по 10 см^2 . Яка товщина діелектрика (слюди) між ними, коли ємність конденсатора становить 500 пФ?
135. Визначити енергію конденсатора, якщо його ємність 0,25 мкФ, а різниця потенціалів між пластинами 400 В. Який заряд має конденсатор?
136. Ємність конденсатора 6 мкФ, а заряд $3 \cdot 10^{-4}$ Кл. Визначити енергію електричного поля конденсатора.

137. Заряд конденсатора $3,2 \cdot 10^{-3}$ Кл, напруга на обкладках 500 В. Визначити енергію електричного поля конденсатора.

Рівень В

138. Наблизьте палець до кульки зарядженого електроскопа. Листочки зійдуться. Заберіть палець – і листочки знову розійдуться. Як пояснити це явище?
139. Визначити електроємність відокремленої металевої кулі, що має радіус 10 см, коли вона розташована: 1) у вакуумі; 2) у воді.
140. Чи можна земну кулю розглядати як відокремлений провідник? Визначити її електроємність.
141. Перший ШСЗ мав форму кулі радіусом 29 см. Під час польоту супутник електризувався відносно Землі до потенціалу 6 В. Визначити електричний заряд на поверхні супутника.
142. Електрична іскра у повітрі виникає при напруженості 3 МВ/м. При якій напрузі виникне іскра в повітряному конденсаторі, в якому відстань між пластинами дорівнює 2 мм?
143. Конденсатор невідомої ємності C зарядили до напруги 100 В. Потім його з'єднали паралельно із незарядженим конденсатором ємністю 5 мкФ. При цьому напруга на першому конденсаторі зменшилася на 25 В. Визначте ємність C .
144. З якою силою взаємодіють пластини плоского конденсатора площею 100 см^2 , якщо різниця потенціалів між ними 500 В і відстань 3 мм?
145. Плоский конденсатор, відстань між пластинами якого 1 см, заряджено до напруги 20 В. Якою буде напруга на конденсаторі, якщо його пластини розсунути до 10 см?
146. Визначте заряд плоского конденсатора ємністю 0,04 мкФ, якщо напруженість поля в конденсаторі 320 В/см, а відстань між пластинами 2 мм.
147. В імпульсному фотоспалаху лампа живиться від конденсатора ємністю 800 мкФ, зарядженого до напруги

- 300 В. Визначити енергію спалаху і середню потужність, якщо тривалість розрядження становить 2,4 мс.
148. У скільки разів зміниться енергія конденсатора, якщо напругу на ньому збільшити в 4 рази?
149. Площа кожної з пластин плоского конденсатора становить 200 см^2 , а відстань між ними дорівнює 1 см. Визначити енергію поля, якщо напруженість 500 кВ/м .

Рівень С

150. Як зміниться ємність плоского конденсатора, якщо між його пластинами вмістити провідну пластинку, товщиною якої можна знехтувати? Як буде впливати на ємність конденсатора місце розташування введеної пластинки? Чи буде впливати на зміну ємності товщина введеної пластинки?
151. Пластини плоского повітряного конденсатора площею S притягуються із силою F . Визначте заряд конденсатора.
152. Плоский повітряний конденсатор із площею пластин S і відстанню між пластинами d заряджено до напруги U , після чого від'єднано від джерела. Яку роботу треба виконати, щоб розсунути пластини до відстані d_1 ?
153. Різниця потенціалів між пластинами плоского конденсатора дорівнює 400 В , відстань між пластинами дорівнює 4 мм . Конденсатор від'єднали від джерела напруги. Якою стане різниця потенціалів між пластинами, якщо зблизити їх до 3 мм , а простір між ними заповнити парафіном із діелектричною проникністю, що дорівнює 2?
154. Плоский конденсатор, між обкладками якого знаходиться слюдяна пластинка, під'єднаний до акумулятора. Заряд конденсатора дорівнює 14 мкКл . Який заряд пройде через акумулятор, якщо з конденсатора витягнути слюдяну пластинку?
155. Конденсатор ємністю 20 мкФ , заряджений до напруги 10 кВ , розряджають через спіраль, занурену у склянку з водою масою 200 г . Нехтуючи теплоємністю склянки, знайдіть, на скільки підвищиться температура води.

156. Після з'єднання зарядженого повітряного конденсатора з таким самим незарядженим, але заповненим діелектриком, напруга на ньому зменшилась у 8 разів. Знайдіть діелектричну проникність діелектрика.
157. Між пластинами плоского конденсатора при напрузі 3 кВ знаходиться в рівновазі позитивно заряджена пилинка масою 5 нг. Відстань між пластинами 5 см. Внаслідок опромінення пилінка втрачає 100 електронів. Як і на скільки треба змінити напругу на конденсаторі, щоб пилінка залишилась у рівновазі?
158. У плоский конденсатор із пластинами завдовжки 5 см і відстанню між ними 1 см під кутом 15° до пластин влітає електрон, енергія якого 15 кеВ. Знайдіть напругу на обкладках, при якій електрон вилітає із конденсатора паралельно пластинкам.
159. Електрон, що летів горизонтально із швидкістю 1,6 Мм/с, влетів в однорідне електричне поле плоского конденсатора з напруженістю 91 В/см, спрямованою вертикально вгору. Визначте модуль і напрям швидкості електрона через 1 нс.
160. Плоский конденсатор, наполовину заповнений воском, зарядили до деякої різниці потенціалів. Знайдіть розподіл енергії у повітряній щілині і воску.

7.4. Задачі з теми "Закони постійного струму"

7.4.1. Струм у провіднику. Закон Ома для ділянки кола з послідовним і паралельним з'єднанням провідників

Рівень А

161. Чому спіраль електричної лампочки нагрівається, а провідники, що проводять струм до неї, у цей час залишаються холодними?
162. Яке призначення плавких запобіжників?
163. Чому провідник чинить опір струму?
164. Яка сила струму в електричній лампочці, якщо через її спіраль за 5 хв проходить заряд 135 Кл?

165. Який опір мідного трамвайного дроту завдовжки 5 км, якщо площа поперечного перерізу 65 мм^2 ?
166. За який час в електричному колі проходить заряд 12 Кл при силі струму в колі 100 мА?

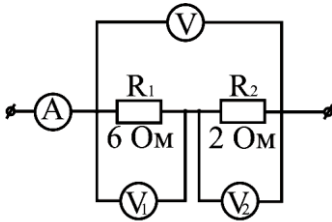


Рис.7.4.1.

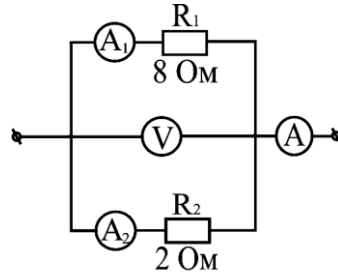


Рис.7.4.2.

167. Який опір сталюї дротини телеграфної лінії завдовжки 2 км із площею перерізу 10 мм^2 , якщо питомий опір сталі $1 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$?
168. У схемі (рис. 7.4.1.) амперметр показує 0,5 А. Які покази вольтметрів?
169. Які покази вольтметра V і амперметрів A_2 і A, якщо амперметр A_1 показує 0,5 А (рис. 7.4.2.)?
170. Вольтметр V_1 показує напругу 6 В. Які покази амперметра і вольтметрів V_2 і V (рис. 7.4.3.)?

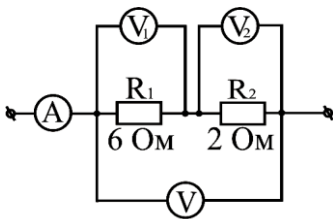


Рис.7.4.3.

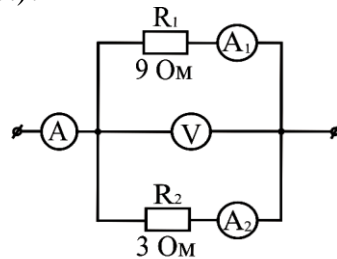


Рис.7.4.4.

171. Вольтметр показує 0,9 В. Які покази амперметрів (рис.7.4.4.)?
172. За графіком залежності сили струму в реостаті від його опору визначте напругу на реостаті (рис. 7.4.5.).
173. За графіком залежності сили струму в провіднику від напруги обчисліть опір провідника (рис. 7.4.6.).

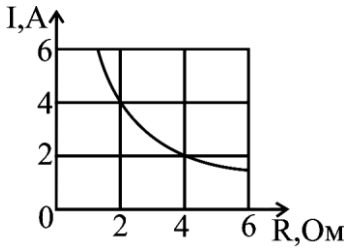


Рис. 7.4.5.

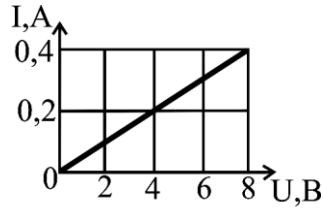


Рис.7.4.6.

Рівень В

174. У коло ввімкнено електроплитку і амперметр. Чи зміняться покази амперметра, якщо подути на розпечену плитку холодним повітрям?
175. Яка основна вимога до опору вольтметра? Чи можна вольтметром виміряти силу струму?
176. Мідний та залізний провідники однакової довжини і перерізу з'єднані і ввімкнені у коло. Чи відрізняються напруги на провідниках у випадку їх послідовного і паралельного увімкнення?
177. Яка довжина мідної дротини перерізом $0,5 \text{ мм}^2$, якщо за 1 хв по ній проходить заряд 60 Кл при напрузі 34 В?
178. Унаслідок обробки провідника методом волочіння його довжина збільшилась у 5 разів, а площа поперечного перерізу у стільки ж разів зменшилась. У скільки разів змінився опір провідника?
179. До мережі з напругою 24 В під'єднали два послідовно з'єднаних резистори. При цьому сила струму стала дорівнювати 0,6 А. Коли резистори з'єднали паралельно, сумарна сила струму дорівнювала 3,2 А. Визначте опір резисторів.
180. Два провідники під'єднують до джерела постійної напруги спочатку послідовно, а потім паралельно. Опір одного з провідників у n разів більший від іншого. Як змінюється сила струму в колі?

181. Загальний опір двох послідовно з'єднаних провідників 5 Ом, а паралельно з'єднаних – 1,2 Ом. Знайдіть опір провідників.
182. Еквівалентний опір трьох паралельно з'єднаних споживачів 300 Ом, а їхні опори відносяться як 1:3:5. Визначте опір кожного із споживачів.
183. Амперметр із внутрішнім опором 0,72 Ом розраховано на силу струму 0,5 А. Який максимальний струм можна буде виміряти амперметром, якщо паралельно до нього під'єднати шунт опором 0,08 Ом?
184. Який додатковий опір необхідно під'єднати до вольтметра, який має опір 1500 Ом, щоб ціна поділки на шкалі збільшилась у п'ять разів?

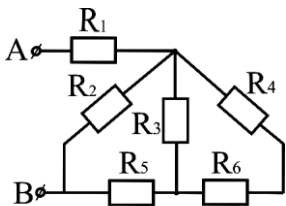


Рис.7.4.7.

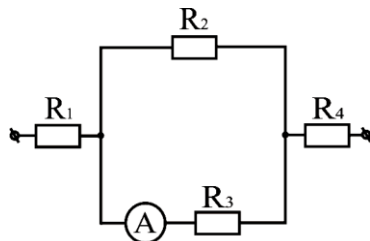


Рис.7.4.8.

185. Знайдіть силу струму в кожному з резисторів (рис. 7.4.7.), якщо напруга між точками А і В дорівнює 12 В. $R_1=R_2=8$ Ом; $R_3=10$ Ом; $R_4=6$ Ом; $R_5=3$ Ом; $R_6=6$ Ом.
186. Знайти розподіл струмів і напруг між опорами (рис. 7.4.8.), якщо амперметр показує 2 А, $R_1=20$ Ом, $R_2=10$ Ом; $R_3=15$ Ом; $R_4=4$ Ом.
187. Знайти розподіл струмів і напруг між опорами (рис. 7.4.9.), якщо $R_1=5$ Ом, $R_2=12$ Ом, $R_3=3$ Ом, а вольтметр показує 20 В.
188. Знайти розподіл струмів і напруг між опорами (рис. 7.4.10), якщо амперметр показує 5 А, $R_1=2$ Ом, $R_2=10$ Ом, $R_3=15$ Ом, $R_4=4$ Ом.

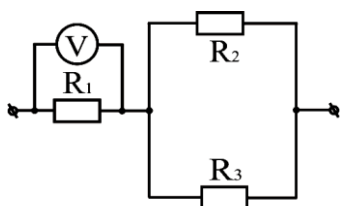


Рис.7.4.9.

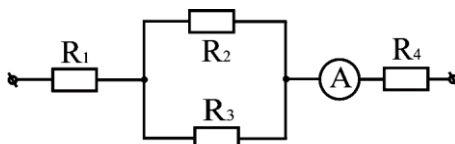


Рис.7.4.10.

Рівень С

189. Листок фольги, вкритий радіоактивною речовиною, випромінює з одиниці площі N електронів за секунду. Швидкість електронів v , усі напрями швидкості однаково ймовірні. Визначте густину струму. Чому вона не залежить від швидкості електронів?
190. Визначте напругу, підведену до реостата, якщо його обмотка складається з 150 витків нікелінового дроту, радіус витка якого 2 см, довжина намотаної частини циліндра 15 см, і через реостат тече струм 0,5 А. Витки розміщено впритул один до одного.
191. Паралельно до амперметра з внутрішнім опором 0,02 Ом під'єднано мідний дріт завдовжки 20 см і перерізом 3,4 мм². Визначте силу струму в колі, якщо амперметр показує 0,3 А.
192. Гальванометр із ціною поділки 1 мкА/под і числом поділок 100 має внутрішній опір 50 Ом. Як застосувати цей гальванометр для вимірювання струмів до 10 мА або напруг до 1 В?

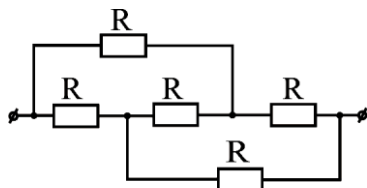


Рис.7.4.11.

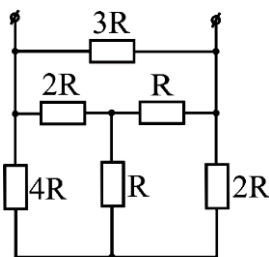
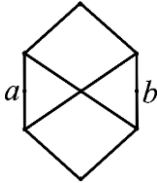


Рис.7.4.12.

193. Визначте опір ділянок кіл, показаний на рисунках 7.4.11. і 7.4.12.

194. Міліамперметр зі шкалою на 20 мА необхідно використати як амперметр для вимірювання струмів до 5 А. Розрахуйте опір шунта, якщо внутрішній опір міліамперметра 8 Ом. Як при цьому зміниться чутливість амперметра?

195. Яка швидкість упорядкованого руху електронів у мідному провіднику при силі струму 1 А, якщо площа поперечного перерізу провідника 1 мм^2 , а концентрація електронів у ньому $8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$?



196. Визначте опір однорідного дротового каркасу у формі правильного шестикутника з двома діагоналями, Рис.7.4.13. з'єднаними у центрі (рис. 7.4.13). Опір кожної сторони шестикутника вважати таким, що дорівнює r .

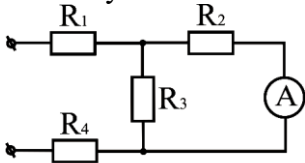


Рис.7.4.14.

198. Знайти розподіл струмів і напруг на резисторах $R_1 - R_6$ (рис. 7.4.15), якщо $R_1=R_2=R_5=R_6=1 \text{ Ом}$, $R_3=10 \text{ Ом}$, $R_4=8 \text{ Ом}$, $U=28 \text{ В}$.

199. Знайти напругу на ділянці кола (рис. 7.4.14), якщо амперметр показує 16 А, $R_1=3 \text{ Ом}$, $R_2=6 \text{ Ом}$, $R_3=3 \text{ Ом}$, $R_4=5 \text{ Ом}$, $R_5=10 \text{ Ом}$; $R_6=30 \text{ Ом}$.

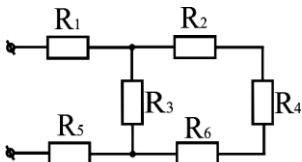


Рис.7.4.15.

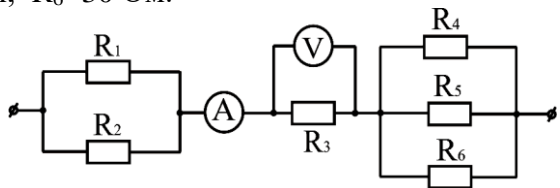


Рис.7.4.16.

200. Знайти розподіл струмів між опорами (рис. 7.4.16), якщо вольтметр показує 75,5 В, $R_1=3 \text{ Ом}$, $R_2=2 \text{ Ом}$; $R_3=7,55 \text{ Ом}$; $R_4=2 \text{ Ом}$; $R_5=5 \text{ Ом}$; $R_6=10 \text{ Ом}$.

7.4.2. ЕРС. Закон Ома для повного кола

Рівень А

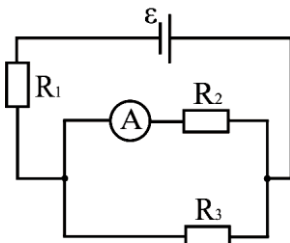
201. Чому сили переміщення зарядів у джерелі струму називаються сторонніми? Наведіть приклади сторонніх сил.
202. Що таке „струм короткого замикання”?
203. Якщо лампочку живити від елемента, що має ЕРС 1,5 В, то робота сторонніх сил в елементі дорівнює 18 Дж. Визначте заряд, що пройде за цей час через лампочку?
204. Гальванічний елемент із ЕРС 5 В і внутрішнім опором 1 Ом замкнено на провідник опором 14 Ом. Яка напруга на провіднику?
205. Яка величина зовнішнього опору, якщо генератор із ЕРС 230 В і внутрішнім опором 0,1 Ом подає у зовнішню частину кола напругу 220 В?
206. ЕРС джерела 100 В. При зовнішньому опорі 49 Ом сила струму в колі дорівнює 2 А. Визначити внутрішній опір джерела і спад напруги на ньому.
207. Визначити напругу на затискачах джерела струму, що має ЕРС 2 В і внутрішній опір 0,5 Ом, до і після підключення до нього зовнішнього опору 4,5 Ом.
208. Який внутрішній опір елемента, якщо його ЕРС дорівнює 1,2 В і при зовнішньому опорі 5 Ом струм дорівнює 0,2 А?

Рівень В

209. Значення ЕРС джерела струму часто визначають за показами вольтметра, під'єданого до затискачів джерела. Чи точно значення ЕРС дає цей найпростіший метод її оцінки? Що показує вольтметр, під'єднаний до затискачів джерела?
210. На батарейці кишенькового ліхтаря надпис: ЕРС 4,5 В, а на лампі вказано напругу 3,5 В. Чим пояснити таку різницю?
211. Батарея з трьох послідовно з'єднаних елементів із ЕРС 1,5 В і внутрішнім опором 0,5 Ом кожний замкнена на два

паралельно з'єднані опори 4 Ом і 12 Ом. Визначити напругу на розгалуженні.

212. Батарейка для кишенькового ліхтарика замкнута на реостат. При опорі реостата 1,65 Ом напруга на ньому дорівнює 3,3 В, а при опорі 3,5 Ом – 3,5 В. Визначити ЕРС і внутрішній опір батарейки.
213. Знайти ЕРС і внутрішній опір гальванічного елемента, якщо при зовнішньому опорі 2 Ом сила струму в колі 0,6 А, а при опорі 1 Ом – 1 А.
214. Від генератора, що має ЕРС 40 В і внутрішній опір 0,04 Ом, струм надходить по мідному кабелю, переріз якого 170 мм², до місця електрозварювання, віддаленого від генератора на 50 м. Визначити напругу на затискачах генератора і на зварювальному апараті, якщо сила струму в колі становить 200 А.



215. Яка напруга на полюсах джерела струму з ЕРС, що дорівнює 1 В, якщо опір зовнішньої частини електричного кола дорівнює внутрішньому опорі джерела?

