

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ФІЗИКИ
для студентів усіх форм навчання

Частина I

Електрика і магнетизм

Затверджено
на засіданні кафедри
загальної та експериментальної фізики
Проткол № 7/92/ від 31.01.92

Київ КПІ 1992

Методичні вказівки до лабораторних робіт з фізики для студентів усіх форм навчання. Частина I. Електрика і магнетизм / Укл. В.П. Черкашин. - К.: КПІ, 1992. - 64 с.

Навчальне видання
Методичні вказівки
до лабораторних робіт з фізики
для студентів усіх форм навчання
Частина I
Електрика і магнетизм

Укладач Черкашин Віктор Павлович
канд.фіз.-мат.наук, проф.

Відповідальний редактор Ю.В.Воробйов
Рецензент М.Г.Мусієнко

Редактор Т.О.Суворова
Коректори: Є.Д.Кіба
П.В.Анікеєнко
Л.С.Мазек
Н.Ф.Слоніна

Підп. до друку 24.12.92. Формат 60×84^{1/16}. Папір
друк. № 3. Друк офсетний. Ум. др. арк. 3,73. Ум. фарбо-відб. 3,84
Облік.-вид. арк. 3,41. Тираж 6000.
Зам. № 2-2398. Безплатно

КПІ. 252056, Київ-56, проспект Перемоги, 37.

Фірма «ВІПОЛ»
252151, Київ, вул. Волинська, 60.

Пропоноване видання являє собою методичні рекомендації до лабораторних робіт з електростатики, постійного електричного струму, електромагнетизму, коливань і хвиль і має на меті ознайомити студентів із сучасною вимірною апаратурою, сприяти виробленню в них умінь і навичок проведення експериментальних досліджень, оцінювання ймовірності отриманих результатів.

Кожна лабораторна робота містить теоретичні відомості, опис експериментальної установки, вказівки щодо виконання роботи й обробки результатів вимірювань, контрольні запитання і рекомендовані літературні джерела, повний список яких наведений в кінці брошури.

Основа видання – навчальний посібник "Фізика. Електричність і магнетизм. Лабораторні роботи" / В.П.Черкашин. – К.: Вища шк., 1986/. Зміст посібника доповнено й перероблено з урахуванням інших використовуваних у діючому лабораторному практикумі методичних розробок.

Переклад навчального посібника на українську мову здійснено перекладацькою групою у складі: М.М.Панченко – інженера учбово-наукової лабораторії криогенної техніки КПІ, О.В.Дугач – асистента кафедри загальної фізики та фізики твердого тіла КПІ, Л.М.Смаги та І.О.Юрченко – студентів хіміко-технологічного факультету КПІ.

ОРГАНІЗАЦІЯ І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ

Виконання будь-якого лабораторного завдання складається з попередньої підготовки, проведення лабораторного експерименту і складання звіту за одержаними результатами.

Лабораторні роботи виконуються згідно із семестровим графіком. Підготовка повинна провадитися в певній послідовності. Перш за все необхідно ознайомитися з описом роботи, вивчити її теоретичне

обґрунтування, звернувши особливу увагу на виведення розрахункових формул. Для повнішого розуміння деяких питань теорії слід звернутися до рекомендованої літератури. Потім складається конспект, який крім теоретичних відомостей містить дані про використовувані прилади, схеми експериментальної установки, порядок виконання роботи. Готовність до виконання завдання перевіряється при відповіді на контрольні запитання, наведені наприкінці опису.

Виконання лабораторних робіт з електрики й магнетизму розпочинається з ознайомлення з правилами внутрішнього розпорядку і техніки безпеки лабораторії.

Основні вимоги правил техніки безпеки

1. Складаючи схему, необхідно стежити за міцністю з'єднання монтажних дротів з клемами.
2. Вмикати прилади у джерела електричного струму слід тільки після перевірки схеми викладачем.
3. У разі тих чи інших перез'єднань вмиканню у джерела електричного струму повинна передувати нова перевірка схеми викладачем.
4. Забороняється залишати без нагляду схеми та прилади під напругою.
5. У разі виходу з ладу приладу необхідно терміново роз'єднати схему від джерела живлення, повідомити про це викладача.
6. Складання і розбирання електричних схем, підімкнення додаткових приладів, їх часткове вмикання чи заміна здійснюються тільки при вимкненому джерелі живлення.
7. Операції на схемі /переміщення ковзунка реостата, регулювання котушок з осердям і т.ін./ виконувати однією рукою, не торкаючись другою струмопровідних частин.

Пристаюючи до виконання лабораторної роботи, необхідно отримати у лаборанта всі необхідні приладдя, ознайомитися з конструкцією приладів і принципом їх дії. Виконуючи роботу обов'язково дотримуватися послідовності, що подана в описі.

Результати вимірів треба записати в таблицю.

Після виконання роботи складається звіт і подається викладачеві не пізніше наступного заняття. Звіт повинен містити обробку експериментальних даних, включаючи розрахунки похибок вимірювань.

Кінцевий результат має вигляд запису значення вимірюваної величини з її абсолютною похибкою. У деяких роботах результати подаються графічно.

I. ТЕХНІКА ЕЛЕКТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Лабораторна робота № I

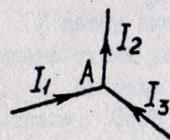
ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ПРОВІДНИКА З ДОПОМОГОЮ МОСТА СТАЛОГО СТРУМУ /МОСТА УІТСТОНА/

Мета роботи - ознайомитися з класичним методом вимірювання опору з допомогою мостової схеми.

Прилади і пристрої: стрілковий гальванометр з нульовою точкою, магазин опорів до 1000 Ом, кнопка-вимикач, джерело струму В, невідомі опори.