216. Джерело постійного струму з ЕРС 5,6 В увімкнено в коло, де $R_1=1,8$ Ом; $R_2=2$ Ом;

$R_3=3$ Ом (рис.7.4.17). Амперметр показує 0,96 А. Визначити внутрішній опір джерела.

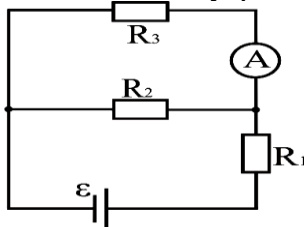


Рис.7.4.18.

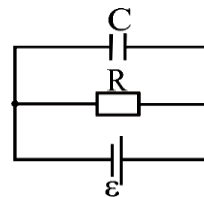
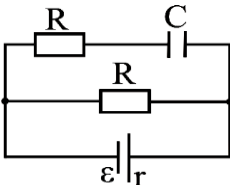


Рис.7.4.19.

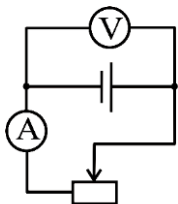
217. В електричному колі опори $R_1=2$ Ом; $R_2=4$ Ом; $R_3=6$ Ом. ЕРС джерела 10 В, а внутрішній опір 0,6 Ом (рис. 7.4.18.). Яку силу



струму покаже амперметр? Його опором знехтувати.

218. У плоскому конденсаторі в схемі, зображеній на рис. 7.4.19, Рис.7.4.19. напруженість електричного поля $9 \cdot 10^3$ В/м. Яка відстань між пластинами конденсатора, якщо внутрішній опір джерела 1 Ом, опір $R=9$ Ом і ЕРС джерела 50 В?

219. На схемі, рис.7.4.20, $R=8$ Ом, Визначте на пластинах повітряного конденсатора C , якщо відстань між пластинами 0,1 см, а площа пластини 10 см².



- зображений на $r=2$ Ом, $\epsilon=2$ В. найбільший заряд плоского конденсатора C , Рис.7.4.20.

Рівень С

220. У вашому розпорядженні батарея акумуляторів із ЕРС, що дорівнює ϵ , вольтметр і великий набір резисторів найрізноманітніших опорів R_1 . Як за допомогою цього обладнання визначити внутрішній опір r батареї? Перевірити спосіб на досліді.
221. Сила струму однакова при послідовному і паралельному з'єднанні трьох однакових гальванічних елементів, що живлять його із зовнішнім опором R . Яким повинен бути внутрішній опір кожного елемента, щоб це було можливо?
222. Для визначення ЕРС і внутрішнього опору джерела струму склали коло за схемою (рис. 7.4.21.). При деякому положенні повзунка реостата амперметр показав 0,5 А, а вольтметр 4 В. Коли повзунок перемістили ліворуч, то амперметр показав 0,9 А, а вольтметр 3,6 В. Обчисліть ЕРС і внутрішній опір джерела.
223. Акумулятор під'єднаний для зарядження у коло з напругою 12,5 В. Внутрішній опір акумулятора 1 Ом. Яка ЕРС акумулятора, якщо при зарядженні через нього проходить струм силою 0,5 А?
224. Визначте, який заряд протікає через опір R_2 (рис. 7.4.22) після розмикання ключа, якщо опори усіх резисторів

однакові і складають 20 Ом, ЕРС джерела 100 В, його внутрішній опір 10 Ом, ємність конденсатора 10 мкФ.

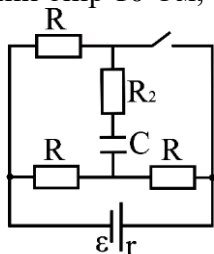


Рис.7.4.22.

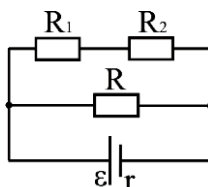


Рис.7.4.23.

225. У схемі, зображеній на рис. 7.4.23, значення опорів і ЕРС батареї невідомі. Вольтметр із невідомим внутрішнім опором під'єднують спочатку до опору R_1 , потім до R_2 і, нарешті, до R . При цьому вольтметр дає покази 4 В, 6 В, 12 В. Нехтуючи внутрішнім опором батареї, визначити спад напруги R_1 і R_2 при вимкненому вольтметрі.
226. Дано 12 елементів із ЕРС 1,5 В і внутрішнім опором 0,4 Ом. Як потрібно з'єднати ці елементи, щоб отримати від зібраної з них батареї найбільшу силу струму у зовнішньому колі, що має опір 0,3 Ом? Визначити максимальну силу струму.

7.4.3. Правила Кірхгофа. Розрахунок розгалужених електричних кіл

Рівень А

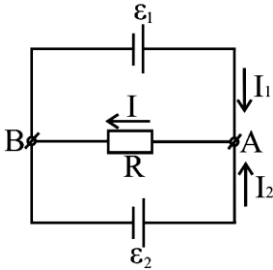


Рис.7.4.24.

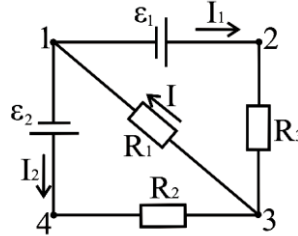


Рис..7.4.25.

227. У схему (рис. 7.4.24) ввімкнено два елементи з ЕРС $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 2$ В, внутрішніми опорами $r_1 = 10$ Ом, $r_2 = 2$ Ом. Чому дорівнює опір R , якщо $I_1 = 1$ А? Знайти значення I та I_2 .

228. У схемі (рис. 7.4.25) $\varepsilon_1 = 2$ В, $\varepsilon_2 = 2,4$ В, $R_1 = 50$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 15$ Ом. Знайти силу струму для кожної ділянки кола. Опором джерел струму знехтувати.

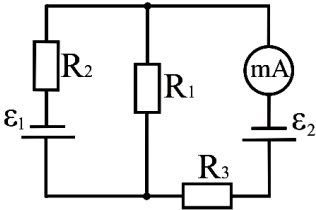


Рис.7.4.26.

229. Яку силу струму показує міліамперметр (рис. 7.4.26), якщо $\varepsilon_1 = 1$ В, $\varepsilon_2 = 2$ В, $R_3 = 1,5$ кОм, $R_1 = 500$ Ом і спад потенціалу на резисторі R_2 $U = 1$ В? Внутрішнім опором елементів можна знехтувати.

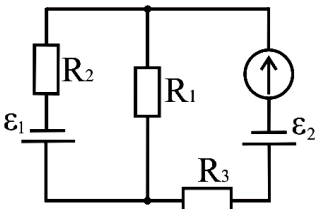


Рис.7.4.27.

230. Визначити силу струму через гальванометр, який ввімкнено в електричне коло (рис. 7.4.27), якщо $\varepsilon_1 = 2$ В,

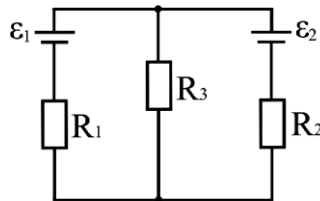


Рис.7.4.28.

$\varepsilon_2=1$ В, $R_1=1$ кОм, $R_2=0,5$ кОм, $R_3=R_q=200$ Ом. Внутрішнім опором елементів знехтувати.

231. Знайти сили струмів в усіх ділянках кола (рис. 7.4.28.), якщо $\varepsilon_1=22$ В, $\varepsilon_2=18$ В, $R_2=R_3=2$ Ом. Внутрішнім опором елементів можна знехтувати.

Рівень В

232. Два паралельно з'єднаних елементи з однаковими ЕРС $\varepsilon_1=\varepsilon_2=2$ В і внутрішніми опорами $r_1=1$ Ом і $r_2=1,5$ Ом замкнуті на зовнішній опір $R=1,4$ Ом (рис. 7.4.29.). Знайти струм у кожному з елементів і у всьому колі .

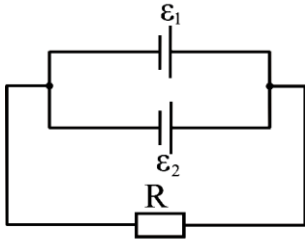


Рис.7.4.29.

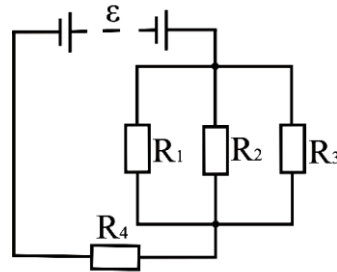


Рис.7.4.30.

233. ЕРС батареї $\varepsilon=100$ В, опори $R_1=R_3=40$ Ом, $R_2=80$ Ом і $R_4=80$ Ом (рис. 7.4.30) Знайти струм I_2 , який проходить через опір R_2 і падіння потенціалу U_2 на ньому.

234. ЕРС батареї $\varepsilon=120$ В, опори $R_3=20$ Ом і $R_4=25$ Ом (рис. 7.4.31.). Падіння потенціалу на опорі R_1 дорівнює $U_1=40$ В. Амперметр показує струм $I=2$ А. Знайти опір R_2 .

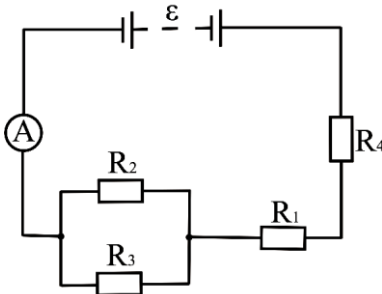


Рис.7.4.31.

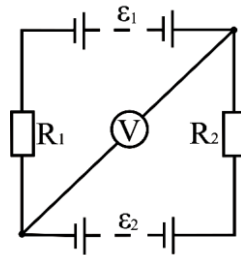
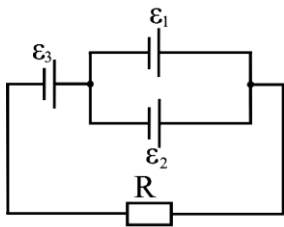


Рис.7.4.32.

235. У схемі (рис. 7.4.32.) $\varepsilon_1=\varepsilon_2$, $R_1=R_2=100$ Ом. Вольтметр показує 150 В, опір вольтметра 150 Ом. Знайти ЕРС батареї. Внутрішнім опором елементів знехтувати.



236. Три гальванічні елементи з $\varepsilon_1=1,3$ В, $\varepsilon_2=1,5$ В, $\varepsilon_3=2$ В з внутрішніми опорами $r_1=r_2=r_3=0,2$ Ом увімкнені, як позначено на рис. 7.4.33. Опір $R=0,55$ Ом. Визначити сили струмів в елементах.

Рис. 7.4.33.

Рівень С

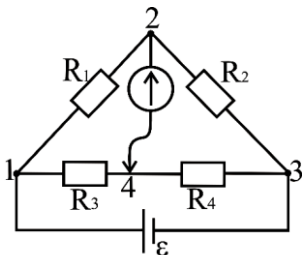


Рис.7.4.34.

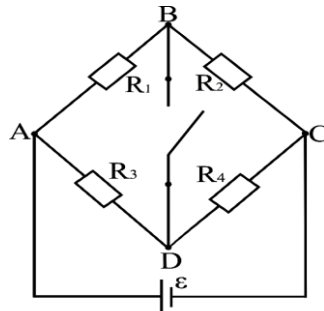


Рис.7.4.35.

237. Знайти сили струмів в окремих гілках містка Уїтстона (рис. 7.4.34.) за умови, що місток збалансований, тобто сила струму, що проходить через гальванометр, дорівнює нулю. ЕРС батареї $\varepsilon=6$ В, $R_1=45$ Ом, $R_2=75$ Ом, $R_3=300$ Ом. Внутрішній опір батареї – 3 Ом.
238. Знайти силу струму в колі (рис. 7.4.35), силу струму в окремих ділянках і еквівалентний опір при розімкненому та замкненому ключі S, якщо $R_1=R_2=10$ Ом, $R_3=3$ Ом, $R_4=6$ Ом, $\varepsilon=18$ В. Внутрішнім опором джерела струму знехтувати.

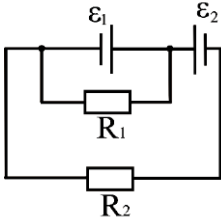


Рис.7.4.36.

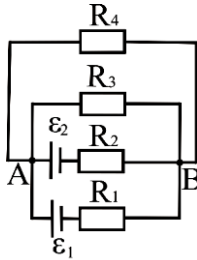


Рис.7.4.37.

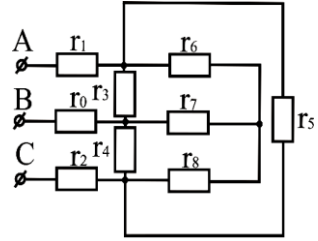


Рис.7.4.38.

239. У схемі (рис. 7.4.36) два елементи мають однакові ЕРС і однакові внутрішні опори. Опір $R_2=1$ Ом, падіння потенціалу на клеммах першого елемента $U_1=2$ В, а на клеммах іншого – $U_2=4$ В. Падіння потенціалу на резисторі R_2 дорівнює падінню потенціалу на другому елементі. Знайти ЕРС і внутрішній опір елементів.
240. Знайти розподіл сил струмів у колі (рис. 7.4.37), якщо $\varepsilon_1=4$ В, $\varepsilon_2=2$ В, $R_1=R_2=10$ Ом, $R_3=R_4=2$ Ом. Внутрішнім опором джерела струму знехтувати.
241. Визначити струми в проводах трипровідної лінії (рис. 7.4.38.), якщо $U_{AB}=U_{BC}=220$ В, $r_0=0,5$ Ом, $r_1=r_2=r_7=10$ Ом, $r_3=r_4=4$ Ом, $r_5=8$ Ом, $r_6=r_8=2$ Ом.

7.4.4. Робота й потужність постійного струму

Рівень А

242. На електричній плитці з відкритою спіраллю нагрівається чайник. Під час кипіння частину спіралі залило водою. Як змінилося розжарення незалитої частини спіралі?
243. Чому нитка електролампочки дуже розжарюється, а дроти, що підводять струм, залишаються холодними, хоча через лампу і дроти проходить однаковий струм?
244. Провідником із опором 1,5 Ом протягом 4 с проходить заряд 12 Кл. Яку роботу виконує електричний струм, що проходить провідником?
245. В обмотці електродвигуна (опір якої 0,75 Ом) сила струму 20 А. Яка кількість теплоти виділяється цією обмоткою за 1 хв роботи двигуна?

246. У школі одночасно горить 40 ламп по 60 Вт, 20 ламп по 100 Вт і 11 ламп по 40 Вт. Визначити силу струму в шкільній частині кола для напруги 220 В.
247. Під час переміщення 20 Кл електрики по провіднику опором 0,5 Ом виконано роботу 100 Дж. Знайдіть час, протягом якого проходив струм.
248. Яку потужність споживає електрична лампочка, увімкнена в мережу з напругою 220 В, якщо опір її нитки в розжареному стані 484 Ом?
249. Електродвигун швейної машини розвиває потужність 40 Вт. Який струм проходить через двигун, якщо він працює при напрузі 127 В? Скільки енергії використано двигуном протягом 1,5 год?

Рівень В

250. Спираль електричної плитки перегоріла і після з'єднання кінців дроту стала дещо коротшою. Як змінилася кількість теплоти, що виділяється плитою за певний час? Відповідь обґрунтуйте.
251. Електричний нагрівник має дві однакові обмотки, які можна вмикати в коло окремо і разом. Як слід з'єднати обмотки, щоб нагрівання відбувалося швидше?
252. Як зміниться кількість теплоти, яка виділяється в електрочайнику, якщо опір його спіралі зменшити вдвічі, а силу струму вдвічі збільшити?
253. Проекційна машина горить під напругою 210 В і споживає потужність 0,5 кВт. Яка кількість теплоти виділяється у підвідних дротах за 10 хв роботи лампи, якщо відстань від лампи до електролінії 100 м і проводка зроблена мідним дротом перерізом 2 мм^2 ?
254. Дві лампи опорами 180 Ом і 360 Ом підключили паралельно у коло з напругою 120. Яка потужність виділяється на кожній із лампочок? Яка буде виділятися потужність, якщо лампи з'єднати послідовно?
255. Трамвайний двигун споживає силу струму 110 при напрузі 600 і розвиває силу тяги 3 Н. Визначити швидкість руху трамвая горизонтальною ділянкою, якщо ККД=60 %.

256. Ліфт масою 1,5 т піднімається на висоту 20 м за 0,5 хв. Напруга на затискачах двигуна 220 В, його ККД 90%. Знайдіть силу струму в двигуні.
257. Опір нагрівального елемента електричного чайника 100 Ом. За який час закипить 2 л води, якщо початкова температура води 10 °С, напруга в мережі 220 В, ККД нагрівника 30 %?
258. На скільки градусів нагріється алюмінієвий провідник із площею поперечного перерізу 4,5 мм² після пропускання по ньому струму 0,75 А протягом 20 с? Вважати, що від усієї енергії, що виділяється в провіднику під час проходження струму, навколишньому повітрю передається 0,5 частини енергії.
259. Котушка реле постійного струму, що розрахована на напругу 110 В, споживає потужність 2,5 Вт. Який треба взяти додатковий опір, щоб можна було вмикати реле в мережу з напругою 220 В?

Рівень С

260. Як дослідним шляхом з'ясувати, котра із двох однакових за зовнішнім виглядом електричних лампочок, розрахованих на напругу 220 В кожна, має більшу потужність, якщо надписи на лампочках стерлися?
261. Електродвигун при напрузі 220 В споживає струм силою 20 А. Опір його обмоток 0,75 Ом. Яка потужність споживається для нагрівання електродвигуна? Яка утворюється максимальна потужність? Яка величина спожитої електроенергії за 5 хв?
262. Електричний стерилізатор має 2 нагрівальні елементи. При вмиканні одного з них вода в стерилізаторі закипає через 15 хв, при вмиканні іншого – через 30 хв. Через скільки часу закипить вода, якщо Увімкнути обидва нагрівальні елементи: 1) послідовно; 2) паралельно. Напруга в мережі незмінна.
263. Батарея, замкнена на опір 2 Ом, дає струм 1,6 А. Та сама батарея, замкнена на опір 1 Ом, дає струм 2 А. Знайдіть втрати потужності і ККД батареї в обох випадках.

264. Елемент з ЕРС 6 В дає максимальний струм 3 А. Знайти найбільшу кількість теплоти, яка може бути виділена на зовнішньому опорі за одиницю часу.
265. Від генератора з ЕРС 40 В і внутрішнім опором 0,04 Ом струм надходить по мідному кабелю перерізом 170 мм^2 до місця електрозварювання, віддаленому від генератора на 50 м. Знайдіть напругу на затискачах генератора та на зварювальному апараті, якщо сила струму в колі дорівнює 200 А. Яка потужність зварювальної дуги?
266. Електричний чайник з 0,6 л води при 10°C ввімкнули в мережу і забули вимкнути. Через який час вода у чайнику википить? Опір обмотки чайника 14,4 Ом, напруга 220 В і ККД чайника 60 %.
267. Електричний чайник має 2 нагрівні секції. Якщо секції з'єднати послідовно, вода у чайнику закипає через 50 хв, якщо паралельно – то за 8 хв. Через який час закипить вода, якщо у коло буде ввімкнена тільки перша або тільки друга секція?

7.5. Магнітне поле

7.5.1. Магнітне поле струму. Магнітна індукція Сила Ампера

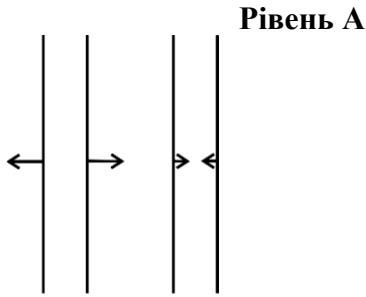


Рис.7.5.1.

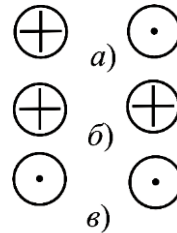


Рис.7.5.2.

268. Які напрями мають струми в провадах, коли сили взаємодії спрямовані так, як на рис. 7.5.1 ?
269. Як взаємодіють паралельні струми, спрямовані так, як зображено на рис. 7.5.2 ?