Теоретичні відомості

Для вимірювання невідомих опорів користуються найпоширенішим методом моста сталого струму, який ґрунтується на законах розгалужених електричних кіл. Розрахунок таких кіл спрощується, якщо скористатися двома правилами Кірхгофа. Перше стосується вузлів електричного кола. Вузлом називається точка А, в якій сходяться більш як два провідники /рис. I.1/. Вважається, що струм, який тече до вузла, має один знак, а той, що витікає з вузла, - протилежний йому. Згідно з першим правилом Кірхгофа, алгебраїчна сума струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює нулю:



$$\sum_{k=1}^N I_k = 0. \quad /I.1/$$

Рис. I.1

Такі рівняння можна записати для кожного з N вузлів електричного кола. Незалежними буде $(N-1)$ рівнянь, N -те рівняння випливає з них.

Виділимо у розгалуженому електричному колі /рис. I.2/ довільний замкнений контур $ABCD$, задамо напрям його обходу і застосуємо до кожної з нерозгалужених ділянок закон Ома:

$$\begin{aligned} I_1 R_1 &= \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_1; \\ I_2 R_2 &= \varphi_2 - \varphi_3 + \mathcal{E}_2; \\ I_3 R_3 &= \varphi_3 - \varphi_4 + \mathcal{E}_3; \\ I_4 R_4 &= \varphi_4 - \varphi_1 + \mathcal{E}_4. \end{aligned} \quad /I.2/$$

де I_1, I_2, I_3, I_4 - сила струму; R_1, R_2, R_3, R_4 - опори ділянок кола; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ - потенціали; $\mathcal{E}_1, \mathcal{E}_2, \mathcal{E}_3, \mathcal{E}_4$ - електрорушійна сила джерел струму.

У результаті додавання рівнянь /1.2/ отримаємо друге правило Кірхгофа:

$$\sum_{k=1}^N I_k R_k = \sum_{k=1}^N \mathcal{E}_k. \quad /1.3/$$

Принципову схему методу моста Уїтстона зображено на рис. 1.3. Міст складається з невідомого опору R_x , який треба виміряти, і трьох відомих опорів R_1, R_2, R_3 , що утворюють замкнений чотирикутник. Опори R_1, R_2, R_3, R_x утворюють плечі моста, а джерело струму і гальванометр введені в його діагональ.

Застосовуючи до контурів $acda$ і $cbdc$ друге правило Кірхгофа, отримаємо /обходячи коло за годинниковою стрілкою/

$$\begin{cases} I_x R_x + I_2 R_2 - I_3 R_3 = 0; & /1.4/ \\ I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_1 R_2 = 0. \end{cases}$$

Тепер, застосовуючи до вузлів c і d перше правило Кірхгофа, отримаємо:

$$\begin{cases} I_x - I_2 - I_1 = 0; \\ I_2 - I_3 - I_2 = 0. \end{cases} \quad /1.5/$$

Якщо при замкнених ключах K_1 і K_2 стрілка гальванометра залишається в нульовій позиції, тобто струм через гальванометр не протікає

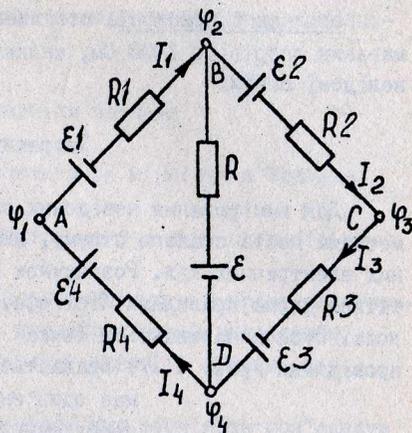


Рис. 1.2

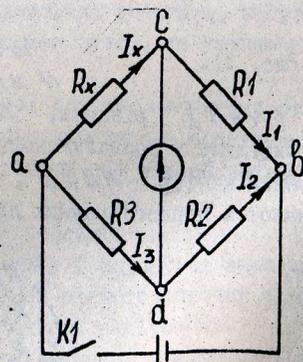


Рис. 1.3

/ $I_2 = 0$ /, то з рівнянь /1.4/, /1.5/ дістанемо:

$$\begin{cases} I_x R_x - I_3 R_3 = 0; \\ I_1 R_1 - I_2 R_2 = 0; \end{cases} \quad /1.6/$$

$$\begin{cases} I_x = I_1; \\ I_3 = I_2. \end{cases} \quad /1.7/$$

Підставимо /1.7/ в /1.6/:

$$\begin{aligned} I_x R_x &= I_3 R_3; \\ I_1 R_1 &= I_3 R_2. \end{aligned}$$

і звідси, поділивши перше рівняння на друге, отримаємо співвідношення для опорів плечей моста:

$$R_x = R_1 \frac{R_3}{R_2}. \quad /1.8/$$

У цьому випадку говорять, що міст врівноважений /збалансований/. Описана схема дозволяє виміряти невідомий опір R_x , знаючи опори R_1, R_2, R_3 . Ділянка cd називається мостом, тому метод називається мостовим. Опір R_1 називається плечем порівняння, а опори R_2, R_3 - плечами співвідношення.

Для балансування моста немає потреби в тонкому регулюванні усіх трьох опорів. У мостових схемах, усі плечі яких виконані у вигляді магазинів опорів, тонке регулювання здійснюється в плечі порівняння, а плечі співвідношення виконуються з декадних котушок, які задають співвідношення $\frac{R_3}{R_2}$. Але таким методом не можна виміряти малі опори, тому що при цьому через схему протікатиме великий струм, і з'являться великі похибки.

Порядок виконання роботи

Вмикаємо джерело живлення сталого струму ≈ 6 В/. Ставимо магазин опору у довільну позицію і на короткий час вмикаємо ключ K . Спостерігаємо за стрілкою гальванометра. Змінюючи опір R_1 , домагаємося такого стану, коли стрілка гальванометра стає на нуль. R_2 і R_3 задані за умовою. Списуємо з магазину опорів значення R_1 і знаходимо, що

$$R_x = R_1 \frac{R_3}{R_2}$$

Дається п'ять невідомих опорів R_x . Кожний опір виміряти п'ять разів і знайти середнє значення опору $\langle R_x \rangle$.

Контрольні запитання

1. У чому полягає сутність мостового методу вимірювання опору?
2. Яка формула зв'язку між опором плечей мосту за умови його рівноваги? Виведіть її.
3. Чи можна використати міст Уітстона для вимірювання малих опорів? Проаналізуйте і обґрунтуйте відповідь.

[1, т.2, § 36; 4; 8, § 2, вступ]

Лабораторна робота № 2

ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦІЇ

Мета роботи - ознайомити студентів з компенсаційним методом вимірювання електрорушійної сили /напруги/ і виробити у них уміння поводитися з промисловими потенціометрами сталого струму типу ПП-63.

Прилади і пристрої: нормальний елемент Вестона, елемент з невідомою електрорушійною силою /ЕРС/ типу Лекланше, джерело сталого струму УИП-2; реохорд; обмежувальний опір, гальванометр типу М 314 чи М 2031/1, перемикач, потенціометр сталого струму типу ПП-63.

Завдання I. Електричні кола для вимірювання ЕРС методом компенсації

Опис експериментальної установки

Для вимірювання ЕРС джерела струму використовується установка, електрична схема якої зображена на рис. 2.1.

Як джерело струму з невідомою ЕРС використовується сухий елемент. Живлення схеми здійснюється від стабілізованого виходу "3...9В" /джерело з ЕРС \mathcal{E} на схемі/ універсального джерела живлення УИП-2. Роль джерела струму з відомою ЕРС \mathcal{E}_1 виконує нормальний елемент Вестона, ЕРС якого дорівнює 1,0183 В, мало змінюється з часом і в кімнатних умовах не залежить від температури.

Електрорушійні сили елементів \mathcal{E}_1 і \mathcal{E}_x компенсуються падінням напруги на ділянці AC реохорда R . Перемикач S_2 служить для вмикання в коло гальванометра або елемента з невідомою ЕРС \mathcal{E}_x чи нормального елемента \mathcal{E}_1 . Для обмеження струму, який протікає через гальванометр у некомпенсованій схемі, в коло гальванометра введено додатковий опір R_A .

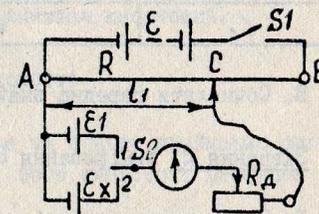


Рис. 2.1

Порядок виконання роботи

1. Скласти коло за схемою, зображеною на рис. 2.1.
2. Поставити перемикач S_2 у нейтральне положення і встановити ковзун реохорда C поблизу середнього положення.
3. Ввести повністю обмежувальний опір R_A і замкнути вимикач S_1 .
4. Увімкнути з допомогою вимикача S_2 гальванічний елемент з відомою ЕРС \mathcal{E}_1 , переміщенням ковзуну реохорда домогтися відсутності струму в колі гальванометра.
5. Вимкнути гальванічний елемент \mathcal{E}_1 і зменшити обмежувальний опір до нуля. Потім знову увімкнути елемент \mathcal{E}_1 і з допомогою ковзуну точніше встановити стрілку гальванометра на нуль. Визначити довжину ділянки реохорда $AC = l_1$ і записати її в таблицю. Повторити дослід 3-5 разів.

6. Проробити операції, описані в пп. 2-5, увімкнувши замість еталонного елемента \mathcal{E}_1 досліджуваний елемент \mathcal{E}_x . Записати в таблицю нове значення довжини того самого плеча реохорда ℓ_1 .

7. За формулою $\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_1 \frac{\ell_2}{\ell_1}$ визначити ЕРС досліджуваного елемента для кожного з дослідів.

Довжина плеча реохорда, см		Електрорушійна сила еталонного елемента \mathcal{E}_1 , В
ℓ_1	ℓ_2	

8. Обчислити середнє значення ЕРС досліджуваного елемента.

Завдання 2. Вимірювання ЕРС потенціометром ПП-63

1. З допомогою потенціометра ПП-63 виміряти ЕРС того самого досліджуваного елемента, що і в завданні 1. Виконати 3-5 вимірювань і обчислити середнє значення ЕРС.

2. Порівняти результати, одержані в завданнях 1 і 2.

Контрольні запитання

1. Що називається ЕРС джерела струму?
 2. Чому електричний струм в колі може існувати довгий час тільки за наявності в колі сили неелектричної природи /сторонньої сили/?
 3. У чому полягає метод компенсації?
 4. Чому ЕРС \mathcal{E} повинна бути більшою від ЕРС \mathcal{E}_1 і \mathcal{E}_x ?
 5. Які переваги методу компенсації в порівнянні з безпосереднім вимірюванням ЕРС з допомогою вольтметра?
 6. Яка будова нормального елемента?
 7. Чому елементи \mathcal{E} , \mathcal{E}_1 і \mathcal{E}_x слід з'єднувати однойменними полюсами?
 8. Яке призначення реостата в колі гальванометра?
- [1, т.2, §33, 36; 6; 8, §2, вступ]

Лабораторна робота № 3 ВИЗНАЧЕННЯ ЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРА МЕТОДОМ БАЛІСТИЧНОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА

Мета роботи - оволодіти методикою і навчитися вимірювати ємність конденсаторів методом балістичного гальванометра.

Прилади і пристрої: балістичний гальванометр типу М 21/2; джерело струму УИП-2; вольтметр; конденсатори невідомої ємності; конденсатори відомої ємності; перемикач; вимикач кнопковий.

Теоретичні відомості

У вимірюванні ємності конденсатора за основу приймаємо співвідношення між зарядом конденсатора q , його ємністю і різницею потенціалів між його обкладками U :

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

Застосовуємо це співвідношення до двох конденсаторів, заряджених до однакової різниці потенціалів U . Тоді

$$C_2 = C_1 \frac{q_2}{q_1}$$

Якщо ємність одного з конденсаторів відома, то ємність другого можна обчислити, знавши співвідношення зарядів цих конденсаторів /за умови, що $U_1 = U_2 = U$ /.