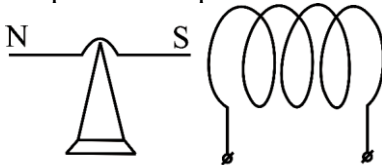


Рис. 7.5.3.

270. Позначити знаками «+» та «-» полюси джерела струму, яке живить соленоїд, щоб спостерігалася показана на рис. 7.5.3 взаємодія.

271. Яка індукція магнітного поля, яке на провідник завдовжки 5 см, по якому протікає струм 2,5 А і який розміщений перпендикулярно до ліній магнітної індукції, діє силою 50 мН?
272. Яка довжина активної частини провідника, якщо при силі струму в ньому 4 А на нього діє з силою 0,2 Н магнітне поле з індукцією 0,5 Тл? Напрями струму і поля взаємно перпендикулярні.
273. Якої сили струм протікає провідником завдовжки 40 см, вміщеним у магнітне поле перпендикулярно до ліній

магнітної індукції, якщо магнітне поле з індукцією 1 Тл діє на провідник силою 0,8 Н?

274. Яка сила діє на провідник завдовжки 10 см в однорідному магнітному полі, що його магнітна індукція становить 2,6 Тл, коли струм у провіднику дорівнює 12 А, а кут між напрямом струму і лініями індукції: 1) 90° ; 2) 30° ?
275. На провідник завдовжки 50 см із струмом 20 А, розташований в однорідному магнітному полі, що має магнітну індукцію 0,1 Тл, діє сила 0,05 Н. Обчислити кут між напрямом струму в провіднику і вектором магнітної індукції.
276. Яка сила струму в провіднику завдовжки 20 см, розташованому в однорідному полі, що має магнітну індукцію 2 Тл, коли сила, яка діє на провідник, дорівнює 0,75 Н, а кут між напрямом ліній магнітної індукції і струму дорівнює 49° ?

Рівень В

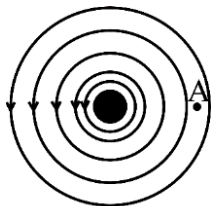


Рис. 7.5.4.

277. На рис. 7.5.4. зображено магнітне поле прямого струму. А) Який напрям має струм у провіднику? Б) Чи є поле в точці А? В) який напрям має вектор магнітної індукції в будь-якій точці поля? Г) визначити напрям сил, які діють у цьому полі на полюси магнітної стрілки.

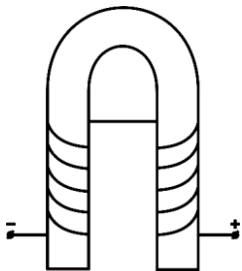
278. Чим відрізняється магнітне поле від електростатичного?
279. Чому струмів розплавленого металу, коли пропускати крізь нього струм, звужується (зменшується площа поперечного перерізу)? Як можна застосувати це явище в металургії?
280. Максимальний обертаючий момент, який діє на рамку площею 1 см^2 , розміщену в магнітному полі, дорівнює $2 \text{ мкН}\cdot\text{м}$. Сила струму, що проходить у рамці, становить 0,5 А. Визначити індукцію магнітного поля.
281. Рамку площею 40 см^2 розмістили в однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл так, що нормаль до рамки

перпендикулярна до ліній індукції. При якій силі струму на рамку діятиме обертаючий момент $20 \text{ мН}\cdot\text{м}$?

282. По двох нескінченно довгих паралельних провідниках, відстань між якими l , в одному напрямку течуть струми I_1 та I_2 . Визначити індукцію магнітного поля в точці A , яка лежить на продовженні прямої, що з'єднує провідники на відстані S від другого провідника. Вважати, що обидва провідники знаходяться у вакуумі.
283. Струм силою I , що проходить по кільцю з мідного проводу перерізом S , створює в центрі кільця індукцію магнітного поля, що дорівнює B . Яка різниця потенціалів між кінцями провідника, який утворює кільце?
284. При переміщенні провідника завдовжки 80 см зі струмом 20 А в однорідному магнітному полі з індукцією $1,2 \text{ Тл}$ перпендикулярно до нього виконано роботу $1,92 \text{ Дж}$. Визначити величину переміщення.
285. Для переміщення на $0,25 \text{ м}$ провідника довжиною $0,4 \text{ м}$ в однорідному магнітному полі з індукцією $1,25 \text{ Тл}$ було виконано роботу $0,25 \text{ Дж}$. Якої сили струм проходив провідником, якщо він рухався перпендикулярно до поля?
286. По горизонтально розташованому провіднику завдовжки 20 см і масою 4 г проходить струм силою 10 А . Визначити індукцію (модуль і напрям) магнітного поля, в якому треба розмістити провідник, щоб сила тяжіння зрівноважилася з силою Ампера.

Рівень С

287. Два однакові колові струми зі спільним центром розміщені у взаємно перпендикулярних площинах. Як спрямований вектор індукції магнітного поля у спільному центрі струмів ?
288. Чому прямий провідник зі струмом рухається в магнітному полі поступально, а рамка зі струмом - обертально? Від чого залежить напрям обертання рамки?



289. Визначити полюси електромагніту, зображеного на рис. 7.5.5.

290. Знайти індукцію магнітного поля в центрі контура, який має вигляд прямокутника, якщо його діагональ $0,16$ м, кут між діагоналями 30° та сила струму в контурі 5 А.

Рис.7.5.5.

291. По двох нескінченно довгих паралельних провідниках проходять струми 40 та 70 А в протилежних напрямках. Відстань між провідниками 15 см. Визначити магнітну індукцію в точці, віддаленій на $0,2$ м від першого провідника та на $0,3$ м від другого провідника .

292. Два кругових витки розташовані в двох взаємно перпендикулярних площинах так, що центри цих витків співпадають. Радіус кожного витка 2 см, струми у витках дорівнюють 5 А. Знайти напруженість магнітного поля в центрі цих витків.

293. По дротяній рамці, що має форму правильного шестикутника, йде струм 2 А. При цьому в центрі рамки утворюється магнітне поле напруженістю 33 А/м. Знайти довжину дроту, з якого виготовлена рамка.

294. Провідник, що має довжину 1 м і масу 10 г, підвісили на тонких дротиках. Під час проходження по ньому струму в 2 А він відхилився в однорідному вертикальному полі так, що дротики утворили кут 30° із вертикаллю. Яка індукція магнітного поля ?

295. Квадратна дротяна рамка розташована в одній площині з довгим прямим проводом так , що дві її сторони паралельні до проводу. По рамці і проводу течуть однакові струми силою 1 кА. Визначити силу, що діє на рамку, якщо найближча до проводу сторона рамки знаходиться на відстані, що дорівнює її довжині.

296. Між полюсами магніту на двох вертикальних дротиках підвісили горизонтальний провідник масою 10 г і завдовжки 90 см. Індукція однорідного магнітного поля спрямована вертикально і дорівнює $0,03$ Тл. Весь провідник знаходиться в магнітному полі. На який кут від вертикалі відхиляються дротинки, які підтримують провідник, якщо по ньому пропустили струм силою 2 А? Масами дротинок знехтувати.

7.5.2. Магнітний потік. Сила Лоренца

Рівень А

297. Який магнітний потік пронизує плоску поверхню площею 50 см^2 при індукції поля $0,4 \text{ Тл}$, якщо ця поверхня: а) перпендикулярна до вектора індукції поля; б) розташована під кутом 45° до вектора індукції; в) розташована під кутом 30° до вектора індукції?
298. Магнітний потік у середині контуру, площа поперечного перерізу якого 60 см^2 , становить $0,3 \text{ мВб}$. Визначити індукцію поля в середині контуру. Вважати, що поле однорідне.
299. Визначити магнітний потік, що пронизує плоску прямокутну площину завдовжки 60 см і завширшки 25 см , коли магнітна індукція в усіх її точках дорівнює $1,5 \text{ Тл}$, а вектор магнітної індукції утворює з нормаллю до цієї площини кут 90° .
300. Визначити знак заряду частинки за напрямом її руху і напрямом сили Лоренца (рис. 7.5.6 і 7.5.7).

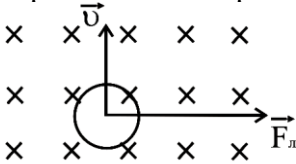


Рис.7.5.6.

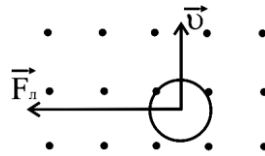
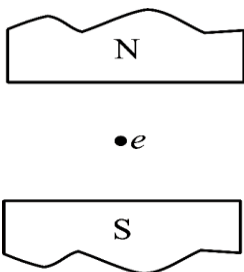


Рис.7.5.7.

301. Швидкість електрона e спрямована до нас (рис. 7.5.8). А) В якому напрямі відхилиться електрон під дією магнітного поля? Б) Відповісти на те саме запитання, якщо: 1) швидкість електрона спрямована в протилежний бік; 2) лінії магнітної індукції спрямовані в протилежний бік.



302. Електрон рухається у вакуумі в однорідному магнітному полі, індукція якого $0,1 \text{ Тл}$ зі швидкістю $3 \cdot 10^6 \text{ м/с}$. Чому дорівнює сила, що діє на електрон, коли кут між напрямом

його швидкості і лініями індукції становить 90^0 ?

303. Яка сила діє на протон, що Рис.7.5.8. рухається зі швидкістю 10 Мм/с в магнітному полі з індукцією $0,2 \text{ Тл}$ перпендикулярно до лінії індукції?
304. Електрон рухається у вакуумі в однорідному полі, магнітна індукція якого $5 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$, зі швидкістю $1 \cdot 10^4 \text{ км/с}$, спрямованою перпендикулярно до лінії індукції. Визначити силу, що діє на електрон .

Рівень В

305. Який магнітний потік пронизує плоску прямокутну площину завдовжки 50 см і завширшки 30 см , коли магнітна індукція становить 2 Тл , а вектор магнітної індукції утворює з нормаллю до площини кут $90^0, 45^0, 0^0$?
306. Плоский контур, площа якого дорівнює 25 см^2 , знаходиться в однорідному магнітному полі з індукцією $0,04 \text{ Тл}$. Визначити магнітний потік, що пронизує контур, якщо площина його складає кут 30^0 із лініями індукції.
307. Визначити радіус кола, по якому рухається електрон, швидкість якого v , в магнітному полі індукцією B .
308. Електрон, який має швидкість $1,9 \cdot 10^7 \text{ м/с}$, влітає в однорідне магнітне поле, перпендикулярне до напрямку його руху. Індукція магнітного поля $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$. Знайти радіус кривизни траєкторії електрона і його доцентрове прискорення.
309. На фотографії траєкторія електрона є дугою кола радіусом 10 см . Індукція магнітного поля $1 \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$. Знайти швидкість електрона і період його обертання.
310. В однорідне магнітне поле з індукцією 10 мТл перпендикулярно до ліній індукції влітає електрон, кінетична енергія якого 30 кеВ . Обчислити радіус кривизни траєкторії руху електрона у полі.
311. Електрон рухається в однорідному магнітному полі, індукція якого 4 мТл . Визначити період обертання електрона.

Рівень С

312. В однорідному магнітному полі напруженістю $79,6 \text{ кА/м}$ розміщена квадратна рамка, площа якої складає з напрямом магнітного поля кут 45° . Сторона рамки 4 см . Знайдіть магнітний потік, що пронизує рамку.
313. У магнітному полі, індукція якого $0,05 \text{ Тл}$, обертається стержень довжиною 1 м . Вісь обертання, що проходить через один із кінців стержня, паралельна до напрямку магнітного поля. Знайти магнітний потік, який перетинає стержень при кожному оберті.
314. Протон влітає в однорідне магнітне поле так, що вектор швидкості спрямований під кутом 30° до ліній індукції поля і рухається по спіралі радіусом $1,5 \text{ см}$. Індукція магнітного поля $0,1 \text{ Тл}$. Знайти кінетичну енергію протона.
315. Пройшовши прискорюючу різницю потенціалів 2 кВ , електрон влітає в однорідне магнітне поле з індукцією $2 \cdot 10^4 \text{ Тл}$ і рухається в ньому по колу. Визначити радіус кола, по якому рухається електрон.
316. Електрон влітає в однорідне магнітне поле під кутом 30° до поля, маючи швидкість $4,5 \cdot 10^7 \text{ м/с}$, і рухається по спіралі сталого радіуса. Індукція магнітного поля $0,01 \text{ Тл}$. Визначити радіус витка спіралі та її крок.
317. Електрон рухається зі швидкістю $1 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ паралельно прямолінійному дроту на відстані 4 мм від нього. З якою силою магнітне поле діє на електрон, якщо по дротині проходить струм 5 А ?
318. Пучок позитивних іонів ізотопу урану–235 у магнітному полі з індукцією $0,1 \text{ Тл}$ описує коло радіусом $1,22 \text{ м}$, площа якого перпендикулярна до ліній магнітної індукції. Який модуль і напрям вектора швидкості іонів урану - 235? Яку прискорювальну різницю потенціалів повинні пройти ізотопи урану в електричному полі, щоб досягти такої швидкості? Валентність іонів $n = 3$.
319. Заряджена частинка влетіла в однорідне магнітне поле під кутом 80° до ліній магнітної індукції. У скільки разів крок гвинтової лінії більший за її радіус?

7.5.3. Рух електричних зарядів в електричних і магнітних полях. Магнітні властивості речовини

Рівень А

320. Електрон, маса якого $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, під дією сили однорідного електричного поля, що дорівнює $1,456 \cdot 10^{-17}$ Н, рухається з прискоренням. Визначити прискорення електрона.
321. Яку швидкість має електрон, що пролетів прискорюючу різницю потенціалів 220 В ?
322. У якому напрямі відхилиться пучок електронів, якщо трубку встановити в міжполюсному просторі підковоподібного магніту?
323. Що станеться, коли до екрана телевізора, який працює, піднести магніт? Пояснить.
324. Чому полярне саяво спостерігається в основному в полярних районах земної кулі?
325. Чому корпус компаса виготовляють із пластмаси, латуні, алюмінію, але не із заліза?
326. Чому магнітофонну плівку не рекомендується зберігати поблизу приладів, які містять електромагніти?
327. Магнітна індукція в бруску металу дорівнює 0,75 Тл, а індукція зовнішнього намагніченого поля дорівнює 0,0375 Тл. Яку відносну магнітну проникність має метал?
328. Крапля радіусом 1 мкм, яка несе на собі заряд двох електронів, перебуває в рівновазі в полі горизонтально розміщеного плоского конденсатора, коли до нього прикладено напругу 820 В. Відстань між пластинами дорівнює 8 мм. Густина масла $0,8 \text{ г/см}^3$. Чому дорівнює заряд електрона?
329. Ядро атома неону прискорюється різницею потенціалів 2000 В. Знайти швидкість ядра, якщо атомна вага неону 20 і його номер у періодичній системі 10.
330. Електрон рухається в напрямі силових ліній однорідного поля, напруженість якого дорівнює приблизно 1,2 В/см. Яку відстань він пролетить у вакуумі до повної втрати швидкості,

коли його початкова швидкість 1000 км/с. Який час триватиме цей політ?

Рівень В

331. Якщо у магнітне поле потрапить електрон, вектор швидкості якого перпендикулярний до напрямку магнітного поля, то він рухатиметься по коловій траєкторії. Доведіть це.
332. У мас-спектрометрі одноразово іонізована частинка рухається зі швидкістю 956 км/с по колу діаметром 20 см в однорідному магнітному полі, індукція якого 0,1 Тл. Визначити масу частинки.
333. Протон пройшов прискорюючу різницю потенціалів 600 В, влетів в однорідне магнітне поле, магнітна індукція якого 0,3 Тл, і почав рухатися по колу. Визначити радіус кола.
334. Наблизьте голку до стрілки компаса і сірником розжарте голку. Результат досліду поясніть.
335. Визначте магнітну проникність нікелю, коли відомо, що магнітний потік Φ_1 , який пронизує його переріз, у 2,4 рази менший від магнітного потоку Φ_2 , який пронизує такий самий переріз сталі. Магнітна проникність сталі 670.
336. У скільки разів підсилиться магнітне поле в середині котушки зі струмом, якщо в котушку ввести сталеве осердя?

Рівень С

337. Електрон із швидкістю $4 \cdot 10^9$ см/с влітає в плоский конденсатор, при чому вектор його швидкості лежить у площині, паралельній пластинам. На скільки зміниться точка вильоту електрона з конденсатора, якщо до конденсатора прикладено напругу 300 В. Відстань між пластинами конденсатора дорівнює 1 см, довжина конденсатора дорівнює 5 см. Пластини горизонтальні.
338. Пучок іонів хлору Cl^{35} і Cl^{37} , кожний з яких несе по одному елементарному позитивному заряду, розганяється так, що швидкість іонів до моменту потрапляння пучка в простір між пластинами плоского конденсатора однакові і дорівнюють 10^7 см/с. Пучок іонів влітає в середину конденсатора паралельно його пластинам. Довжина пластин 5 см, відстань між ними 5 мм. Яку напругу треба прикласти між пластинами конденсатора, щоб точки потрапляння іонів Cl^{35} і Cl^{37} були зміщені на приймальному екрані на 0,6 мм одна від одної? Приймальний екран розміщений на відстані 10 см від заднього краю пластин конденсатора.
339. Електрони влітають у плоский конденсатор довжиною L під кутом α до площини пластин, а вилітають під кутом β . Визначити початкову кінетичну енергію електронів, якщо напруженість поля в середині конденсатора дорівнює E .
340. У мас-спектрографі (рис. 7.5.9) заряджені частини

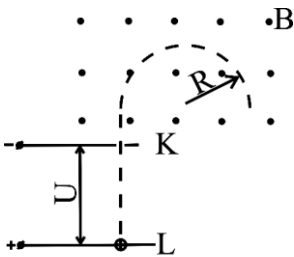


Рис.7.5.9.

дорівнює нулю.

прискорюються на ділянці KL електричним полем і, потрапивши в магнітне поле з індукцією B , описують коло радіусом R . Вивести формулу для розрахунку питомого заряду частинки q/m , якщо прискорююча напруга дорівнює U . Початкову швидкість частинки вважати такою, що

341. Протон влітає зі швидкістю 6 км/с у простір з електричним і магнітним полями, напрями яких збігаються, перпендикулярно до цих полів. Знайдіть напруженість електричного поля, якщо індукція магнітного поля дорівнює 1 Тл , а початкове прискорення протона, спричинене дією цих полів, дорівнює 10^{12} м/с^2 .
342. α -частинка, прискорена різницею потенціалів 240 кВ , пролітає ділянку поперечного однорідного магнітного поля з магнітною індукцією 1 Тл і відхиляється від початкового напрямку руху на кут 30° . Визначте товщину області, в якій створено магнітне поле.
343. Скільки ампер-витків потрібно для створення магнітного потоку $0,42 \text{ мВб}$ в соленоїді з залізним осердям довжиною 120 см і площею поперечного перерізу 3 см^2 ?
344. Довжина залізного осердя тороїда $2,5 \text{ м}$, довжина повітряного проміжку 1 см . Кількість витків у обмотці тороїда - 1000 . При струмі 20 А індукція магнітного поля в повітряному проміжку дорівнює $1,6 \text{ Тл}$. Знайти магнітну проникність залізного осердя за цих умов. (Залежність B від H для заліза невідома).
345. Довжина залізного осердя тороїда становить 1 м , довжина повітряного проміжку 3 мм . Кількість витків у обмотці тороїда — 1000 . Знайти напруженість магнітного поля у повітряному проміжку при струмі 1 А в обмотці тороїда.

7.6. Задачі з теми "Електромагнітна індукція"

7.6.1. Електромагнітна індукція. ЕРС індукції

Рівень А

346. Яку форму намагається набути замкнений провідник, по якому тече струм?
347. В однорідному магнітному полі поступально рухається провідний контур. Чи виникає ЕРС індукції у контурі, якщо магнітне поле: а) однорідне; б) неоднорідне?