У даній роботі порівняння зарядів конденсаторів здійснюється балістичним методом, в якому ресструючим приладом є балістичний гальванометр - прилад, яким можна вимірювати силу струму $/10^{-6} \dots 10^{-12}$ А. Існують стрілкові і чутливіші дзеркальні гальванометри. У дзеркальному гальванометрі /рис.3.1/ рухома рамка 3 підвищується в магнітному полі сталого магніту на тонкій (товщиною в декілька мікрометрів) пружній підвісці. Для підсилення магнітного поля, в якому знаходиться рамка, в ній розміщують залізне циліндричне осердя 4. Струм до рамки підводиться

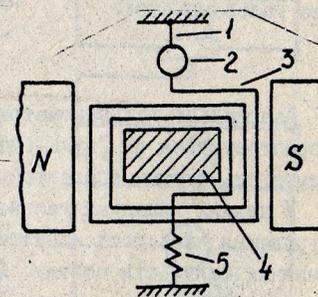


Рис. 3.1

через підвіс I і тонку металеву нитку 5, що відтягує донизу рухому систему. До підвісу біля рамки прикріплюється легке дзеркало 2. Промінь світла, що йде від освітлювача, падає на дзеркало і, відбиваючись, потрапляє на шкалу з поділками. Чим далі шкала від приладу, тим більша його чутливість до струму і тому ціна поділки дзеркальних гальванометрів вказується переважно для певної відстані дзеркала від шкали /наприклад, якщо дзеркало знаходиться від шкали на відстані 1 м, то ціна міліметрової поділки шкали дорівнює $2 \cdot 10^{-9}$ А/мм/.

Кут повороту рамки φ пов'язаний з величиною зміщення світлового штриха шкалою π і відстанню від шкали до дзеркала l співвідношенням, яке легко одержати за рис. 3.2. Промінь світла від

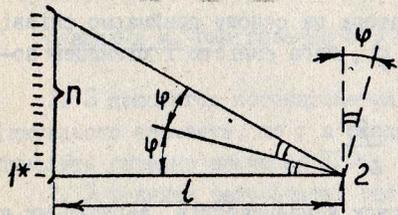


Рис. 3.2

джерела світла I падає на дзеркало гальванометра 2. За повороту дзеркала на кут φ відхилення променя від нульової позиції дорівнює 2φ . Якщо світловий штрих відхилиться шкалою на π поділок, а відстань від дзеркала до шкали дорівнює l /в метрах/, то

$$\operatorname{tg} 2\varphi = \frac{\pi}{l} \quad /3.1/$$

За невеликих відхилень рамки /до 4° / $\operatorname{tg} 2\varphi \approx 2\varphi$ і

$$\varphi = \frac{\pi}{2l} \quad /3.2/$$

Якщо обчислити за формулою /3.2/ кут повороту рамки, то, знаючи чутливість гальванометра S_i , можна визначити силу струму, що тече через гальванометр:

$$\varphi = S_i I \quad /3.3/$$

Дзеркальні гальванометри для електричних вимірювань найчастіше використовуються як "нуль-індикатори", тобто прилади, що показують відсутність струму в електричному колі.

У деяких випадках гальванометри можуть бути використані для вимірювання кількості електрики, яка протікає через гальванометр за одиничних імпульсів струму. Для вимірювання кількості електрики короткого імпульсу тривалістю τ повинна виконуватися умова $\tau \ll T_0$,

де T_0 - період власних коливань рухомої частини гальванометра. Для виконання цієї умови потрібно збільшити моменти інерції рухомої частини, збільшуючи її масу. Такі гальванометри називаються балістичними.

Встановимо зв'язок між кутом відхилення рамки і зарядом, що протікає через гальванометр:

$$q = \theta \varphi_m, \quad /3.4/$$

де φ_m - кут першого /максимального/ відхилення "зайчика" гальванометра; θ - балістична стала гальванометра.

Для зарядів q_1 і q_2 можна записати

$$q_1 = \theta \varphi_m^{(1)}; \quad q_2 = \theta \varphi_m^{(2)}, \quad /3.5/$$

де $\varphi_m^{(1)}, \varphi_m^{(2)}$ - величина першого відхилення "зайчика" при розрядженні гальванометром конденсаторів C_1 і C_2 .

Зі співвідношень /3.5/ випливає, що

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{\varphi_m^{(2)}}{\varphi_m^{(1)}} \quad /3.6/$$

Формула для визначення ємності конденсатора матиме вигляд:

$$C_2 = C_1 \frac{\varphi_m^{(2)}}{\varphi_m^{(1)}} = C_1 \frac{\pi_m^{(2)}}{\pi_m^{(1)}}, \quad /3.7/$$

де π_m - максимальне відхилення в поділках шкали.

Опис експериментальної установки

На рис. 3.3 зображено схему електричного кола, що використовується для визначення ємності конденсаторів.

Сталий струм від джерела живлення підводиться до реостата, ввімкненого за схемою дільника напруги. Напруга, що знімається з дільника, подається через перемикач S_1 /позиція I/ на конденсатор. Цю напругу можна змінювати, переміщуючи ковзун реостата і вимірювати вольтметром V .

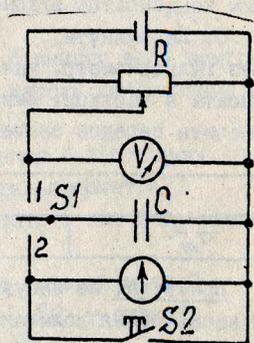


Рис. 3.3

При перемиканні $S1$ в позицію 2 конденсатор замикається на гальванометр. Паралельно до гальванометра підключимо кнопковий вимикач $S2$, який замикає коло індукційних струмів, що виникають у рамці гальванометра при її коливаннях.

Гальмування рамки здійснюється дією магнітного поля магніту гальванометра на струми, що виникають у рамці внаслідок індукції. Цей вимикач замикається в момент проходження "зайчика" через нульову поділку шкали. Передню панель експериментальної установки зображено на рис. 3.4. Вона живиться від виходу УИПа "3...9 В".

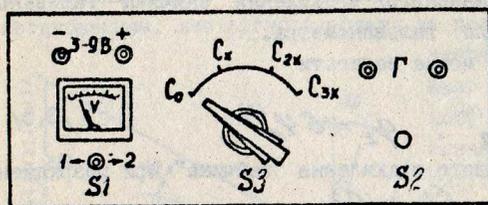


Рис. 3.4

Порядок виконання роботи

1. Ввімкнути УИП в мережу 220 В.
2. Встановити з допомогою потенціометра R /розміщений на панелі УИПа над виходом "3...9" В/ задану викладачем напругу, яка вимірюється вольтметром на панелі установки /рис. 3.4/.
3. Перемикач $S3$ поставити в позицію C_0 .
4. Поставити перемикач $S1$ в позицію 1. заряджаючи тим самим конденсатор відомої ємності C_0 .
5. Перемкнути $S1$ в позицію 2, розряджаючи конденсатор через гальванометр. Максимальне відхилення "зайчика" на шкалі $n_m^{(0)}$ записати в таблицю. Вимірювання повторити згідно з пп.4, 5 двічі і визначити середнє значення.

U_1		U_2	
$n_m^{(0)}$	$n_m^{(1)}$	$n_m^{(0)}$	$n_m^{(2)}$

Примітка. Не забувайте користуватися кнопковим вимикачем $S2$ для заспокоєння коливань рамки гальванометра перед проведенням повторних вимірювань.

6. Замість еталонного конденсатора перемикачем $S3$ підключити до кола конденсатор невідомої ємності, C_{1x} .

7. Виконати вимірювання за напругою U_1 , описані в пп. 4, 5, і знайти середнє значення $n_m^{(1)}$.

8. Встановити з допомогою потенціометра R /див. п.2/ іншу задану напругу U_2 і повторити вимірювання згідно з пп. 3-5. Результати записати у таблицю.

9. Аналогічно виміряти ємності конденсаторів C_{2x} і C_{3x} .

Обробка результатів вимірювань

I. Використовуючи формулу

$$C_{1x} = C_0 \frac{n_m^{(1)}}{n_m^{(0)}}$$

обчислити невідому ємність конденсатора для двох значень напруги U_1 і U_2 і знайти середнє значення ємності. Тут $n_m^{(0)}$ і $n_m^{(1)}$ - середні значення максимального відхилення "зайчика" гальванометра при розрядженні конденсаторів відповідно C_0 і C_{1x} .

2. Порівняти отримані середні значення ємності, наприклад $\langle C_{1x} \rangle$ з ємністю, вказаною на конденсаторі $C1$ і знайти відносну похибку вимірювання

$$\frac{\Delta C}{\langle C_{1x} \rangle} \cdot 100\%$$

де $\Delta C = |C_1 - \langle C_{1x} \rangle|$.

Контрольні запитання

1. Що таке електрична ємність і в яких одиницях вона вимірюється?
 2. В чому полягає суть запропонованого методу вимірювання ємності конденсатора?
 3. Як залежить величина першого відхилення балістичного гальванометра від заряду, що пройшов через рамку гальванометра?
 4. Як влаштований балістичний гальванометр і яке його призначення?
 5. Що таке динамічна і балістична сталі гальванометра?
 6. Яке призначення кнопкового вимикача $S2$ у схемі?
 7. Який принцип роботи схеми на рис. 3.3?
- [1, т.1, §38, т.2, §26, 27, 46; 8, §3, вступ]

Лабораторна робота № 4
ВІВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛОГРАФА

Мета роботи - ознайомити студентів з принципом дії і будовою осцилографа, виконати вимірювання з його допомогою.

Завдання I. Вимірювання чутливості електронного осцилографа

Прилади і пристрої: осцилограф СІ-19Б; блок живлення УИП-2, вольтметр змінного струму; подільник напруги; вимикач.

Теоретичні відомості

Чутливість електронного осцилографа називається величина, що чисельно дорівнює відхиленню сліду електронного променя на екрані трубки від осі трубки за діючої /ефективної/ напруги 1 В на вході підсилювача осцилографа:

$$S = \frac{x}{U_{\text{эф}}} \quad /4.1/$$

Чутливість електронного осцилографа залежить від чутливості електронно-променевої трубки $S_{\text{ТР}}$ і коефіцієнта підсилення підсилювача k :

$$S = \sqrt{2k S_{\text{ТР}}} \quad /4.2/$$

Якщо коефіцієнт підсилення невідомий, то чутливість осцилографа можна визначити експериментально. Для цього на вхід осцилографа треба подати змінну напругу, ефективне значення якої $U_{\text{эф}}$ вимірюється вольтметром змінного струму. За вимкнутої розгортки слід електронного променя на екрані трубки матиме вигляд прямої лінії. Довжина L цієї лінії пропорційна подвоєному значенню ефективної напруги $U_{\text{эф}}$. Тому чутливість осцилографа можна визначити за формулою

$$S = \frac{L}{2U_{\text{эф}}} \quad /4.3/$$

Опис експериментальної установки

Схема установки для вимірювання чутливості електронного осцилографа зображена на рис. 4.1. Схему зібрано для випадку, коли вимірюється чутливість каналу Y .

Напруга, що подається на вхід Y , вимірюється вольтметром V . Для вимірювання максимальної чутливості цього каналу осцилографа встановити перемикач "ДЕЛИТЕЛЬ Y " в позицію 1:1, а потенціометр плавного регулювання підсилення цього каналу "УСИЛ. Y " - в крайню праву позицію.