348. Як взаємодіють сусідні витки соленоїда, коли по них тече струм?
349. У замкнутому витку дроту, що має опір $2 \cdot 10^{-2}$ Ом, миттєве значення індукційного струму становить 5 А. Яка ЕРС індукції?
350. Прямий провідник завдовжки 35 см перетинає однорідне магнітне поле зі швидкістю 6 м/с перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Сам провідник також перпендикулярний лініям магнітної індукції. Визначити індукцію магнітного поля, якщо між кінцями провідника виникає різниця потенціалів 12 мВ.
351. Визначити різницю потенціалів, яка виникає між кінцями крил літака при горизонтальному польоті зі швидкістю 1200 км/год, якщо розмах крил 40 м, а вертикальна складова індукції магнітного поля Землі дорівнює 50 мкТл.

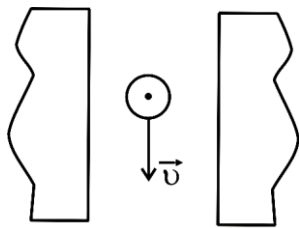


Рис.7.6.1.

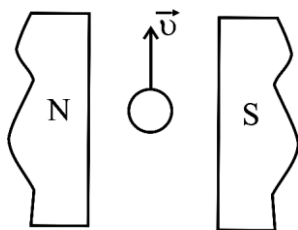


Рис.7.6.2.

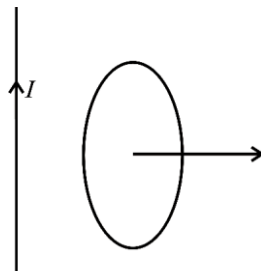


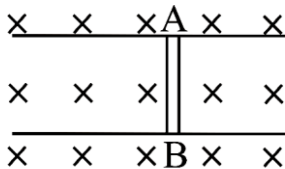
Рис.7.6.3.

Рівень В

352. Між полюсами магніту рухається провідник. За напрямом його руху і напрямом індукованої в ньому ЕРС визначте полюси магніту (рис. 7.6.1).

353. Між полюсами магніту рухається провідник у напрямі, вказаному на рис. 7.6.2. Визначте напрям індукованої у провіднику ЕРС.

354. Замкнутий виток дроту знаходиться біля провідника зі струмом (рис. 7.6.3). Чи буде виникати у провіднику струм, якщо: а) обертати виток навколо осі, що проходить через провідник; б) обертати навколо осі, паралельної провіднику; в) обертати навколо осі, перпендикулярної до провідника; г) рухати поступально паралельно провіднику; д) рухати поступально перпендикулярно до провідника?
355. Рейки залізничної колії ізольовані одна від одної і від землі. По цих рейках іде потяг зі швидкістю 20 м/с. Вертикальна складова магнітного поля Землі $5 \cdot 10^{-5}$ Тл, відстань між рейками 1,54 м. Що покаже мілівольтметр, приєднаний до рейок?



356. На паралельні горизонтальні рейки подано напругу, і по провіднику АВ (рис. 7.6.4) тече струм I . Під дією магнітного поля провідник

рухається з прискоренням a . Знайдіть індукцію магнітного поля, якщо площа поперечного перерізу провідника дорівнює S , а густина матеріалу провідника ρ . Тертя не враховувати.

357. Стержень АВ (рис. 7.6.4) лежить на горизонтальних рейках, які знаходяться на відстані l одна від одної. Знайдіть індукцію B магнітного поля, якщо стержень починає рухатися при силі струму в ньому I . Маса стержня m , якщо коефіцієнт тертя стержня з рейками μ .

Рівень С

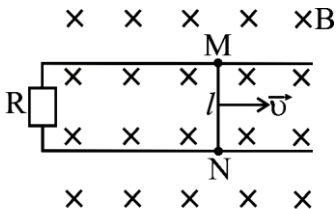


Рис.7.6.5.

358. Провідник MN масою m , завдовжки l ковзає без тертя по двох горизонтальних рейках зі швидкістю v в однорідному вертикальному магнітному полі (рис. 7.6.5). Рейки замкнуті на резистор опором R . З якою силою

магнітне поле діє на провідник? З якою силою тягнуть провідник?

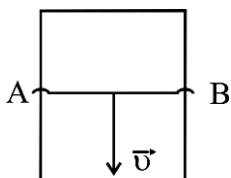


Рис.7.6.6.

359. Уздовж рамки, яку зроблено з мідних шин, розташовано у вертикальній площині, може зісковзнути вниз, не втрачаючи контакту, горизонтально розташований провідник АВ (рис. 7.6.6). Якщо перпендикулярно до площини рами прикласти однорідне магнітне поле з індукцією B , то провідник падає зі сталою швидкістю v . Визначте вагу провідника, якщо його електричний опір дорівнює R , а довжина l . Опором мідних шин знехтуйте.

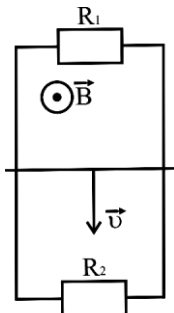


Рис.7.6.7.

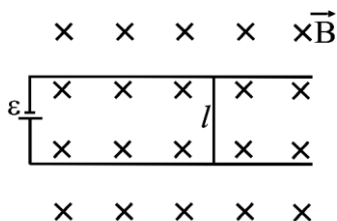
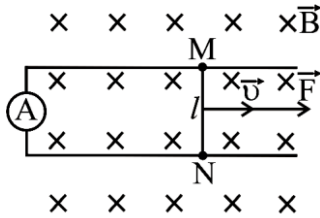


Рис.7.6.8.

360. Провідник довжиною 10 см ковзає вздовж горизонтальних рейок у вертикальному магнітному полі з індукцією 10 мТл. Кінці рейок замкнені на опори 1 Ом і 2 Ом (рис. 7.6.7). Визначте силу струму, який тече по провіднику, якщо його швидкість є сталою і дорівнює 10 м/с. Опором рейок і провідника знехтуйте.
361. Провідник довжиною один метр лежить на двох горизонтальних шинах, розташованих у вертикальному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл. З якою сталою швидкістю та в якому напрямі буде рухатись провідник, коли до шин під'єднати джерело струму з ЕРС 0,5 В (рис. 7.6.8)?
362. Провідник MN опором 2 Ом під дією сили 0,2 Н ковзає з постійною швидкістю 0,2 м/с по мідній рамі,



перпендикулярно до площини якої прикладено однорідне магнітне поле (рис. 7.6.9).
Рис.7.6.9.

Визначте покази амперметра, якщо половина механічної енергії перетворюється в електричну. Опором мідних шин і амперметра знехтуйте.

7.6.2. Закон електромагнітної індукції. Правило Ленца. Самоіндукція. Індуктивність

Рівень А

363. Провідне кільце міститься в магнітному полі, лінії індукції якого перпендикулярні площині кільця. Вказати напрям протікання індукційного струму під час зростання магнітної індукції (рис. 7.6.10).

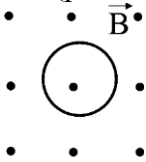


Рис.7.6.10.

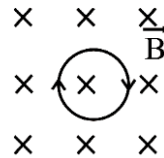
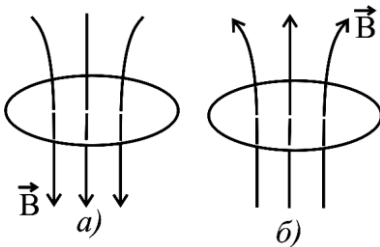


Рис.7.6.11.

364. Провідне кільце перебуває у магнітному полі, лінії індукції якого перпендикулярні кільцю (рис. 7.6.11). Збільшується чи зменшується магнітна індукція, якщо індукційний струм має напрям, указаний на малюнку?



365. Визначте напрям сил, які діють на провідне кільце (рис. 7.6.12), якщо індукція магнітного поля: Рис.7.6.12.
а) збільшується;
б) зменшується.

366. За 2,5 мс магнітний потік, який пронизує контур, рівномірно спадає від 10 до 5 мВб. Визначити ЕРС індукції в контурі.
367. У контурі провідника за 0,3 с магнітний потік змінився на 0,06 Вб. Яка швидкість зміни магнітного потоку? Яка ЕРС індукції в контурі?
368. Магнітний потік, що пронизує контур провідника, рівномірно змінився на 0,6 Вб так, що ЕРС індукції стала дорівнювати 1,2 В. Знайти час, протягом якого змінювався магнітний потік.
369. Визначити індуктивність котушки з осердям, якщо при швидкості зміни сили струму 50 А/с у ній збуджується ЕРС самоіндукції 20 В.
370. З якою швидкістю змінюється сила струму в котушці індуктивністю 120 мГн, якщо в ній виникає ЕРС самоіндукції 6 В?
371. При рівномірній зміні в котушці сили струму від 5 до 10 А упродовж 250 мс у ній виникає ЕРС самоіндукції 2 В. Яка індуктивність котушки?

Рівень В

372. Електромагніт вмикають у коло постійного струму. Чому в колі максимальна сила струму встановлюється не відразу?
373. У який момент іскрить рубильник: при замиканні чи при розмиканні електричного кола? Чому?
374. Чим пояснюється нагрівання шматка металу, що перебуває у магнітному полі, яке швидко змінюється?
375. Три однакові штабові магніти падають в однаковому положенні з тієї ж висоти. Один падає вільно, інший під час падіння проходить крізь незамкнутий соленоїд, а третій крізь замкнутий соленоїд. Порівняти час падіння магнітів. Відповіді обґрунтувати на основі правила Ленца та закону збереження енергії.
376. У замкненому витку, виготовленому із алюмінієвої дротини завдовжки 10 см і поперечного перерізу $1,4 \text{ мм}^2$, магнітний

потік зменшується від 10 до 5 мВб упродовж 5 с. Яка сила струму, індукованого у витку?

377. Магнітний потік через кожен із 50 однакових витків котушки становить 100 мВб. Під час його рівномірного зменшення впродовж 10 мс у котушці виникає ЕРС 200 В. До якого значення зменшується магнітний потік?
378. Магнітний потік через контур замкненого провідника опором 30 мОм за 2 с змінюється на 12 мВб. Яка сила струму, що протікає у провіднику під час цієї зміни, якщо магнітний потік змінюється рівномірно?
379. Котушка, яка має 1000 витків, перебуває у магнітному полі. Магнітний потік, який пронизує витки котушки, змінюється на 2 мВб, якщо сила струму в котушці змінюється на 16 А. Яка індуктивність котушки?
380. Під час зростання сили струму у котушці від 1 до 2 А упродовж 10 мс у ній виникає ЕРС самоіндукції 20 В. Яка індуктивність котушки? Який магнітний потік пронизує котушку в момент, коли сила струму становить 1,5 А, якщо вона має 200 щільно намотаних витків?

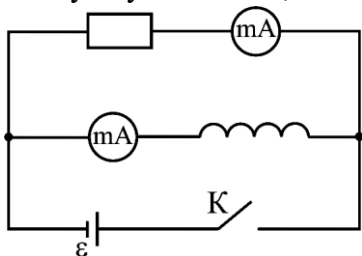


Рис.7.6.13.

Рівень С

381. Що показують міліамперметри у схемі, зображеній на рис. 7.6.13? Котушку зроблено з товстого дроту. Що покажуть міліамперметри, якщо розімкнути ключ К? Якщо замкнути ключ К?
382. Чи буде індукватися струм у котушці з біфілярною обмоткою (тобто звитою з дроту, складеного навпіл по всій довжині)?
383. Горизонтальний металевий стержень завдовжки 50 см обертається навколо вертикальної осі, що проходить через один із його кінців. Частота обертання стержня 120 об/хв. Яка різниця потенціалів виникає між кінцями стержня, якщо

вертикальна складова індукції магнітного поля Землі дорівнює 50 мкТл?

384. При зміні сили струму від 2 до 14 А магнітний потік у котушці, яка містить 800 витків, збільшується від 600 мкВб до 3 мВб. Яка індуктивність котушки? Яка середня ЕРС самоіндукції виникає в котушці, якщо зміна сили струму відбувається впродовж 160 мс?

385. Провідний стержень завдовжки 50 см помістили в магнітне поле з індукцією 2 Тл перпендикулярно лініям магнітної індукції. Кінці стержня сполучені гнучким проводом, що міститься поза полем. Опір кола 2,5 Ом. Яку потужність треба розвивати, щоб рухати стержень під кутом 30° до ліній магнітної індукції зі швидкістю 10 м/с?

386. В однорідному магнітному полі з магнітною індукцією 100 мТл міститься плоский дротяний виток, закинтий на гальванометр. Площина витка перпендикулярна лініям магнітної індукції; площа витка 10 дм^2 , а його опір 2 Ом. Який заряд пройде через гальванометр, якщо виток повернути на 120° ?

387. В електричному полі (рис. 7.6.14) ЕРС джерела 12 В, внутрішній опір джерела 2 Ом, індуктивність котушки 0,1 Гн, опори резисторів $R=8 \text{ Ом}$, $R=3 \text{ Ом}$; опором котушки можна знехтувати. Яка кількість теплоти

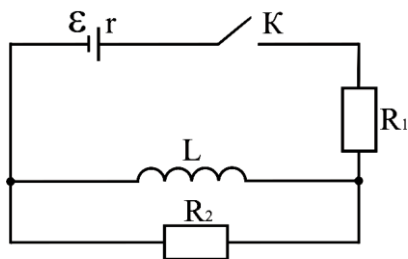


Рис.7.6.14.

виділиться в резисторі R після розмикання ключа і який заряд пройде через резистор R ?

388. Свинцеве кільце радіусом 4 см розміщено горизонтально між полюсами електромагніту, який створює вертикальне магнітне поле з індукцією 0,2 Тл. Охолоджуючи кільце, його переводять у надпровідний стан. Якою буде сила струму у кільці після вимикання електромагніту? Індуктивність надпровідного кільця 2 мГн.

7.6.3. Енергія магнітного поля. Густина енергії

Рівень А

389. У котушці, індуктивність якої становить 0,6 Гн, сила струму 20 А. Яку енергію має магнітне поле цієї котушки? Як зміниться енергія магнітного поля, коли сила струму зменшиться вдвічі?
390. По обмотці соленоїда індуктивністю 0,2 Гн тече струм силою 10 А. Визначити енергію магнітного поля соленоїда.
391. Струм якої сили має проходити в обмотці дроселя з індуктивністю 0,5 Гн, щоб енергія дорівнювала 10 Дж?
392. Визначити енергію магнітного соленоїда, в якому при силі струму 10 А виникає магнітний потік 0,5 Вб.
393. При індукції поля 1 Тл густина енергії магнітного поля в залізі дорівнює 200 Дж/м^3 . Визначити магнітну проникність заліза за цих умов.*
394. Визначити об'ємну густину енергії магнітного поля в сталевому осерді, якщо індукція цього поля дорівнює 0,5 Тл.*

Рівень В

395. У котушці без осердя за 0,02 с сила струму зросла від 1 до 3 А, і при цьому у котушці виникла ЕРС самоіндукції 30 В. Визначити коефіцієнт самоіндукції котушки і зміну енергії магнітного поля котушки.
396. Соленоїд містить 100 витків. Сила струму в його обмотці дорівнює 1 А, магнітний потік через поперечний переріз соленоїда дорівнює 0,1 мВб. Обчислити енергію магнітного поля.
397. Індуктивність соленоїда довжиною 60 см і площею поперечного перерізу 4 см^2 дорівнює 4 Гн. При якій силі струму об'ємна густина енергії магнітного поля в середині соленоїда складе 2 Дж/м^3 ?
398. Індукція магнітного поля тороїда зі сталевим осердям зросла від 0,5 до 1 Тл. Знайти, у скільки разів змінилася об'ємна густина енергії магнітного поля.*

399. Обчислити густину енергії магнітного поля в залізному осерді замкненого соленоїда, якщо напруженість намагнічуючого поля дорівнює $1,2 \text{ кА/м}$.*
400. Напруженість магнітного поля тороїда зі сталевим осердям зросла від 200 А/м до 800 А/м . Визначити, у скільки разів змінилася об'ємна густина енергії магнітного поля.*

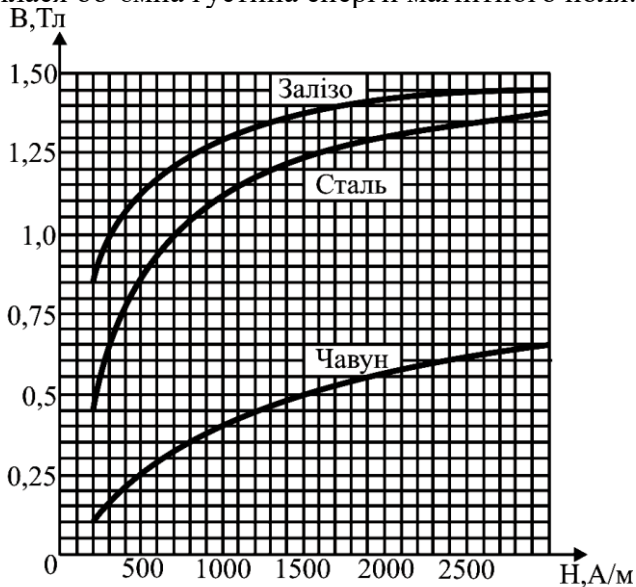


Рис.7.6.15.

* для визначення магнітної проникності потрібно користуватися графіком на рис.7.6.15. Явище гістерезису не враховувати.

Рівень С

401. По обмотці тороїда тече струм силою $0,6 \text{ А}$. Витки дроту діаметром $0,4 \text{ мм}$ щільно прилягають один до одного (товщиною ізоляції знехтувати). Знайти енергію магнітного поля в сталевому осерді тороїда, якщо площа його перерізу дорівнює 4 см^2 , діаметр середньої лінії дорівнює 30 см .*
402. До джерела постійного струму з ЕРС 40 В і внутрішнім опором 1 Ом під'єднали котушку індуктивності, опір постійному струму якої дорівнює 3 Ом . Визначити

індуктивність котушки, якщо при встановленні в котушці постійної сили струму енергія магнітного поля в ній дорівнює 7,5 Дж. Якого середнього значення ЕРС самоіндукції виникне в контурі при розмиканні кола за 0,015 с?

403. Зайти густину енергії магнітного поля в залізному осерді соленоїда, якщо напруженість намагнічуючого поля дорівнює 1,6 кА/м.*
404. Обмотка тороїда містить 10 витків на кожний сантиметр довжини. Осердя не магнітне. При якій силі струму в обмотці густина енергії магнітного поля дорівнює 1 Дж/м³?
405. Скільки ампер-витків потрібно для того, щоб у середині соленоїда малого діаметра і довжиною 30 см об'ємна густина енергії магнітного поля складала 1,75 Дж/м³?
406. Соленоїд довжиною 50 см і площею поперечного перерізу 2 см² має індуктивність 0,2 мкГн. При якій силі струму об'ємна густина енергії магнітного поля в середині соленоїда дорівнює 1 Дж/м³ ?

7.7. Задачі з теми "Електричний струм у різних середовищах"

7.7.1. Основні положення електронної теорії провідності металів. Залежність опору металевих провідників від температури

Рівень А

407. Чому при малій швидкості впорядкованого руху електронів у металевому провіднику прилади починають діяти одночасно?
408. Коли електричною лампочкою розжарення йде струм більшої сили: зразу після вмикання її в мережу чи за кілька хвилин? Чому?
409. Сила струму в металевому провіднику дорівнює 0,8 А, переріз провідника 4 мм^2 . Вважаючи, що в кожному кубічному сантиметрі знаходиться $2,5 \cdot 10^{22}$ вільних електронів, визначити середню швидкість їх впорядкованого руху.
410. Визначити силу струму в мідному провіднику перерізом 10 мм^2 , якщо середня швидкість впорядкованого руху вільних електронів дорівнює $4,2 \text{ мм/с}$, а їх кількість $5 \cdot 10^{24}$.
411. При температурі 20^0 опір платинового дроту був 20 Ом . Яким буде опір цього дроту при температурі 500^0 ?
412. Зі зміною температури на 300^0 опір мідного провідника став $22,9 \text{ Ом}$. Визначити початковий опір.

Рівень В

413. Ампер вважав, що електрика, зокрема електричний струм, позбавлені інертності. Чи мав рацію Ампер? Чому?
414. По срібному дроту, що має переріз 1 мм^2 , проходить струм 1 А . Обчислити середню швидкість дрейфу вільних електронів у цьому дроті, припустивши, що кожен атом срібла дає один вільний електрон.
415. Три провідники мають опори $0,7$; 1 ; 57 Ом . Побудувати вольт-амперну характеристику кожного провідника.

416. У 70-х роках ХХ ст. існували електронні обчислювальні машини, в яких імпульс струму від одного пристрою до іншого має передаватися за 10^{-9} с. Чи можна ці пристрої з'єднати дотиною завдовжки 40 см?
417. Алюмінієвий дріт при температурі 0° С має опір 4,25 Ом. Який опір матиме цей дріт при температурі 200° С?
418. Нитка вимкненої електричної лампочки має опір 60 Ом. Коли нитка повністю розжариться, вона має опір 636 Ом. Яка температура розжареної нитки?
419. Треба виготовити з дроту нагрівальний прилад, що має опір 48 Ом при температурі 800° С. Яку довжину повинен мати дріт, якщо його діаметр 0,5 мм, питомий опір $0,4 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, а температурний коефіцієнт опору $0,00025$ град $^{-1}$?

Рівень С

420. Біля поверхні металевого провідника існує подвійний електричний шар, що утворює систему на зразок зарядженого конденсатора. За рахунок чого виникає цей шар? Що править за додатну і від'ємну обкладки конденсатора, чим він є? Яке це має значення для проходження струму по провіднику?
421. У мідному провіднику довжиною 2 м і площею поперечного перерізу $0,4 \text{ мм}^2$ йде струм. При цьому щосекунди виділяється 0,35 Дж теплоти. Скільки електронів за 1 секунду проходить через поперечний переріз цього провідника?
422. По залізному провіднику, діаметр перерізу якого дорівнює 0,6 мм, тече струм силою 16 А. Визначити середню швидкість впорядкованого руху електронів, вважаючи, що концентрація вільних електронів дорівнює концентрації атомів провідника.
423. У мідному провіднику об'ємом 6 см^3 при проходженні по ньому постійного струму за 1 хвилину виділилось 216 Дж теплоти. Обчислити напруженість електричного поля в провіднику.

424. Термопара мідь-константан з опором 5 Ом приєднана до гальванометра, опір якого 100 Ом. Один спай термопари закручений в лід, що тане, інший - у гарячу рідину. Сила струму в колі дорівнює 37 мкА. Стала термопари – 43 мкВ/К. Визначити температуру рідини.
425. Сталевий і ніхромовий проводи при температурі 0°C мають опори відповідно 1 і 9 Ом. Визначити загальний температурний коефіцієнт кола, утвореного в результаті послідовного з'єднання цих проводів.

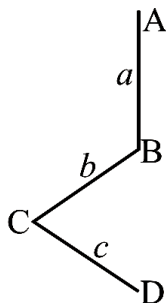
7.7.2. Електричний струм у розчинах, розплавах електролітів

Рівень А

426. Чому водний розчин цукру, а також спиртові розчини фарб – погані провідники електрики ?
427. У якому випадку небезпечніше доторкатися до проводів зі струмом: коли руки сухі чи коли вони мокрі?
428. При силі струму 1,6 А на катоді електролітичної ванни за 10 хвилин відклалася мідь масою 0,316 г. Визначити електрохімічний еквівалент міді за результатами досліду.
429. Скільки хвилин тривало покриття виробу шаром нікелю, якщо маса осілого на виробі нікелю 1,8 г при силі струму 2 А?
430. Якої сили струм проходив в електролітичній ванні при покритті виробу сріблом, якщо за 3,6 хв виділилось 210 мг срібла?
431. Щоб покрити цинком металеві вироби, в електролітичну ванну вставили цинковий електрод масою 10 г. Який заряд має пройти через ванну, щоб витратився весь електрод?

Рівень В

432. В електроліті в протилежних напрямках проходять струми позитивних і негативних іонів. Чому струмом в електроліті в будь-якому напрямі вважають суму цих двох струмів?
433. До яких пір може тривати електроліз мідного тросу, якщо електроди мідні? Вугільні?
434. Для покривання ложок сріблом пропускають через розчин солі срібла електричний струм силою 1,5 А протягом 6 годин. Як катод використовують 9 ложок, кожна з яких має площу поверхні 50 см². Яка товщина відкладеного срібла?
435. У ванні з мідним купоросом за 20 хвилин виділилося 1,98 г міді. Яка потужність струму витрачається на нагрівання електроліту, якщо опір електроліту у ванні 0,8 Ом?
436. Для електролітичного добування алюмінію використовують ванни, які працюють під напругою 5 В при силі струму 40 кА. За який час можна добути 1 т алюмінію і скільки при цьому витрачається електроенергії?
437. В електролітичній ванні, через яку проходить струм 2,5 А, протягом 20 хвилин виділилося 1017 мг двовалентного металу. Яку атомну масу він має?



Рівень С

438. Дві симетричні ванни з розчином сульфату міді (II) і нітрату срібла з'єднані послідовно. Чи однакова кількість міді і срібла виділиться у кожній ванні?
439. Вкажіть, в якому місці поверхні тіла (т. А, В, С чи D), що складається з пластин *a*, *b*, *c* (рис. 7.7.1) при нікелюванні його електричним способом буде виділятися найбільше атомів нікелю. Чому саме там?
- Рис.7.7.1.
440. Визначте кількість міді, що виділяється під час електролізу, якщо витрачено 18 МДж електроенергії. Напруга на клеммах ванни 10 В. ККД пристрою 75%.
441. За скільки часу виділиться 5 л водню при температурі 25⁰ С і під тиском 100 кПа під час електролізу? Електроліз

проводиться при напрузі 5 В, потужність і ККД установки дорівнюють відповідно 720 Вт і 75%.

442. Внаслідок електролізу сірчано-кислотного цинку протягом 1 години виділилося 2,448 г цинку. Напруга в мережі, до якої під'єднується електролітична ванна, на 6 В більша за ту, яка потрібна для нормального режиму у ванні. Який буде опір провідника, з'єданого послідовно з ванною, для зменшення напруги до потрібної величини?
443. Під час лудіння (покриття виробу оловом) густина струму дорівнює 1 А/дм^2 . Яка товщина олова осідає на виробі за 1 годину електролізу? Електрохімічний еквівалент олова дорівнює $0,62 \text{ мг/Кл}$.

7.7.3. Електричний струм у газах, вакуумі, напівпровідниках

Рівень А

444. Чим відрізняється самостійний розряд у газі від несамостійного?
445. До германію додали невелику кількість атомів миш'яку. Що і чому є основними носіями зарядів у такому напівпровіднику?
446. Для іонізації нейтральної молекули повітря електрон повинен мати енергію $2,4 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$. Яка має бути напруженість електричного поля, щоб електрон набув у ньому такої енергії? Вважати, що довжина вільного пробігу електрона дорівнює $5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$.
447. Скільки пар іонів виникає під дією іонізатора щосекунди в 1 см^3 розрядної трубки, в якій проходить струм насичення $2 \cdot 10^{-7} \text{ мА}$? Кожен плоский електрод має площу 1 дм^2 , а відстань між електродами 5 мм.
448. Магній і телур при температурі 20^0 С мають питомі опори відповідно $0,04 \cdot 10^{-6}$ і $5000 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Яка з цих двох речовин - напівпровідник?

449. Чому полярне сяйво можна спостерігати тільки у верхніх шарах земної атмосфери?
450. У діоді електрон підлітає до анода, маючи швидкість 8 Мм/с. Знайти анодну напругу. ($v_{0e} = 0$).

Рівень В

451. Пояснити явище ударної іонізації в газах.
452. Якщо заряджену скляну паличку потримати над запаленою спиртівкою, то вона швидко втратить свій заряд. Чому?
453. Яка відстань між частинами пристрою для утворення іонів, якщо площа кожної з них 100 см^2 і між ними проходить струм насичення $1 \cdot 10^{-10} \text{ А}$? Іонізатор утворює в 1 см^3 повітря $12,5 \cdot 10^6$ пар іонів за секунду.
454. Відстань між електродами в трубці, наповненій парами ртуті, дорівнює 10 см. Яка середня довжина вільного пробігу електрона, якщо самостійний розряд настає при напрузі 600 В? Енергія іонізації пари ртуті $1,7 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$. Електричне поле однорідне.
455. Яку енергію в джоулях набуває електрон, проходячи у вакуумі різницю потенціалів 1 В?
456. До кінців кола, що складається з послідовно ввімкнених термістора та резистора опором 750 Ом, подали напругу 20 В. При кімнатній температурі сила струму в колі була 10 мА. Коли термістор занурити у гарячу воду, сила струму стала 20 мА. У скільки разів змінився опір термістора?
457. Який питомий опір повинна мати домішка алюмінію в кремнії (за масою, у %), щоб концентрація дірок у ньому становила $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$? Припустити, що в утворенні дірки бере участь кожен атом алюмінію.

Рівень С

458. Якою має бути температура атомарного водню, щоб середня кінетична енергія поступального руху атомів була достатньою для іонізації під час зіткнення? Потенціал іонізації атомарного водню 13,6 В.

459. Апарат щосекунди утворює в 1 см^3 повітря $5 \cdot 10^5$ одновалентних іонів. Визначити роботу, необхідну для створення в 225 см^3 повітря вказаної концентрації іонів за час лікувального сеансу тривалістю 15 хв. Потенціал іонізації атомарного водню 13,6 В.
460. Сила струму, який проходить через електронно-променеву трубку, дорівнює 400 мкА, прискорююча напруга 2 кВ. Знайдіть силу тиску пучка на екран, припускаючи, що електрони поглинаються екраном.
461. В електронно-променевої трубці потік електронів із кінетичною енергією 8 кеВ рухається між пластинами плоского конденсатора завдовжки 4 см. Відстань між пластинами 2 см. Яку напругу потрібно подати на пластини конденсатора, щоб електронний пучок, вийшовши з конденсатора, змістився на 0,8 см?
462. У чистий напівпровідник (германій) додали 0,00001% атомів домішок (фосфор). Який тип провідності матиме напівпровідник? Якою стала концентрація вільних носіїв?
 Густина германію $5460 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, молярна маса $0,073 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$.
463. Фоторезистор, який у темряві має опір 25 кОм, ввімкнено послідовно з резистором, що має опір 5 кОм. Коли фоторезистор освітили, сила струму в колі (при тій самій напрузі) збільшилась у 4 рази. У скільки разів зменшився опір фоторезистора?

Розділ VIII. Задачі змістового модуля "Квазістаціонарні струми. Електромагнітні коливання і хвилі"

8.1. Основні співвідношення для розрахунків характеристик електромагнітних коливань і хвиль

Період коливань:

$$T = \frac{t}{N}, \quad (8.1.1)$$

де N – число повних коливань за час t .

Зв'язок між частотою ν і періодом T гармонічних коливань:

$$\nu = \frac{1}{T}, T = \frac{1}{\nu}. \quad (8.1.2.)$$

Циклічна частота коливань:

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}. \quad (8.1.3)$$

Рівняння гармонічних коливань заряду q і напруги на конденсаторі U в коливальному контурі:

$$q = q_m \cos\omega t, \quad U = U_m \cos\omega t. \quad (8.1.4)$$

Зв'язок між амплітудними значеннями заряду і напруги на конденсаторі під час коливань у контурі:

$$U_m = \frac{q_m}{C}, \quad (8.1.5)$$

де C – ємність конденсатора.

Період електричних коливань у коливальному контурі:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}, \quad (8.1.6)$$

де L і C – індуктивність контуру.

Рівняння коливань сили струму у коливальному контурі:

$$I = q' = -q_m \omega \sin \omega t. \quad (8.1.7)$$

Повна енергія коливального контуру:

$$W = \frac{CU_m^2}{2} = \frac{LI_m^2}{2}. \quad (8.1.8)$$

Коливання енергії електричного поля у коливальному контурі, якщо $q = q_m \cos(\omega t + \varphi_0)$:

$$W_{el} = W \cos^2(\omega t + \varphi_0), \quad (8.1.9)$$

де W – повна енергія.

Коливання енергії магнітного поля у коливальному контурі, якщо $q = q_m \cos(\omega t + \varphi_0)$:

$$W_{маг} = W \sin^2(\omega t + \varphi_0). \quad (8.1.10)$$

Миттєве значення змінного струму:

$$i = I_m \cos 2\pi \nu t, \quad (8.1.11)$$

де I_m – амплітудне значення сили змінного струму, ν – частота струму.

Діючі (ефективні) значення сили змінного струму, ЕРС і напруги:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad (8.1.12)$$

де I_m, E_m, U_m – амплітудні значення.

Середня потужність змінного струму, яка виділяється на активному опорі R :

$$P_{сеп} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (8.1.13)$$

або

$$P_{сеп} = \frac{I_m U_m}{2} = \frac{I_m^2 R}{2} = \frac{U_m^2}{2R}, \quad (8.1.14)$$

де I, U – діючі значення сили змінного струму і напруги; I_m, U_m – амплітудні значення.

Індуктивний опір:

$$X_L = \omega L, \quad (8.1.15)$$

де ω – циклічна частота, L – індуктивність.

Ємнісний опір:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, \quad (8.1.16)$$

де C – електроємність.

Повний опір кола змінного струму:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (8.1.17)$$

Закон Ома для кола змінного струму:

$$I_m = \frac{E_m}{Z}. \quad (8.1.18)$$

Закон Ома для діючих значень струму I і ЕРС ε в колі змінного струму:

$$I = \frac{\varepsilon}{Z}. \quad (8.1.19)$$

Співвідношення, за якими можна визначити зсув фаз між коливаннями сили струму і ЕРС у колі змінного струму:

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} \quad (8.1.20)$$

або

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (8.1.21)$$

Потужність у колі змінного струму:

$$P = I\varepsilon \cos\varphi, \quad (8.1.22)$$

де I, ε - діючі значення сили змінного струму і ЕРС, φ - зсув фаз між коливаннями сили струму і ЕРС.

Коефіцієнт трансформації:

$$k = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \approx \frac{U_1}{U_2}, \quad (8.1.23)$$

де N_1 і N_2 - число витків первинної і вторинної обмоток; ε_1 і ε_2 - ЕРС, що наводяться в обмотках; U_1 і U_2 - напруги в обмотках.

Зв'язок між напругою і струмом у первинній і вторинній обмотках трансформатора у випадку, коли втратами енергії можна знехтувати:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (8.1.24)$$

Коефіцієнт корисної дії трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1}, \quad (8.1.25)$$

де $P_1 \approx I_1 U_1$ - потужність, яка споживається в первинній обмотці,
 $P_2 \approx I_2 U_2$ - потужність у вторинній обмотці.

8.2. Приклади розв'язування задач змістового модуля "Квазістаціонарні струми. Електромагнітні коливання і хвилі"

Задача 1. Ємність конденсатора в коливальному контурі дорівнює 10 нФ, а напруга на ньому змінюється за законом $U = 80 \cos 10^4 \pi t$ (В). Знайти: 1) амплітуду, циклічну частоту і період коливань у контурі; 2) індуктивність контуру; 3) довжину електромагнітної хвилі, яка відповідає коливанням цього контуру.

Розв'язування

1. У загальному вигляді закон зміни напруги на обкладках конденсатора можна записати так:

$$u = U_m \cos \omega t,$$

де U_m – амплітудне значення напруги.

Порівнюючи останній вираз із виразом з умови, встановлюємо, що $U_m = 80$ В, $\omega = 10^4 \pi \text{ c}^{-1}$, або $\omega \approx 3,14 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$.

Оскільки циклічна частота ω , частота ν і період T зв'язані формулами $\omega = 2\pi\nu$ і $\omega = \frac{2\pi}{T}$, то:

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = 500 \text{ Гц}; \quad T = \frac{2\pi}{\omega} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}.$$

2. Індуктивність контуру знайдемо із формули:

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

звідси:

$$L = \frac{T^2}{4\pi^2 C} = 0,1 \text{ Гн}.$$

Перевіряємо розмірність:

$$[L] = \frac{c^2}{\Phi} = \frac{c^2}{\frac{K_{\text{л}}}{B}} = \frac{c^2 \cdot B}{A \cdot c} = \frac{c \cdot B}{A} = \text{Гн.}$$

3. Довжину хвилі, яку вимірює контур, можна знайти із формули:

$$\lambda = cT = 6 \cdot 10^4 \text{ м.}$$

Задача 2. Рамка площею 200 см^2 має 75 витків. Вона обертається в однорідному магнітному полі з індукцією 12 мТл. Амплітудне значення ЕРС дорівнює 3,6 В. У початковий момент площина рамки перпендикулярна до ліній магнітної індукції поля. 1. З якою частотою обертається рамка? 2. Якою буде ЕРС індукції через 2,6 мс? 3. Який вигляд матиме рівняння залежності ЕРС у рамці від часу?

Розв'язування

Рівняння залежності ЕРС у рамці має вигляд:

$$\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t,$$

де ε_m - максимальне значення ЕРС.

Відомо, що:

$$\varepsilon_m = BSN\omega,$$

де B – модуль вектора магнітної індукції; S – площа рамки; N – число витків у рамці.

З останнього виразу знаходимо циклічну частоту:

$$\omega = \frac{\varepsilon_m}{BSN} = 200 \text{ с}^{-1}.$$

Перевіряємо розмірність:

$$[\omega] = \frac{B}{T_{\text{л}} \cdot M^2} = \frac{\frac{T_{\text{л}}}{M^2} \cdot c}{T_{\text{л}} \cdot M^2} = c^{-1}.$$

Знаючи циклічну частоту, знаходимо частоту обертання:

$$\nu = \frac{\omega}{2\pi} = 32 \text{ Гц.}$$

Запишемо рівняння залежності, підставляючи в нього числові значення ε_m і ω :

$$\varepsilon = 3,6 \sin 200t.$$

За останньою формулою знаходимо ЕРС у рамці через час 2,6 мс:

$$\varepsilon = 3,6 \cdot \sin 0,52.$$

В останньому виразі під знаком синуса стоїть значення фази коливань (тобто деякого кута φ), виражене у радіанах: $\varphi = 0,52$. Виразимо кут φ у градусах. З курсу математики відомо, що кут у градусах:

$$\varphi^\circ = \frac{\varphi \cdot 180^\circ}{3,14} \approx 30^\circ.$$

Тоді:

$$\varepsilon = 3,6 \cdot \sin 30^\circ = 1,8 \text{ В.}$$

Задача 3. Знижувальний трансформатор з коефіцієнтом трансформації 5 увімкнено в коло з напругою 220 В. Який опір вторинної обмотки, якщо напруга на вході трансформатора 40 В, а опір корисного навантаження 40 Ом? Яка потужність витрачається на нагрівання вторинної обмотки? Яку потужність споживає трансформатор із мережі? Який ККД трансформатора?

Розв'язування

Коефіцієнт трансформації показує відношення діючих значень ε_1 і ε_2 або діючих значень напруг:

$$k = \frac{U_1}{U_2},$$

звідси:

$$U_2 = \frac{U_1}{k}.$$

Проте:

$$U_2 = U_2' + U_2'',$$

де $U_2' = I_2 R_2$ - спад напруги на виході трансформатора (на корисному навантаженні, під'єднаному до вторинної обмотки), $U_2'' = I_2 r_2$ - спад напруги на вторинній обмотці.

Тоді:

$$U_2 = U_2' + I_2 r_2,$$

звідки:

$$r_2 = \frac{U_2 - U_2'}{I_2},$$

Сила струму у вторинній обмотці:

$$I_2 = \frac{U_2'}{R_2},$$

отже:

$$r_2 = \frac{(U_2 - U_2')R_2}{U_2'} = \frac{(\frac{U_1}{k} - U_2')R_2}{U_2'} = 4 \text{ Ом.}$$

Потужність, яка витрачається на нагрівання вторинної обмотки:

$$P_{\text{втр}} = \frac{(U_2')^2}{r_2} = \frac{(U_2 - U_2'')^2}{r_2} = \frac{(\frac{U_1}{k} - U_2'')^2}{r_2} = 4 \text{ Вт.}$$

Повну потужність, яка виділяється у вторинній обмотці трансформатора, можна знайти за формулою:

$$P_2 = \frac{U_2^2}{R_2 + r_2}.$$

Якщо нехтувати втратами енергії при передачі енергії з первинної обмотки трансформатора у вторинну, то повна потужність, яка споживається у первинній обмотці, дорівнює потужності, що виділяється у вторинній обмотці:

$$P_1 = P_2.$$

Отже, трансформатор споживає з мережі потужність:

$$P_1 = \frac{U_2^2}{R_2 + r_2} = 44 \text{ Вт.}$$

Тоді ККД трансформатора:

$$\eta = \frac{P_k}{P} = \frac{P - P_3}{P} = 0,91 = 91\%.$$

Задача 4. Коливальний контур, що складається з повітряного конденсатора з двома пластинами по 200 см^2 кожна і котушки індуктивністю 1 мкГн , резонує на довжину хвилі 40 м . Визначити відстань між пластинами конденсатора.