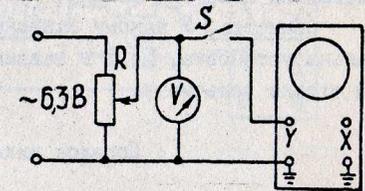


Рис. 4.1

Порядок виконання роботи

1. Підготувати осцилограф до роботи.
2. Встановити перемикач "ВЕРТ. ПЛАСТИНИ" в позицію "УСИЛ. Y ", "ГОРИЗ. ПЛАСТИНИ" - в позицію "ЗАКОР". Перемикач "ДЕЛИТЕЛЬ Y " повинен знаходитися в позиції 1:1, а потенціометр "УСИЛЕНИЕ Y " - у крайній правій позиції.
3. Повзунок потенціометра R поставити в позицію, що відповідає відсутності напруги на виході подільника напруги.
4. Ввімкнути блок живлення в мережу і замкнути вимикач S .
5. Переміщенням повзунка потенціометра домогтися, щоб довжина лінії на екрані осцилографа була 8...10 см. Занести покази вольтметра і довжину лінії у таблицю:

$U_{\text{эф}}, \text{В}$	$L, \text{мм}$

6. Обчислити максимальну чутливість вертикального входу Y осцилографа /в міліметрах на вольт/.
7. Виміряти максимальну чутливість входу Y 3-5 разів для інших значень поданої на вхід осцилографа напруги. Довжина лінії повинна знаходитися в інтервалі 2...10 см. Результати вимірювань занести у таблицю.
8. Знайти середнє значення чутливості /максимальної/ каналу Y осцилографа.

9. Побудувати графік залежності U_{ef} від L .

Завдання 2. Вимірювання напруги

Прилади і пристрої: осцилограф СІ-19Б, блок живлення УИП-2, подільник напруги, вимикач.

Примітка. У даному завданні використовується та сама експериментальна установка, що і в завданні І. З електричної схеми вилучається тільки вольтметр.

Порядок виконання роботи

1. Виконати такі самі операції, що і в пп.1-4 завдання І.
2. Переміщуючи повзун подільника напруги, подати на вхід Y осцилографа таку напругу, щоб довжина лінії на екрані осцилографа не перевищувала 8...10 см. Виміряти і занести у таблицю довжину лінії L :

U_{ef}, B	L, mm

3. Користуючись графіком із завдання І, визначити ефективне значення напруги змінного струму і занести його у таблицю. Для обчислення амплітудної напруги одержаний результат помножити на $\sqrt{2}$.

4. Виконати 3-5 дослідів вимірювання напруги, змінюючи позицію повзуну подільника напруги; одержані дані занести у таблицю.

Примітка. Для визначення напруги у загальному випадку треба знати чутливість осцилографа за заданого підсилення. Для цього потрібно побудувати графік залежності чутливості осцилографа від позиції ручки потенціометра "УСИЛЕНИЕ Y " на осцилографі. Маючи графіки, які відповідають різним позиціям перемикача "ДЕЛИТЕЛЬ Y ", можна вимірювати напругу в широкому інтервалі.

Якщо потрібна більша точність вимірювань, слід виконати калібрування підсилювача осцилографа безпосередньо після вимірювань, не змінюючи позиції ручки "УСИЛЕНИЕ Y ".

Завдання 3. Вимірювання опору

Прилади і пристрої: магазин опорів типу МСР-63; резистори, опір яких вимірюватиметься, джерело сталого струму УИП-2, осцилограф типу СІ-19 Б; потенціометр.

Опис експериментальної установки

На рис. 4.2 зображено схему, що використовується для вимірювання опору, де U - джерело сталої напруги /у даному випадку це УИП-2/, в якому використовується вихід з напругою "3...9 В", R_0 - магазин опорів, S - перемикач, R_x - невідомий опір.

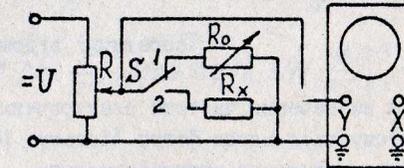


Рис. 4.2

Порядок виконання роботи

1. Підготувати осцилограф до роботи. Для цього виконати операції пп. 1, 2 завдання І.
2. Поставити перемикач S в позицію 2. До входу Y під'єднати невідомий опір R_x .
3. Ввімкнути блок живлення в мережу і з допомогою подільника напруги домогтися, щоб зміщення точки x на екрані осцилографа було 4...5 см.
4. Поставити перемикач S в позицію 1 /за цих умов на вхід подається напруга з магазину опорів R_0 / і підібрати таке значення опору магазину, щоб зміщення точки на екрані було таким самим, як і для опору R_x . Тоді $R_x = R_0$.

Додаткове завдання

1. Знаючи зміщення точки від центра екрана ($x = \frac{L}{2}$) і користуючись графіком залежності U_{ef} від L , одержаним у завданні І, обчислити спад напруги U на резисторі R_x , що відповідає у випадку сталого струму амплітудній напрузі:

$$U = \sqrt{2} U_{ef}.$$

2. Користуючись законом Ома, обчислити силу струму I , який проходить через резистор R_x , за формулою

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

Завдання 4. Вимірювання частоти

Прилади і пристрої: осцилограф СІ-І9 Б з двома блоками БПУ-І; звуковий генератор ГЗ-36; джерело змінного струму з частотою 50 Гц.

Теоретичні відомості

Для визначення частоти електричних гармонічних коливань широко використовується метод фігур Ліссажу. Цей метод полягає в тому, що гармонічне коливання відомої частоти y_x додається до взаємно перпендикулярного до нього гармонічного коливання невідомої частоти y_y . Додавання таких коливань легко спостерігати з допомогою електронного осцилографа, тому ці частоти позначено індексами x і y . Це означає, що перше з цих коливань подається на вхід X , а друге - на вхід Y осцилографа. Дістаємо результуюче коливання, яке має вигляд складної кривої й називається фігурою Ліссажу. За виглядом фігури Ліссажу можна визначити частоту гармонічного коливання.

Рівняння для фігур Ліссажу можна отримати, записавши рівняння гармонічних коливань:

$$x = x_0 \cos 2\pi \nu t; \quad (4.4)$$

$$y = y_0 \cos (2\pi n \nu t + \varphi),$$

де $\nu = \nu_x$; $n \nu = n \nu_x = \nu_y$; φ - початкова різниця фаз цих коливань.