Розв'язування

Скориставшись формулою ємності плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d},$$

знайдемо відстань між пластинами конденсатора:

$$d = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{C}.$$

Отже, задача зводиться до знаходження невідомої ємності C . Для цього запишемо дві формули для періоду електромагнітних коливань. За формулою Томсона:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}.$$

З іншого боку, період можна визначити через довжину хвилі і швидкість поширення електромагнітної хвилі у вакуумі:

$$T = \frac{\lambda}{c}.$$

Прирівнюємо праві частини двох останніх виразів:

$$2\pi\sqrt{LC} = \frac{\lambda}{c},$$

звідси знаходимо:

$$C = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 c^2 L}.$$

Після підставлення останнього виразу у формулу для знаходження відстані між пластинами конденсатора дістаємо:

$$d = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{C} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{\left(\frac{T^2}{4\pi^2 L}\right)} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{\left(\frac{\lambda^2}{4\pi^2 Lc^2}\right)} = \frac{4\pi^2 \varepsilon\varepsilon_0 S L c^2}{\lambda^2} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Перевіряємо одиницю одержаної величини:

$$[d] = \frac{\frac{\Phi \cdot m^2 \cdot \text{Гн} \cdot \frac{m^2}{c^2}}{m}}{m^2} = \frac{\Phi \cdot m \cdot \frac{c^2}{\Phi} \cdot \frac{m^2}{c^2}}{m^2} = m.$$

8.3. Задачі з теми "Електромагнітні коливання і хвилі"

8.3.1. Коливальний контур. Гармонічні коливання. Період, частота, амплітуда і фаза гармонічних коливань

Рівень А

464. Коливальний контур містить конденсатор ємністю 800 пФ і котушку індуктивністю 2 мкГн. Який період власних коливань контура?
465. Коливальний контур складається з лейденських банок загальною електроємністю $6 \cdot 10^{-3}$ мкФ та котушки індуктивністю в 11 мкГн. Визначити частоту електромагнітних коливань у контурі.
466. У радіотехніці застосовують струми частотою від $1 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^9$ нГц. Обчислити період цих струмів.
467. Заряд конденсатора коливального контуру змінюється за законом $q = 2 \sin 2 \cdot 10^5 \pi t$ мкКл. Визначити частоту і період електромагнітних коливань у контурі. Яка амплітуда значення заряду конденсатора?
468. Сила струму в коливальному контурі змінюється за законом $i = 0,25 \sin 10^5 \pi t$ А. Визначити амплітуду значення сили струму та період електромагнітних коливань у контурі.
469. Напряга на конденсаторі коливального контуру змінюється за законом $U = 50 \cos 10^5 \pi t$ В. Визначити амплітудне значення сили струму та періоду коливань у контурі.
470. Як слід змінити індуктивність котушки коливального контуру для збільшення періоду вільних електромагнітних коливань?
471. Де зосереджена енергія електричного поля під час електромагнітних коливань у коливальному контурі?

472. Як зміниться період вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі, якщо індуктивність котушки зменшити у 2 рази і у стільки ж разів збільшити ємність контуру?

Рівень В

473. Увімкнутий у коливальний контур повітряний конденсатор заповнений парафіном, діелектрична проникність якого дорівнює 2. У скільки разів змінилася частота вільних електромагнітних коливань у контурі?

474. Яка причина згасання вільних електромагнітних коливань, збуджених у коливальному контурі?

475. Як зміниться частота вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі, якщо ємність конденсатора збільшити в 10 разів, а індуктивність котушки зменшити у 5 разів?

476. Параметри двох коливальних контурів наступні: $C_1=160$ пФ, $L_1=5$ мГн і $C_2=100$ пФ, $L_2=4$ мГн. На скільки слід змінити ємність C_2 , щоб частота вільних електромагнітних коливань у них стала однакою?

477. Коливальний контур складається з котушки індуктивністю 10 мГн і плоского конденсатора з обкладками площею 5 см^2 кожна, розділених парафіновим папером завтовшки 100 мкм. Яка частота вільних електромагнітних коливань у контурі? Діелектрична проникність парафінового паперу дорівнює 2,2.

478. У коливальному контурі ємність конденсатора 4 мкФ, індуктивність котушки 1,6 Гн. Конденсатор зарядили до напруги 100 В. Знайти максимальну енергію електричного поля конденсатора та амплітудне значення сили струму в контурі під час вільних електромагнітних коливань.

479. Напруга на конденсаторі коливального контуру під час вільних електромагнітних коливань змінюється за законом $U=50\cos 10^3\pi t$ В. Ємність конденсатора 1 мкФ. Яке амплітудне значення заряду конденсатора? Який період коливань у контурі? Яка індуктивність котушки?

480. Коливальний контур складається з конденсатора ємністю 400 пФ і котушки індуктивністю 10 мГн. Визначити амплітудне значення сили струму під час вільних

електромагнітних коливань, якщо амплітудне значення напруги дорівнює 500 В.

481. Сила струму в коливальному контурі під час вільних електромагнітних коливань змінюється за законом $i = 0,2 \sin 10^3 \pi t$ А. Індуктивність котушки 0,15 Гн. Визначити період коливань у контурі, ємність конденсатора та амплітудне значення напруги на конденсаторі.
482. У коливальному контурі індуктивність котушки становить 0,2 Гн, а амплітуда сили струму дорівнює 40 мА. Визначити енергію електричного поля конденсатора і магнітного поля котушки в той момент, коли миттєве значення сили струму в 2 рази менше, ніж амплітудне значення.

Рівень С

483. Що треба зробити для збільшення частоти вільних електромагнітних коливань у коливальному контурі – збільшити чи зменшити площу перекривання частин його конденсатора змінної ємності?
484. Коливальний контур містить котушку з залізним осердям. Як зміниться частота вільних електромагнітних коливань у контурі, якщо вийняти осердя?
485. Як зміниться частота вільних електромагнітних коливань у контурі, якщо до нього приєднати ще один контур такої ж ємності паралельно? Послідовно?
486. Частота вільних електромагнітних коливань у контурі дорівнює 1,6 Гц. Під час цих коливань амплітудне значення напруги на контурі становить 2,5 В. Яке амплітудне значення магнітного потоку, що пронизує однакові витки котушки контуру, якщо вона їх нараховує 20?
487. Котушку індуктивністю 30 мГн приєднали до плоского конденсатора, площа кожної обкладки якого 20 см^2 і відстань між якими 1 см. Яка діелектрична проникливість середовища між обкладками, якщо під час вільних електромагнітних коливань амплітудні значення сили струму в котушці і напруги на конденсаторі відповідно дорівнюють 200 мкА, 10 В?

488. Коливальний контур складається з котушки індуктивністю 1 мГн , повітряного конденсатора, що має дві обкладки у вигляді дисків діаметром 20 см , кожна розміщена на відстані 1 см одна від одної. Визначити період вільних електромагнітних коливань у контурі. Якою буде сила струму у котушці в момент, коли енергія її магнітного поля становитиме 75% максимальної енергії електричного поля конденсатора за умови, що амплітудне значення напруги в контурі 10 В ?
489. Конденсатор коливального контуру має ємність 10 пФ . Під час вільних електромагнітних коливань амплітудне значення сили струму в котушці і напруги на контурі відповідно становлять 63 мА і 100 В . Яка частота цих коливань? Який заряд конденсатора у момент, коли сила струму у котушці становить $2/3$ від амплітудного значення?
490. Ємність конденсатора коливального контуру 200 нФ , частота вільних електромагнітних коливань 50 кГц , а амплітудне значення напруги на контурі 40 В . Знайти індуктивність котушки та амплітудне значення сили струму в ній. Записати рівняння зміни заряду конденсатора, якщо у початковий момент часу напруга мінімальна.
491. Заряд конденсатора ємністю 10 пФ коливального контуру під час вільних електромагнітних коливань змінюється за законом $q = I \sin 10^5 \pi t$ мкКл. Визначити період цих коливань. Яке амплітудне значення сили струму в котушці? Яка енергія електричного поля конденсатора в момент, коли сила струму у котушці становить половину її амплітудного значення?
492. Ємність конденсатора коливального контуру 400 нФ , частота вільних електромагнітних коливань 5 кГц . За яким законом змінюється напруга на конденсаторі, якщо амплітудне значення його заряду 8 мкКл ? Яка індуктивність котушки та яке амплітудне значення сили струму в ній? У початковий момент часу заряд конденсатора дорівнює 0 , і в подальшому він збільшується.
493. Заряджений конденсатор ємністю 1 мкФ під'єднали до котушки індуктивністю 10 мГн з активним опором 1 Ом . На

скільки відсотків зменшується за кожен період енергія вільних електромагнітних коливань у контурі? Вважайте частоту розглядуваних згасаючих коливань рівною з частотою незгасаючих гармонічних коливань.

8.3.2. Діючі значення

Рівень А

494. Визначити період та частоту змінного струму, кутова частота якого дорівнює 100π Гц.
495. З якою частотою має обертатися ротор генератора змінного струму (50 Гц), коли кількість пар полюсів дорівнює 1, 2, 3, 4, 6, 10?
496. ЕРС генератора змінного струму змінюється за законом $e=310\sin 100\pi t$ В. Знайти амплітуду і діюче значення ЕРС, частоту та період її зміни, а також ЕРС у момент часу 0,035 с.
497. Сила струму на ділянці кола змінюється за законом $i=10\sin 400\pi t$ А. Знайти амплітудне і діюче значення сили струму, період і частоту зміни сили струму, а також силу струму в момент часу 1,25 мс.
498. Напруга в мережі, що її виміряли вольтметром, становить 120 В. Чому дорівнює амплітудне значення напруги?
499. Діюча напруга в електроосвітлювальній мережі 220 В. На яку напругу треба розраховувати ізоляцію проводів?
500. Максимальне значення сили струму дорівнює 1,7 А. Визначити діюче значення.

Рівень В

501. Як відомо, графік залежності ЕРС від часу при рівномірному обертанні провідної рамки в однорідному магнітному колі є синусоїда. Як зміниться вигляд графіка, якщо частота обертання рамки збільшиться вдвічі?
502. Електроплитку можна живити як змінним, так і постійним струмом. Чи однаково розжарюється спіраль плитки, якщо в обох випадках вольтметри показали однакові напруги?

503. Знайти діюче значення ЕРС, яка індукується в рамці площею 100 см^2 , що обертається із частотою 50 Гц у магнітному полі з індукцією $0,2 \text{ Тл}$. Записати закон зміни ЕРС, що індукується в рамці, якщо в початковий момент площина рамки перпендикулярна до лінії індукції магнітного поля.

504. Скільки витків має рамка площею 500 см^2 , якщо під час обертання її з частотою 1200 об/хв у магнітному полі з індуктивністю 100 мТл у ній індукується ЕРС, амплітудне значення дорівнює 63 В ? Записати закон зміни ЕРС, якщо в початковий момент площина рамки перпендикулярна до лінії індукції.



505. На рис. 8.3.1 показано графік змінного струму частотою 1 кГц . Яка частота розгортки графіка?

506. Під час обертання дротяної рамки в однорідному магнітному полі магнітний потік, що пронизує Рис. рамку, змінюється за законом

8.3.1.

$\Phi = 0,01 \cos 10\pi t \text{ Вб}$. У якому положенні була рамка в початковий момент часу? Який вигляд має залежність ЕРС індукції від часу? Яка частота обертання рамки? Чому дорівнюють максимальні значення ЕРС та магнітного потоку?

507. У коло змінного струму з діючою напругою 220 В увімкнули активний опір 55 Ом . Визначити діюче та амплітудне значення струму.

508. У який момент часу від початку коливання ($I_0 = 0$) миттєве значення змінного струму дорівнює діючому?

Рівень С

509. Лампа і конденсатор увімкнуті послідовно в освітлювальну мережу змінного струму. Як зміниться свічення лампи, якщо до конденсатора приєднати ще один такий самий конденсатор?

510. В одну коробку помістили резистор, у другу конденсатор, а в третю – провідну котушку. Від кожного приладу зроблено виводи. Як, не відриваючи коробки, за допомогою джерела

сталої та змінної напруги і лампочки дізнатися, що міститься у коробках? ЕРС джерела постійного струму та діюче значення ЕРС джерела змінного струму, а також їх внутрішні опори однакові.

511. Під час руху трамваю зі схилу його двигуни не тільки не споживають електроенергію, а навпаки, передають її в лінію. Пояснити, чому це відбувається.
512. Напруга на електроплитці опором 60 Ом змінюється за законом $U=308\cos 100\pi t$ В. За яким законом змінюється сила струму, що протікає через плитку? За який проміжок часу воду об'ємом 2 л можна нагріти на цій плитці від 20°C до 100°C, якщо ККД плитки 40%?
513. Струм у колі змінюється з часом за законом $i = I_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{3}\right)$ А. Визначте циклічну частоту і амплітуду сили струму, якщо період змінного струму 0,02 с. Відомо, що через час 5 мс від початку коливань сила струму у колі дорівнює 0,25 А.
514. Неонова лампа запалюється з часом при напрузі 78 В. Цю лампу ввімкнено в коло змінної напруги 110 В, 60 Гц. Яка частота спалахів лампи? Який час горить лампа під час кожного періоду змінної напруги?
515. Неонова лампа запалюється і гасне при напрузі 80 В. У колі змінної напруги ця лампа горить половину періоду. Яку напругу покаже під'єднаний до цього кола вольтметр змінної напруги?
516. У колі змінного струму частотою 50 Гц діюча напруга дорівнює 120 В. Визначити час, протягом якого горить неонова лампа в кожний півперіод, якщо лампа запалюється та гасне при напрузі 84 В.

8.3.3. Активний опір, ємність, індуктивність у колі змінного струму. Закон Ома для електричного кола змінного струму. Потужність у колі змінного струму

Рівень А

517. Визначити ємнісний опір конденсатора, що має ємність 10 мкФ, коли частота змінного струму дорівнює 1 кГц і 1 МГц.
518. Яку ємність має батарея конденсаторів, якщо її опір у колі змінного струму з частотою 50 Гц дорівнює 40 Ом?
519. Визначити індуктивний опір котушки, яка має індуктивність 1 Гн, коли частота змінного струму становить 50, 400 Гц.
520. Котушка має індуктивний опір 35 Ом. Визначити індуктивність котушки, якщо циклічна частота змінного струму дорівнює 500 Гц.
521. Визначити повний опір кола змінного струму, коли в коло послідовно ввімкнено ділянки з такими даними: 1) $R=3$ Ом; $X_L=4$ Ом; 2) $R=6$ Ом; $X_C=8$ Ом; 3) $R=12$ Ом; $X_L=240$ Ом; $X_C=80$ Ом.
522. Визначити потужність у колі змінного струму, якщо напруга на його кінцях 220 В, а сила струму 2 А. Коефіцієнт потужності дорівнює 0,75.
523. Під час увімкнення електродвигуна в мережу змінного струму вольтметр показав 200 В, амперметр 7 А, а ватметр 900 Вт. Визначити коефіцієнт потужності.
524. Який коефіцієнт потужності має електрична лампа розжарювання, електроплитка, електропаяльник?

Рівень В

525. Ємність конденсатора вимірюють методом вольтметра і амперметра, які показують відповідно 12 ± 1 В і 15 ± 1 мА. Частота змінного струму 50 Гц. Визначити ємність конденсатора і оцінити похибку результатів.
526. Коло складається з послідовно з'єднаних опорів: активного – 18 Ом і ємнісного – 24 Ом. Визначити зсув фаз між коливаннями струму та напруги.

527. Індуктивний опір котушки в колі змінного струму з частотою 50 Гц, який виміряли методом заміщення, становить 31 ± 1 Ом. Визначити індуктивність котушки й оцінити похибку результату.

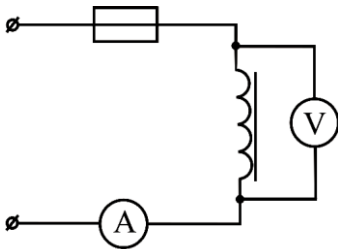


Рис. 8.3.2.

528. На рис. 8.3.2 зображено схему кола для непрямого вимірювання індуктивності котушки. Який результат вимірювання, якщо у випадку постійного струму $U_1=10$ В, $I_1=1$ А, а у випадку змінного $U_2=50$ В, $I_2=1$ А?

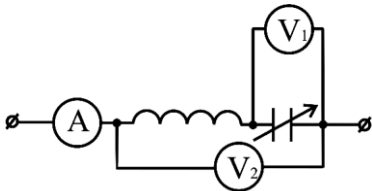
529. Визначити зсув фаз між коливаннями струму та напруги в колі, яке складається з послідовно з'єднаних опорів: $R=6$ Ом; $X_L=8$ Ом.
530. У коло змінного струму промислової частоти (50Гц) послідовно увімкнули конденсатор ємністю 135 мкФ і котушку. Напруга на цій ділянці кола дорівнює 220 В. Яка індуктивність котушки, якщо при цьому спостерігається резонанс? Який активний опір котушки, якщо при резонансі по ній протікає струм 1,1 А?
531. У коло змінного струму з частотою 500 Гц увімкнута котушка індуктивністю 10 мГн з малим активним опором. Конденсатор якої ємності слід увімкнути послідовно, щоб настав резонанс? Яке амплітудне значення сили струму, що протікає під час резонансу, якщо його ЕРС дорівнює 4,5 В, а внутрішній опір дорівнює 0,71 Ом?
532. Знайти реактивний опір кола, яке складається з котушки індуктивністю 2 Гн і конденсатора ємністю 2 мкФ, коли частота струму становить 50 Гц. Який кут зсуву між струмом і напругою – додатний чи від'ємний?
533. У колі змінного струму, частота якого становить 50 Гц, напруги дорівнюють $U_R=38,5$ В; $U_L=40$ В; $U_C=118,5$ В. Знайти напругу на затискачах кола, а також кут зсуву фаз між цією напругою і струмом, якщо R , L і C з'єднані послідовно.

534. Електричне коло складається з опорів: $R=4\text{ Ом}$ і $X_L=8\text{ Ом}$; $X_C=5\text{ Ом}$. До кінців кола прикладено змінну напругу мережі 120 В . Знайти струм у колі та напругу на ділянках.
535. Лічильник за 1 год показав витрату електроенергії $20\text{ кВт}\cdot\text{год}$, а амперметр через кожні 15 хв показував $70, 95, 80, 75\text{ А}$. Вольтметр показав 380 В . Знайти середнє значення $\cos\phi$.
536. Напруга на затискачах генератора змінного струму 220 В , струм у зовнішньому колі 10 А , а $\cos\phi=0,8$. Визначити повну потужність, що її споживає коло, а також активну та реактивну потужності.

Рівень С

537. У коло змінного струму напругою 120 В послідовно увімкнено провідник з активним опором 15 Ом і котушка індуктивністю 50 мГн . Знайдіть частоту струму, якщо амплітуда струму в колі дорівнює 7 А .

538. У послідовному коливальному контурі з параметрами $C=0,1\text{ мкФ}$, $L=0,001\text{ Гн}$ і $R=10\text{ Ом}$ діє зовнішня ЕРС з амплітудою 10 В . Яка частота цієї ЕРС, якщо амплітуда сили струму 1 А ?



539. У схемі на рис. 8.3.3 амперметр показує 3 А , а вольтметри $U_1=12\text{ В}$ і $U_2=24\text{ В}$.

Рис. 8.3.3.

- Знайдіть активний та індуктивний опори котушки, якщо коло знаходиться в режимі резонансу.
540. На ділянці кола ввімкнені послідовно резистор опором 80 Ом та котушка індуктивністю 50 мГн . До ділянки підведена змінна напруга 50 В частотою 400 Гц . Яка сила струму на ділянці кола і яка напруга на кожному з елементів? Яка потужність виділяється на резисторі?
541. У коло змінного струму частотою 1 кГц послідовно ввімкнено резистор опором 7 Ом , котушку індуктивністю 2 мГн та конденсатор ємністю 8 мкФ . Сила струму в колі

дорівнює 200 мА. Яка напруга на реактивному опорі? У скільки разів вона відрізняється від напруги на всіх елементах? Яка теплова потужність виділяється на резисторі?

542. У мережу змінного струму промислової частоти (50 Гц), що працює під напругою 220 В, увімкнено послідовно резистор, котушку індуктивністю 70 мГн і батарею конденсаторів ємністю 82 мкФ. Сила струму у колі при цьому 8,1 А. Який опір резистора? Яка напруга на реактивному опорі?
543. Котушка довжиною l і радіусом r має обмотку з N витків мідного дроту перерізом S_1 . Котушка ввімкнена в мережу змінного струму частотою ν . Знайти відношення активного та індуктивного опорів котушки до її повного опору.
544. Котушку з активним опором 15 Ом та індуктивністю 52 мГн увімкнено в коло стандартної частоти 50 Гц послідовно з конденсатором 120 мкФ. Напруга в колі 220 В. Визначте силу струму в колі, активну потужність і коефіцієнт потужності.

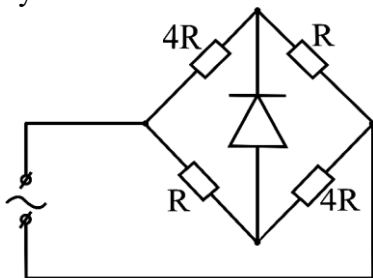


Рис.8.3.4.

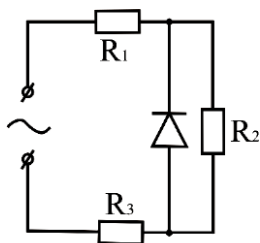


Рис.8.3.5.

545. Коло під'єднане до джерела змінної напруги 100 В (рис. 8.3.4). Яку потужність споживає коло, якщо R дорівнює 170 Ом?
546. Коло, зображене на рис. 8.3.5, споживає потужність 0,2 кВт. Знайти діюче значення напруги джерела, під'єданого до кола, якщо опори резисторів у колі дорівнюють: $R_1=R$, $R_2=3R$, $R_3=2R$, де $R=200$ Ом.

8.3.4. Трансформатор. Вироблення, передавання і використання електричної енергії

Рівень А

547. Первинна і вторинна обмотки трансформатора не перебувають у безпосередньому електричному контакті. Яким чином відбувається передача енергії електричного струму з першої у другу?
548. Чим знижувальний трансформатор відрізняється від підвищувального? Чи можна знижувальний конденсатор використати як підвищувальний?
549. Трансформатор у режимі холостого ходу все-таки споживає з електромережі потужність, хоч і вкрай малу. На що вона витрачається?
550. Під якою напругою перебуває первинна обмотка ненавантаженого трансформатора, що має 100 витків, якщо вторинна обмотка має 250 витків, а напруга на ній 550 В? Який коефіцієнт трансформації цього трансформатора?
551. Первинна обмотка ненавантаженого трансформатора перебуває під напругою 220 В. Напруга на вторинній обмотці, яка має 450 витків, становить 660 В. Який коефіцієнт трансформації в цьому випадку? Яка кількість витків у первинній обмотці?
552. Трансформатор має коефіцієнт трансформації 10. Яка напруга підведена до його первинної обмотки, якщо в режимі холостого ходу напруга на затискачах вторинної обмотки 22 В? Скільки витків у первинній обмотці, якщо у вторинній їх 100?
553. По лінії електропередачі передається потужність 15 кВт. Сила струму в лінії 10 А, а втрати потужності на нагрівання проводів становлять 2%. Який опір проводів лінії?
554. Втрати потужності у двопровідній лінії опором 2 Ом становлять 2%. У лінію передається потужність 2,5 кВт. Які втрати напруги на проводах лінії?
555. Від трансформаторної підстанції передається потужність 5 кВт. Сила струму в лінії електропередачі при цьому

становить 25 А. Який ККД лінії електропередачі, якщо її опір 0,5 Ом?

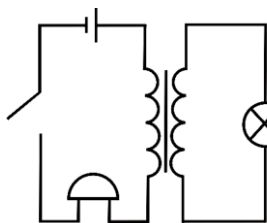
Рівень В

556. З якою метою у трансформаторах котушки первинної і вторинної обмоток одягають на замкнене феромагнітне осердя?
557. Обмотку підвищувального трансформатора зроблено із дроту різного діаметру. У якій із обмоток, первинній чи вторинній, діаметр дроту більший?
558. Що може трапитись, якщо трансформатор, призначений для експлуатації в мережі змінного струму 220 В, приєднати до джерела постійного струму такої ж напруги?
559. Первинну обмотку знижувального трансформатора з коефіцієнтом трансформації 8 увімкнено в мережу з напругою 220 В. Опір вторинної обмотки 2 Ом, а сила струму в ній 2 А. Визначити ЕРС, індуковану у вторинній обмотці, та напругу на навантаженні.
560. Підвищувальний трансформатор має коефіцієнт трансформації 0,5. Навантаження споживає потужність 190 Вт при силі струму 0,44 А. Опір вторинної обмотки дорівнює 30 Ом. Яка напруга підведена до первинної обмотки, якщо її опір вкрай малий? Яку потужність споживає трансформатор?
561. Трансформатор радіретранслятора навантажений 400 гучномовцями, кожен з яких споживає струм із силою 8,3 мА при напрузі 30 В. Напруга на його первинній обмотці дорівнює 480 В. Напруга на вторинній обмотці в режимі холостого ходу дорівнює 31 В. Який опір вторинної обмотки? Яка сила струму в первинній обмотці трансформатора?
562. Теплова електростанція на виробництво електроенергії 1 кВт/год витрачає умовне паливо масою 320 г. Який ККД електростанції? Питоме тепло згорання умовного палива 29 МДж/кг.

563. Електростанція передає потужність 2 ГВт під напругою 500 кВ. Знайти опір лінії електропередачі, якщо її ККД 96%.
564. Місцева електростанція передає в лінію потужність 500 кВт. Які втрати потужності в лінії та який її ККД, якщо вона працює під напругою 20 кВ, а її опір 20 Ом?

Рівень С

565. Чому осердя трансформаторів роблять не суцільним, а з листків трансформаторного заліза, покритих плівкою електроізолюючого матеріалу?
566. Чому при збільшенні сили струму у вторинному колі трансформатора внаслідок збільшення навантаження сила струму в його первинній обмотці також збільшується?



567. Чи можливе свічення лампочки після замикання ключа (див. рис. 8.3.6)?

568. Коефіцієнт трансформації підвищувального трансформатора дорівнює 0,5. Вторинна обмотка має опір 0,2 Ом, а опір навантаження 10,8 Ом. Напруга на навантаженні становить 216 В. Якою напругою живиться трансформатор? Яка сила струму в первинній обмотці? Який ККД трансформатора?

569. У первинній обмотці навантаженого трансформатора протікає струм із силою 0,37 А. Напруга на навантаженні 35 В, а сила струму в ньому 2,2 А. У режимі холостого ходу напруга на затискачах вторинної обмотки 37 В. Який коефіцієнт трансформації цього трансформатора? Який ККД трансформатора? Який опір вторинної обмотки?
570. Трансформатор живиться від мережі з напругою 380 В. Первинна обмотка трансформатора має 1320 витків. Вторинна обмотка опором 0,2 Ом навантажена опором 3,6 Ом, який споживає потужність 360 Вт. Яка ЕРС індукується у вторинній обмотці? Яка сила струму у первинній обмотці? Який ККД трансформатора?

571. Двопровідна лінія завдовжки 800 м від знижувального трансформатора виконана алюмінієвим проводом із площею поперечного перерізу 20 мм. Навантаження споживає потужність 2,6 кВт при напрузі 215 В. Яка ЕРС індукується у вторинній обмотці, якщо її опір 0,5 Ом? Які втрати потужності в лінії?
572. ЛЕП завдовжки 250 км перебуває під напругою 400 кВ і розрахована на передавання потужності 200 МВт. Втрати потужності в лінії не перевищують 10%. Алюмінієвий провід якого перерізу використовується в лінії?
573. Напруга на двопровідній лінії 220 В. Довжина лінії 175 м, і вона зроблена з алюмінієвого проводу площею поперечного перерізу 3,5 мм². Лінія навантаження споживачем потужністю 2,4 кВт. Яка сила струму в лінії? Які втрати напруги на лінії? Який її ККД?

8.3.5. Електромагнітні хвилі

Рівень А

574. Коли автомобіль проїжджає під залізобетонним мостом, його радіоприймач реєструє слабкий сигнал. Чому?
575. Чому для зв'язку з космічними станціями використовують ультракороткохвильове (УКХ) радіовипромінювання?
576. Чому радіолокатор випромінює радіохвилі не безперервно, а у вигляді коротких імпульсів?
577. Генератор УВЧ працює на частоті 150 МГц. Яка довжина хвилі електромагнітного випромінювання?
578. На якій частоті судна передають сигнал біди, коли за міжнародною угодою радіохвиля повинна мати довжину 600 м?
579. Сила струму у відкритому коливальному контурі змінюється із часом за законом $i = 100 \cos 6 \cdot 10^5 t$ мА. Яка довжина хвилі його випромінювання?
580. Ємність коливального контуру радіоприймача 20 пФ, а індуктивність його котушки 350 нГн. На яку довжину хвилі налаштований радіоприймач?

581. Телевізійний ретранслятор встановлено на супутнику, який рухається по коловій орбіті на висоті 36000 км над поверхнею Землі. Супутник розташований на одній вертикалі з приймальною антеною, яка у свою чергу розміщена поблизу антени передавача. За який проміжок часу сигнал поширюється від телецентру до телевізора?
582. У момент, коли відстань між Землею і Марсом була найменшою, на Марс із Землі було послано радіосигнал. Цей сигнал, відбившись від поверхні Марса, повернувся назад через 0,37 с. Яка мінімальна відстань між Землею і Марсом?

Рівень В

583. Чому електромережа змінного струму практично не випромінює електромагнітних хвиль (випромінювання можна вловити лише безпосередньо біля проводів мережі)?
584. У чому відмінність поширення радіохвиль на Місяці й на Землі?
585. Ручним налаштуванням радіоприймача змінюють площу перекривання пластин конденсатора змінної ємності у його коливному контурі. Як змінюється площа перекривання пластин при переході на прийом станції, що веде передачу на довгих хвилях?
586. У якому діапазоні довжин хвиль працює радіопередавач, коли ємність його коливального контуру можна змінювати від 60 до 240 пФ, а індуктивність становить 50 мкГн?
587. Котушка коливального контуру радіоприймача має індуктивність 200 мкГн. Приймач налаштований на хвилю довжиною 250 м. Яка ємність конденсатора коливального контуру радіоприймача?
588. Коливальний контур радіоприймача налаштований на довжину хвилі 300 м. Яка індуктивність коливального контуру, якщо його ємність 500 пФ?
589. Космонавт із космічного корабля послав два радіосигнали з перервою 4 год. На Землі сигнали було прийнято з перервою 14401 с. Із якою середньою швидкістю космонавт віддаляється від Землі?

590. Радіолокатор працює на хвилі завдовжки 20 см і випромінює імпульси тривалістю 20 нс кожний. Максимальна дальність виявлення цілі локатором 60 км. Скільки імпульсів упродовж 1 с випромінює локатор? Скільки електромагнітних коливань в одному імпульсі?
591. Радіолокатор працює на хвилі довжиною 15 см. Він випромінює щосекунди 4000 імпульсів, кожен із яких містить 4000 електромагнітних коливань. Яка тривалість імпульсу? Яка найбільша дальність локаційної розвідки?

Рівень С

592. Чому в одну і ту ж пору доби взимку радіоприймач краще приймає хвилі, ніж улітку? Чому в одну і ту ж пору року радіоприймач краще приймає хвилі вночі, ніж удень?
593. Під час Другої світової війни як засіб, що виводив із ладу радіолокаційну систему ворога, використовували алюмінієву фольгу (ту, в яку зазвичай загортають цукерки). Перед тим, як починати повітряну атаку, її у великій кількості висипали з літака поблизу цілі. Пояснити, чому радіолокатори знешкоджувалися.
594. Чому радіопередавачі короткохвильового діапазону, навіть маючи малу потужність, здатні забезпечити наддалекий зв'язок (наприклад, між населеними пунктами України і науково-дослідними станціями Антарктиди)?
595. Індуктивність коливального контуру передавача 560 нГн. У яких межах повинна змінюватися ємність конденсатора контуру, щоб передавач працював у діапазоні хвиль від 20 до 40 м?
596. Генератор електромагнітних хвиль випромінює хвилю довжиною 30 м. Якщо паралельно конденсатору його коливального контуру приєднати інший ємністю 30 нФ, то довжина хвилі випромінювання зросте вдвічі. Яка ємність конденсатора контуру?
597. Сила струму у відкритому коливальному контурі змінюється за законом $i = 200 \cos 5 \cdot 10^5 \pi t$ мА. Ємність конденсатора контуру 100 пФ. Яка довжина хвилі електромагнітного

випромінювання контуру? Яка індуктивність котушки, увімкненої в контур?

598. Енергія імпульсу радіолокатора дорівнює 20 мДж, а його тривалість 0,2 мкс. Яка середня потужність імпульсу? Яка середня потужність випромінювання цього радіолокатора, якщо максимальна дальність виявлення ним цілі становить 60 км? Яку енергію споживає передавач локатора впродовж 60 хв роботи, якщо потужність його вимірювання становить 4% від спожитої потужності?
599. Максимальна дальність виявлення цілі радіолокатором дорівнює 45 км, а мінімальна – 300 м. Передавач локатора споживає потужність 1 кВт і має ККД 3%. Яку енергію переносить одиничний імпульсний сигнал локатора? Яка потужність імпульсу? Яка тривалість горизонтальної розгортки електронно-променевої трубки локатора?
600. РЛС працює на хвилі довжиною 3 см і випромінює щосекунди 1000 імпульсів. Потужність одного імпульсу 700 кВт, а його тривалість 0,3 мкс. Передавач станції споживає потужність 2,3 кВт. Визначити: енергію одного імпульсу; середню корисну потужність станції; просторову протяжність одного імпульсу (довжину в напрямку поширення). Який ККД передавача локатора?

ДОДАТКИ

Таблиця 1. Основні фізичні сталі

Величина	Позначення	Числове значення
Стала Больцмана	k	$1,38066 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Швидкість світла у вакуумі	c	$2,99792458 \cdot 10^8$ м/с
Стала Планка	h	$6,6261 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Стала Авогадро	N_A	$6,0220943 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Гравітаційна стала	γ	$6,6720 \cdot 10^{-11}$ Н·м ² /кг ²
Стала Фарадея	F	$9,648456 \cdot 10^4$ Кл/моль
Заряд електрона	e	$1,6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл
Маса спокою електрона	m_e	$0,9109534 \cdot 10^{-30}$ кг
Питомий заряд електрона	e/m_e	$1,758804 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Електрична стала	ϵ_0	$8,85418782 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнітна стала	μ_0	$1,25663706144 \cdot 10^{-6}$ Гн/м
Радіус електрона	r_e	$2,8179380 \cdot 10^{-15}$ м
Магнетон Бора	μ_B	$9,274078 \cdot 10^{-24}$ А·м ²
Магнітний момент електрона	μ_e	$9,284832 \cdot 10^{-24}$ А·м ²
Електрон-вольт	eВ	$1,60202 \cdot 10^{-19}$ Дж

Таблиця 2. Основні формули електромагнетизму в СІ

Назва	СІ
Поле E точкового заряду	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$
Поле E в плоскому конденсаторі і біля поверхні провідника	$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0\epsilon}$
Потенціал поля точкового заряду	$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$
Зв'язок між E і φ	$\vec{E} = -\nabla\varphi; \quad \varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E dl$

Циркуляція вектора \vec{E} в електростатичному полі	$\oint \vec{E} d\vec{l} = 0$
Електричний момент диполя	$\vec{p} = q\vec{l}$
Електричний диполь \vec{p} в полі \vec{E}	$\vec{F} = \vec{p} \frac{\partial \vec{E}}{\partial l}, \quad \vec{M} = [\vec{p}\vec{E}], \quad W = -pE$
Зв'язок між поляризованістю і напруженістю	$\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E}$
Зв'язок між σ' , \vec{P} і \vec{E}	$\sigma' = P_n = \chi \varepsilon_0 E_n$
Визначення вектора \vec{D}	$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$
Зв'язок між ε і ε	$\varepsilon = 1 + \varepsilon$
Зв'язок між \vec{D} і \vec{E}	$\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$
Теорема Гауса для вектора \vec{D}	$\oint \vec{D} d\vec{S} = q$
Ємність конденсатора	$C = \frac{q}{U}$
Ємність плоского конденсатора	$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{h}$
Енергія системи зарядів	$W = \frac{1}{2} \sum q_i \varphi_i$
Повна енергія взаємодії	$W = \frac{1}{2} \int \rho \varphi dV$
Енергія конденсатора	$W = qU/2 = CU^2/2 = q^2/2C$
Густина енергії електричного поля	$\vec{w} = \frac{\vec{E}\vec{D}}{2}$
Рівняння неперервності	$\int j dS = -\frac{dq}{dt}, \quad \nabla \cdot \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$
Закон Ома	$RI = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}, \quad \vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{E}^*)$
Закон Джоуля-Ленца	$Q = RI^2, \quad Q_{II} = \rho j^2$
Сила Лоренца	$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}\vec{B}]$

Поле \vec{B} рухомого заряду	$\vec{B} = \frac{\mu_0 q}{4\pi r^3} [\vec{q}\vec{r}]$
Закон Біо-Савара	$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{[\vec{j}\vec{r}]}{r^3} dV$ $d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^3} [d\vec{l}, \vec{r}]$
Поле \vec{B} : а) прямого струму б) у центрі витка в) у соленоїді	$B = \frac{\mu_0 2I}{4\pi d}$ $B = \frac{\mu_0 2\pi I}{4\pi R}$ $B = \mu_0 nI$
Закон Ампера	$d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}]$ $d\vec{F} = [\vec{j}\vec{B}] dV$
Сила взаємодії паралельних струмів	$F_{od} = \frac{\mu_0 2I_1 I_2}{4\pi b}$
Магнітний момент контуру зі струмом	$p_m = IS$
Магнітний диполь p_m у полі B	$\vec{F} = p_m \frac{\partial \vec{B}}{\partial n}, \quad \vec{M} = [\vec{p}_m \cdot \vec{B}]$
Робота з переміщення контуру зі струмом	$A = I(\Phi_2 - \Phi_1)$
Циркуляція намагніченості	$\oint jdl = I'$
Визначення вектора \vec{H}	$\vec{H} = \vec{B} / \mu_0 - \vec{j}$
Циркуляція вектора \vec{H} у стаціонарному полі	$\oint \vec{H} d\vec{l} = I$
Зв'язок між: \vec{J} і \vec{H} μ і ϵ \vec{B} і \vec{H}	$\vec{J} = \epsilon \vec{H}$ $\mu = 1 + \epsilon$ $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$

Закон перетворення полів \vec{E} і \vec{B} при $v_0 \ll c$	$\vec{E}' = \vec{E} + [\vec{v}_0 \vec{B}]$ $B' = B - \frac{1}{c^2} v_0 E $
Інваріанти електромагнітного поля	$\vec{E}\vec{B} = in\vartheta$ $E^2 - c^2 B^2 = inv$
ЕРС індукції	$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$
Індуктивність	$L = \Phi / I$
Індуктивність соленоїда	$L = \mu\mu_0 n^2 V$
ЕРС самоіндукції	$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}$
Енергія магнітного поля струму	$W = \frac{LI^2}{2}$
Густина енергії магнітного поля	$\vec{w} = \frac{\vec{B}\vec{H}}{2}$
Густина струму зміщення	$\vec{j}_{cm} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$
Рівняння Максвелла в інтегральній формі	$\oint \vec{E} d\vec{l} = -\int \vec{B} d\vec{S}$ $\oint \vec{D} d\vec{S} = \int \rho dV$ $\oint \vec{H} d\vec{l} = \int (\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) d\vec{S}$ $\oint \vec{B} d\vec{S} = 0$