З рівняння /4.4/ маємо:

$$\frac{x}{x_0} = \cos 2\pi \nu t; \quad (4.5)$$

$$\frac{y}{y_0} = \cos (2\pi n \nu t + \varphi) = \cos n \alpha. \quad (4.6)$$

Додаємо до лівої та правої частин рівняння /4.6/ величину $i \sin n \alpha$:

$$\frac{y}{y_0} + i \sin n \alpha = \cos n \alpha + i \sin n \alpha.$$

Видозмінимо праву частину цього рівняння:

$$\frac{y}{y_0} + i \sin n \alpha = (\cos \alpha + i \sin \alpha)^n, \quad (4.7)$$

або

$$\frac{y}{y_0} + i \sin n (2\pi \nu t + \frac{\varphi}{n}) =$$

$$= [\cos 2\pi \nu t \cos \frac{\varphi}{n} - \sin 2\pi \nu t \sin \frac{\varphi}{n} +$$

$$+ i (\sin 2\pi \nu t \cos \frac{\varphi}{n} + \cos 2\pi \nu t \sin \frac{\varphi}{n})]^n.$$

З формули /4.5/ маємо:

$$\sin 2\pi \nu t = \sqrt{1 - (\frac{x}{x_0})^2}.$$

Підставивши значення $\sin 2\pi \nu t - i \cos 2\pi \nu t$ у рівняння /4.7/, дістанемо:

$$\frac{y}{y_0} + i \sin n (2\pi \nu t + \frac{\varphi}{n}) = [(\frac{x}{x_0} \cos \frac{\varphi}{n} - \sqrt{1 - (\frac{x}{x_0})^2} \sin \frac{\varphi}{n}) +$$

$$+ i \sqrt{1 - (\frac{x}{x_0})^2} \cos \frac{\varphi}{n} + \frac{x}{x_0} \sin \frac{\varphi}{n}]^n. \quad (4.8)$$

Щоб отримати рівняння фігур Ліссажу, потрібно праву частину рівняння /4.8/ розкласти в біноміальний ряд і прирівняти дійсні частини зліва і справа в рівнянні /4.8/. Бигляд фігур Ліссажу залежить від різниці початкових фаз φ і відношення частот коливань $n = \frac{\nu_y}{\nu_x}$. Криві Ліссажу для деяких значень φ і n показані на рис. 4.3.

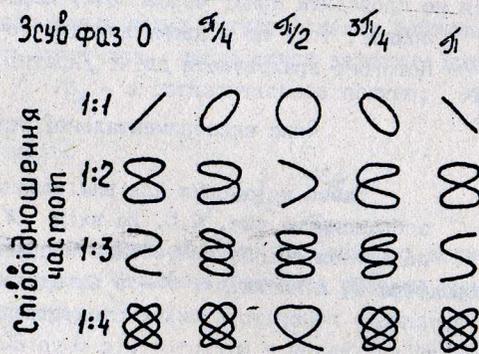


Рис. 4.3

Якщо число n може бути представлене у вигляді відношення двох цілих чисел n_x і n_y , то фігура Ліссажу на екрані осцилографа буде стійкою.

Перепишемо рівняння /4.8/ з урахуванням виразу $n = \frac{n_x}{n_y}$:

$$\left[\frac{y}{y_0} + i \sin(2\pi \nu t + \frac{\varphi}{n}) \right]^{n_y} = \left[\left(\frac{x}{x_0} \cos \frac{\varphi}{n} - \sqrt{1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^2} \sin \frac{\varphi}{n} \right) + i \left(\sqrt{1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^2} \cos \frac{\varphi}{n} + \frac{x}{x_0} \sin \frac{\varphi}{n} \right) \right]^{n_x}. \quad /4.9/$$

Припустимо, що $x = 0$. Розкладаючи ліву і праву частини бінома Ньютона і прирівнюючи дійсні частини обох частин рівності /4.9/, отримаємо рівняння степені n_y відносно y . Знайоме рівняння має n_y коренів. Це означає, що пряма $x = 0$ /вісь y / перетне фігуру Ліссажу n_y разів.

Аналогічно можна показати, що будь-яка пряма, паралельна осі, перетне фігуру Ліссажу n_x разів.

Звідси випливає правило визначення частоти досліджуваного гармонічного коливання.

Проводять дві взаємно перпендикулярні прямі, паралельні осям x та y , і підраховують число точок перетину цих прямих з фігурою Ліссажу n_x і n_y відповідно, як показано на рис. 4.4. У даному випадку $n_x = 2$ і $n_y = 4$. Отже:

$$n = \frac{\nu_y}{\nu_x} = \frac{n_x}{n_y} = \frac{2}{4}, \quad \nu_y = \frac{1}{2}.$$

Рекомендується не проводити прямі через точку перетину гілок кривої, тому що в цьому випадку точку перетину потрібно враховувати двічі /кратні корені/.

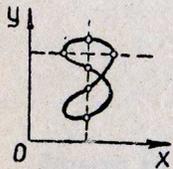


Рис. 4.4

Опис експериментальної установки

Схема установки для вимірювання частоти зображена на рис. 4.5. На вхід X осцилографа подається змінна синусоїдна напруга від знижувального трансформатора T , а на вхід Y - з виходу звукового генератора ГЗ-36. У звуковому генераторі використовується діапазон, в якому можна отримати коливання з частотою від 0 до 200 Гц.