Рівняння Максвела в диференційованій формі	$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ $\nabla \cdot \vec{D} = \rho$ $\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ $\nabla \cdot \vec{B} = 0$
Зв'язок між E і H в електромагнітній хвилі	$E\sqrt{\epsilon\epsilon_0} = H\sqrt{\mu\mu_0}$
Вектор Пойнтінга	$\vec{S} = [\vec{E}\vec{H}]$
Щільність імпульсу електромагнітного поля	$\vec{G} = \frac{1}{c^2} [\vec{E}\vec{H}]$

Таблиця 3. Діелектричні проникності деяких речовин при 20 °С

Речовина	ϵ	Речовина	ϵ
<i>Гази</i>		<i>Тверді тіла</i>	
Азот	1,00060	Капрон	3,6-5,0
Водень	1,00027	Мармур	8,0-10,0
Повітря	1,00058	Плексиглас	3,0-3,6
Кисень	1,00055	Поліхлорвініл	3,0-5,0
Вуглекислий газ	1,00096	Поліетилен	2,2-2,4
<i>Рідини</i>		Слюда	4,0-8,0
Вода	81,0	Скло звичайне	5,0-10,0
Гліцерин	39,1	Текслогіл	7,0
Спирт етиловий	25,0	Титанат барію	1200
Скипидар	2,2	Фарфор	4,4-6,8

Таблиця 4. **Питомий опір деяких твердих тіл ρ , Ом · м, при 20°C і температурний коефіцієнт опору α , K⁻¹**

Речовина	$\rho \cdot 10^8$	$\alpha \cdot 10^3$	Матеріал	$\rho \cdot 10^8$	$\alpha \cdot 10^3$
Срібло	1,60	4,1	<i>Сплави</i>		
Мідь	1,67	4,3			
Золото	2,22	4,1	Константан (Cu 58%, Ni 40%, Mn 1,2%)	50,0	0,002
Алюміній	2,90	4,7			
Вольфрам	5,50	4,8			
Нікель	6,84	6,0	Манганін (Cu 85%, Ni 3%, Mn 12%)	43,0	0,02
Залізо	9,71	6,5			
Платина	10,70	3,9			

Таблиця 5. **Питомий опір і відносна діелектрична проникність деяких діелектриків**

Речовина	ρ , Ом см	ϵ	Речовина	ρ , Ом см	ϵ
Папір	10^{13}	2	Скло	10^{13}	6
Гетинакс	10^{10}	5	Текстоліт	10^9	
Кварц	10^{14}	4	Фарфор	10^{15}	6
Кераміка	10^{11}	10	Ебоніт	10^{15}	2,7
Парафін	$3 \cdot 10^{18}$	2	Бензин	10^{12}	2
Плексиглас	10^{13}	3,5	Вода дистильована	10^5	81
Полістирол	10^{18}	3,5	Масло		
Поліетилен	10^{16}	2,3	трансформаторне	10^{12}	2,2
Слюда	10^{16}	6	Повітря	10^{16}	1

Таблиця 6. Допустимі сили струму в ізолюваному проводі при тривалій роботі

Речовина	Площа перерізу, мм ²							
	1	1,5	2,5	4	6	10	16	25
	Допустима сила струму, А							
Мідь	11	14	20	25	31	43	75	100
Алюміній	8	11	16	20	24	34	60	80
Залізо	-	-	8	10	12	17	30	-

Таблиця 7. Питома електропровідність водних розчинів електролітів $\sigma \cdot 10^2, \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{ м}^{-1}$ при 18 °С

Концентрація, %	NaCl	CuSO ₄	AgNO ₃	KOH	H ₂ SO ₄
5	0,067	0,0189	0,0256	0,172	0,209
10	0,121	0,0320	0,0476	0,315	0,392
15	0,164	0,0421	0,068	0,425	0,543
20	0,196	-	0,087	0,499	0,653
25	0,214	-	0,106	0,540	0,717
30	-	-	0,124	0,542	0,740
35	-	-	0,141	0,509	0,724
40	-	-	0,157	0,450	0,680

Таблиця 8. Електрохімічні еквіваленти речовин

Аніони	Електрохімічний еквівалент, мг/Кл	Маса речовини, що виділяється, 1 А·год·г	Катіони	Електрохімічний еквівалент, мг/Кл	Маса речовини, що виділяється, 1 А·год·г
Cl^-	0,367	1,32	Ag^+	1,1180	4,025
NO_3^-	0,643	2,31	Au^{3+}	0,683	2,451
O^{2-}	0,0829	0,293	Cu^{2+}	0,329	1,19
OH^-	0,177	0,635	H^+	0,01045	0,0376
SO_4^{2-}	0,499	1,79	Hg^{2+}	2,079	7,48
CO_3^{2-}	0,311	1,12	Ni^{3+}	0,203	0,73
			Pb^{2+}	1,074	3,87
			Zn^{2+}	0,339	1,22

Таблиця 9. Термо-ЕРС мідь-константової термопари, мкВ;
холодний спай при $t = 0^\circ C$

t, °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0	0	389	787	1194	1610	2035	2467	2908	3357	3813	4277
100	4277	4749	5227	5712	6204	6703	7208	7719	8236	8759	9288
200	9888	9823	10363	10909	11459	12015	12575	13140	13710	14285	14864

Таблиця 10. Точка Кюрі

Речовина	Точка Кюрі, К	
	Верхня	Нижня
Сегнетоелектрики		
Метатитанат барію	373	
Сегнетова сіль	295,5	258,0
Феромагнетики		
Залізо	1043	
Залізо кремнисте (4,3% Si)	963	
Кобальт	1403	
Нікель	631	
Пермалой(22% Fe, 78% Ni)	823	
Магнетит Fe ₃ O ₄	845	
Сплав Гейслера (61% Cu, 26% Mn, 13% Al)	603	

Таблиця 11. Робота виходу електронів із металу

Метал	W, eB	Метал	W, eB
Алюміній	4,3	Мідь	4,4
Вольфрам	4,6	Нікель	4,5
Залізо	4,3	Платина	5,3

Таблиця 12. Питоме магнітне сприйнятливості речовини

Речовина	$\alpha, 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}$	Речовина	$\alpha, 10^{-9} \text{ м}^3/\text{кг}$
Алюміній	7,5	Парафін	-7,5
Вісмут	-17,3	Платина	12,3
Вода	-9,0	Срібло	-2,5
Вольфрам	3,8	Скло	-12,6
Золото	-1,9	Цинк	-1,8
Мідь	-1,1		

Таблиця 13. Властивості феромагнітних матеріалів

Матеріал	Склад(%), останні заліза і домішки	Відносна початкова проникність	Відносна максимальна проникність	Коерцитивна сила, А/м	Індукція насиченості, Тл
Залізо чисте	0,05	10000	200000	4	2,15
Залізо технічне	0,2	150	5000	80	2,15
Сталь м'яка	0,2С	120	2000	140	2,12
Пермалой	78,5Ni	8000	100000	4	1,08
Пермендюр	50Со	800	5000	160	2,45
Кобальт	99Со	70	250	800	1,79
Нікель	99Ni	110	600	56	0,61
Ферит	Ni-Zn	1000	2000	8	0,25
Армко		2500	5200	120	2,15
Платина-кобальт	77Pt, 23Со			320000	

Таблиця 14. Десяткові префікси до назви одиниць

Т – тера, 10^{12}	да – дека, 10^1	н – нано, 10^{-9}
Г – гіга, 10^9	д – деци, 10^{-1}	п – піко, 10^{-12}
М – мега, 10^6	с – санті, 10^{-2}	ф – фемто, 10^{-15}
к – кіло, 10^3	м – мілі, 10^{-3}	а – атто, 10^{-18}
г – гекто, 10^2	мк – мікро, 10^{-6}	

Література

1. Ахиезер А.И. Общая физика. Электрические и магнитные явления: Справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1981. – 472 с.
2. Богацька І.Г., Головка Д.Б., Маляренко А.А., Ментковський Ю.Л. Загальні основи фізики: Електродинаміка. Атомна та субатомна фізика. – Київ: Либідь, 1998. - 224 с.
3. Бугайов О.І., Закота Л.А., Костюкевич Д.Я., Мартинюк М.Т. Програми для загальноосвітніх навчальних закладів. Фізика 7-11 класи// Шкільний світ. – 2001. - № 106-107. – С.3-96.
4. Бугайов О.І., Закота Л.А., Коваль В.С., Самсонова Г.В. Програми середньої загальноосвітньої школи. Фізика, астрономія 7-11 класи. – Київ: Освіта, 1992. – 111 с.
5. Бушок Г.Ф., Колупаєв Б.С. Науково-методичні основи викладання загальної фізики. – Рівне: Діва, 1999. – 410 с.
6. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики. Кн.1 Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – Київ: Либідь, 2001. – 448 с.
7. Гершензон Е.М., Малов Н.Н. Курс общей физики: Электродинамика. – М.: Просвещение, 1990. – 319 с.
8. Головка Г.Б., Маляренко А.А., Ментковський Ю.Л., Загальні основи фізики: електродинаміка: Навчальний посібник. – Київ : Либідь, 1994. – 128 с.
9. Гончаренко С.У. Фізика 10. – Київ: Освіта, 1995. – 430 с.
10. Гончаренко С.У. Фізика 11. – Київ: Освіта, 1995. – 448 с.
11. Демонстраційний експеримент з фізики: Навчальний посібник/ За ред. Шута М.І та Бикова В.Ю. – Київ: НПУ ім. М.П.Драгоманова, 2003. – 237 с.
12. Дем'янюк Б.П. Деякі аспекти кредитно-модульного навчання фізики: Методичний посібник. – Рівне: РДГУ, 2005. – 57 с.
13. Дем'янюк Б.П., Панасюк А.Л., Панченко М.С. Класична електродинаміка. Частина 1. Електростатика: Методичні поради. – Рівне: РДП, 1999. – 21 с.
14. Загальна фізика: Лабораторний практикум/ За заг. ред. І.Т. Горбачука. – Київ: Вища школа, 1992. – 509 с.
15. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. – М.: Высшая

- школа, 1991. – 288 с.
16. Калашников С.Г. Электричество. – М.: Наука, 1985. – 576 с.
 17. Козлов В.И. Общий физический практикум. Электричество и магнетизм. – М.: Изд-во МГУ, 1987. – 270 с.
 18. Колупасв Б.С. Релаксационные и термические свойства наполненных полимерных систем: Практикум. – Львов: Вища школа, 1980. – 204 с.
 19. Колупасв Б.С. Физико-химия полимеров: Практикум. – Львов: Вища школа, 1978. – 160 с.
 20. Колупасв Б.С., Дем'янюк Б.П., Панасюк А.Л., Панченко М.С. Електродинаміка суцільних середовищ. Макроскопічне поле в речовині як усереднене мікроскопічне. Рівняння Максвелла-Лоренца. – Рівне: РДГУ, 2002. – 34 с.
 21. Колупасв Б.С., Ліпатов Ю.С., Бордюк М.А., Дем'янюк Б.П. Вивчення полімерних матеріалів у загальноосвітній школі: Навчальний посібник. – Рівне: РДПІ, 1993. – 92 с.
 22. Колупасв Б.С., Панасюк А.Л., Мосієвич О.С., Панченко М.С., Дем'янюк Б.П. Загальна фізика. Електрика і магнетизм: Методичні поради до практичних занять та організації самостійної роботи. – Рівне: РДПІ, 1992. – 184 с.
 23. Колупасв Б.С., Панасюк А.Л., Мосієвич О.С., Панченко М.С., Дем'янюк Б.П. Загальна фізика. Електрика і магнетизм, оптика, атомна та ядерна фізика: Методичні поради. Рівне: РДПІ, 1991. – 93 с.
 24. Комке Д., Кремер К. Физические основы единиц измерения. – М.: Мир, 1980. – 208 с.
 25. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальна фізика. Електрика і магнетизм. – Київ: Вища школа, 1990. – 367 с.
 26. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики Т.2. Електрика і магнетизм. – Київ: Техніка, 2006. – 452 с.
 27. Кучерук І.М., Дущенко В.П., Андріанов В.М. Обробка результатів фізичних вимірювань. - Київ: Вища школа, 1981. – 216 с.
 28. Парселл Э. Электричество и магнетизм. – М.: Наука, 1983. – 416 с.
 29. Сивухин Д.В. Электричество. – М.: Наука, 1983. – 688 с.

30. Січкара Т.Г. Електрика і магнетизм. Модуль № 1. Електростатика. – Київ: НПУ ім. М.П.Драгоманова, 2004. – 109 с.
31. Січкара Т.Г. Електрика і магнетизм. Модуль № 2. Постійний струм. – Київ: НПУ ім. М.П.Драгоманова, 2004. – 122 с.
32. Савельев И.В. Курс общей физики. Т.2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.:Наука, 1982. – 496 с.
33. Сусь Б.А., Шут М.І. Проблеми дидактики фізики у вищій школі.– Київ: ВЦ "Просвіта", 2003. – 155 с.
34. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1976. – 616 с.
35. Фізичний практикум: В 2 ч./ За ред. В.П. Дуценка. – Київ: Вища школа, 1983.
36. Чолпан П.П. Фізика: Підручник. – Київ: Вища школа, 2004. – 567 с.
37. Шут М.І., Сташкевич О.М., Касперський А.В., Січкара Т.Г. Електрика та магнетизм: Навчально-методичний посібник для самостійної роботи. – Київ: НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2002. – 236 с.
38. Элементарный учебник физики. Т. II. Электричество и магнетизм/ Под ред.. Г.С. Ландсберга. – М.: Наука, 1985. – 480 с.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Розділ I. Статистичний аналіз результатів експерименту	
1.1. Випадкові величини	6
1.2. Визначення похибок.....	8
1.3. Обробка результатів експерименту	11
1.4. Аналітичні і графічні методи обробки дослідних даних.....	16
Розділ II. Електричні величини та їх вимірювання	
2.1. Одиниці вимірювання електричних величин (система СІ).....	18
2.2. Прилади для вимірювання електричних величин	19
Розділ III. Лабораторні роботи змістового модуля "Електростатика. Постійний струм"	
3.1. Дослідження електростатичного поля.....	31
3.2. Визначення заряду краплини рідини.....	37
3.3. Перевірка теореми Остроградського-Гаусса для електростатичного поля.....	43
3.4. Визначення ємності конденсатора і діелектричної проникливості середовища методом порівняння.....	48
3.5. Вивчення діелектричних властивостей сегнетоелектриків.....	54
3.6. Вимірювання опору провідника за допомогою містка постійного струму і визначення температурного коефіцієнта опору металів	63
3.7. Визначення електрорушійної сили джерела струму методом компенсації	70
3.8. Вивчення законів Кірхгофа	76
Розділ IV. Лабораторні роботи змістового модуля "Електричний струм у різних середовищах"	
4.1. Дослідження температури залежності опору напівпровідників та визначення енергії активації.	80
4.2. Градування термопари. Дослідження термоелектричних явищ.....	85
4.3. Дослідження явища термоелектронної емісії.	92

4.4. Зняття анодної і сіткової характеристик електронних ламп.....	98
4.5. Вивчення процесів електролізу.	102
4.6. Дослідження термоелектронної і концентраційної залежності опору електролітів.....	106

Розділ V. Лабораторні роботи змістового модуля "Магнітне поле. Магнітні властивості речовини"

5.1. Дослідження силових характеристик магнітного поля.....	110
5.2. Визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі.....	116
5.3. Визначення питомого заряду електрона за допомогою магнетрона.....	121
5.4. Вивчення ефекту Холла	135
5.5. Використання ефекту Холла для вивчення розподілу 129магнітного поля вздовж осі соленоїда	138
5.6. Зняття кривої намагнічення і петлі гістерезису феромагнетиків.....	147
5.7. Визначення точки Кюрі феромагнітних сплавів металів.....	152

Розділ VI. Лабораторні роботи змістового модуля "Електромагнітна індукція. Квazистаціонарні струми. Електромагнітні коливання і хвилі"

6.1. Дослідження роботи однофазного трансформатора	156
6.2. Вивчення процесів зарядки і розрядки конденсатора.....	161
6.3. Вимірювання великих опорів.....	167
6.4. Визначення ємності конденсаторів за допомогою містка Сотті.....	171
6.5. Визначення активного опору, індуктивності і ємності в колі змінного струму	177
6.6. Вимірювання потужності і зсуву фаз за допомогою ватметра .	182
6.7. Вивчення резонансу напруг.....	187
6.8. Вивчення резонансу струмів	191
6.9. Вивчення загасаючих електромагнітних коливань	199
6.10. Вивчення вимушених коливань	208
6.11. Дослідження релаксаційних коливань.....	212

Розділ VII. Задачі змістовних модулів "Електростатика. Постійний струм", "Електричний струм у різних середовищах", "Магнітне поле. Магнітні властивості речовини"

7.1. Основні співвідношення для розрахунків основних характеристик електричних і магнітних полів	212
7.2. Приклади розв'язку задач змістових модулів	222
7.3. Задачі з теми "Електричне поле"	230
7.3.1. Закон збереження заряду. Точковий і розподілений заряд. Закон Кулона	230
7.3.2. Напруженість електричного поля.....	233
7.3.3. Провідники та діелектрики в електричному полі	236
7.3.4. Робота електричного поля при переміщенні заряду.....	240
7.3.5. Електроємність конденсатора. Енергія зарядженого конденсатора. Енергія електричного поля	244
7.4. Задачі з теми "Закони постійного струму".....	247
7.4.1. Струм у провіднику. Закон Ома для ділянки кола з послідовним і паралельним з'єднанням провідників	247
7.4.2. ЕРС. Закон Ома для повного кола	253
7.4.3. Правила Кірхгофа. Розрахунок розгалужених електричних кіл	257
7.4.4. Робота й потужність постійного струму	260
7.5. Задачі з теми "Магнітне поле".....	264
7.5.1. Магнітне поле струму. Магнітна індукція. Сила Ампера	264
7.5.2. Магнітний потік. Сила Лоренца	268
7.5.3. Рух електричних зарядів в електричних і магнітних полях.....	271
7.6. Задачі з теми "Електромагнітна індукція"	274
7.6.1. Електромагнітна індукція. ЕРС індукції.....	274
7.6.2. Закон електромагнітної індукції. Правило Ленца. Самоіндукція. Індуктивність	278
7.6.3. Енергія магнітного поля. Густина енергії.....	282
7.7. Задачі з теми "Електричний струм у різних середовищах".....	285
7.7.1. Основні положення електронної теорії провідності металів. Залежність опору металевих провідників від температури.....	285
7.7.2. Електричний струм у розчинах, розплавах електролітів	287

Розділ VIII. Задачі змістового модуля "Квазістаціонарні струми. Електромагнітні коливання та хвилі"

8.1. Головні співвідношення для розрахунків характеристик електромагнітних коливань і хвиль	292
8.2. Приклади розв'язку задач змістового модуля "Квазістаціонарні струми. Електромагнітні коливання і хвилі"	295
8.3. Задачі з теми "Електромагнітні коливання та хвилі"	300
8.3.1. Коливальний контур. Гармонічні коливання. Період, частота, амплітуда і фаза гармонічних коливань.....	300
8.3.2. Діюче значення.....	304
8.3.3. Активний опір, ємність, індуктивність у колі змінного струму. Закон Ома для електричного кола змінного струму. Потужність у колі змінного струму	307
8.3.4. Трансформатор. Вироблення, передавання і використання електричної енергії.....	311
8.3.5. Електромагнітні хвилі.....	314
Додатки	318
Література	328

Навчальний посібник

Колупаєв Борис Сергійович
Бордюк Микола Анатолійович
Шевчук Тетяна Миколаївна

Електрика і магнетизм

Практикум

Навчально-методичний посібник

Редактор – М.А.Бордюк
Комп'ютерна верстка – І.Л.Федорова
Коректор – С.В.Наумець

Навчальне видання