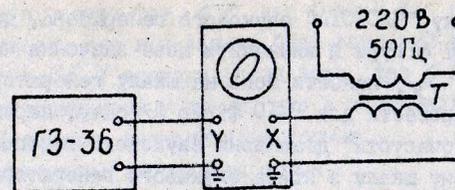


Рис. 4.5

Порядок виконання роботи

1. Встановити ручку "УСИЛЕНИЕ" каналів X і Y осцилографа на нуль. Регулятор напруги на виході звукового генератора також встановити на нуль.
2. З допомогою смужки паперу закрити поділки на шкалі звукового генератора.
3. Ввімкнути в мережу осцилограф, звуковий генератор і трансформатор.
4. Підготувати осцилограф до роботи згідно з вказівками, викладеними в [6, §4].
5. Обертаючи ручку "УСИЛЕНИЕ X ", домогтися, щоб на екрані з'явилась смужка довжиною 7...8 см.
6. Поворотом ручок "АМПЛИТУДА ВИХОДА" звукового генератора і "УСИЛЕНИЕ Y " осцилографа отримати на екрані фігури Ліссажу.
7. Обертаючи ручку "ЧАСТОТА" звукового генератора, домогтися стійкого зображення фігур Ліссажу.
8. Провести уявно через фігуру Ліссажу вертикальну та горизонтальну лінії і полічити число точок перетину цих прямих з фігурою Ліссажу / n_x - з горизонтальною прямою, n_y - з вертикальною/.
9. За формулою

$$\nu_y = \nu_x \frac{n_x}{n_y},$$

де $\nu_x = 50$ Гц, обчислити частоту гармонічних коливань на виході звукового генератора. Отримане значення частоти нанести на саморобну шкалу генератора.

10. Обертуючи ручку "ЧАСТОТА" звукового генератора, домогтися появи наступної стійкої фігури й визначити нове значення частоти звукового генератора γ_y ; нанести його на шкалу генератора.

11. Вимірювання провести для 8-10 фігур Ліссажу, переходячи за потребою на вищі височастотні діапазони звукового генератора.

12. Зняти саморобну шкалу з лімба звукового генератора і порівняти результати проведених вимірювань із заводською шкалою генератора.

Завдання 5. Вимірювання зсуву фаз

Прилади і пристрої: звуковий генератор ГЗ-36; конденсатор; резистори; осцилограф СІ-19 Б.

Теоретичні відомості

Щоб виміряти зсув фаз між двома змінними напругами U_1 і U_2 однакової частоти ω , подамо ці напруги відповідно на горизонтально й вертикально відхиляючі пластини електронного осцилографа. Тоді в будь-який момент часу координати світлової плями променя на екрані осцилографа визначаються виразами:

$$x = a \cos \omega t;$$

$$y = b \cos (\omega t + \Delta \varphi),$$

де $\Delta \varphi$ - зсув фаз між напругами U_1 і U_2 ; a і b - амплітудні значення зміщення променя осями x і y , пропорційні амплітудам напруги U_1 і U_2 і залежні також від чутливості S_x і S_y осей осцилографа.

Ці вирази записані для випадку, коли початок відліку часу вибрано так, щоб початкова фаза коливань віссю x дорівнювала нулю. Для визначення рівняння траєкторії сліду променя на екрані потрібно вилучити з цих рівнянь параметр t . Відповідні математичні перетворення приводять до рівняння

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{2xy}{ab} \cos \Delta \varphi = \sin^2 \Delta \varphi,$$

яке є рівнянням еліпса. Форма еліпса залежить від зсуву фаз $\Delta \varphi$ і відношення амплітуди a і b .

При зміні зсуву фаз $\Delta \varphi$ від 0 до 2π орієнтація еліпса змінюватиметься, але він завжди буде вписаний в прямокутник зі сторонами $2a$ і $2b$. У випадку, коли зсув фаз $\Delta \varphi$ дорівнює 0 або π , еліпс вироджується у пряму, яка є діагоналлю прямокутника.

Зсув фаз можна визначити за формою еліпса таким чином: координати точок перетину еліпса з осями будуть

/рис. 4.6/

$$\text{з віссю } y \text{ /при } x = 0/ \quad y_0 = \pm b \sin \Delta \varphi;$$

$$\text{з віссю } x \text{ /при } y = 0/ \quad x_0 = \pm a \sin \Delta \varphi,$$

звідки

$$\sin \Delta \varphi = \frac{|x_0|}{a} = \frac{|y_0|}{b};$$

$$\Delta \varphi = \arcsin \frac{|x_0|}{a} = \arcsin \frac{|y_0|}{b}. \quad /4.10/$$

Опис експериментальної установки

Електрична схема установки /рис. 4.7/ дозволяє виміряти зсув фаз між струмом і напругою в контурі, що складається з резистора R і ємності C . На вертикально відхиляючі пластини подається напруга, яка знімається з контура RC , а на горизонтально відхиляючі - з резистора R' ввімкненого послідовно з контуром. Оскільки напруга на резисторі R' знаходиться у фазі зі струмом у контурі RC , то в цьому випадку вимірюється зсув фаз між струмом і напругою в колі, яке складається з резистора і конденсатора. У каналі x осцилографа використовується змінний блок БУ-І, аналогічний тому, що використовується в каналі y .

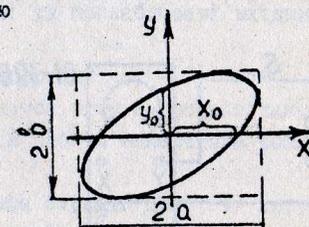


Рис. 4.6

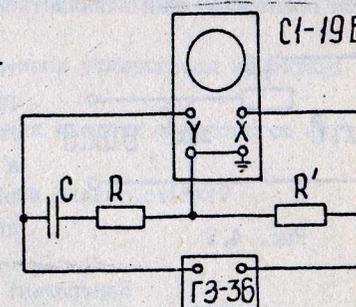


Рис. 4.7

Порядок виконання роботи

1. Під'єднати звуковий генератор до осцилографа, схема якого зображена на рис. 4.8.

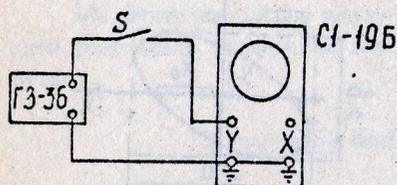


Рис. 4.8

2. Увімкнути осцилограф і генератор в мережу, дати їм прогрітись 5...10 хв.

3. Увімкнути вимикач S і, змінюючи частоту звукового генератора, визначити діапазон частоти, в якому підсилювачі осцилографа не вносять додаткової різниці фаз. У цьому випадку на екрані повинна з'явитися пряма лінія.

Цей діапазон частоти потрібно і надалі використовувати як робочий.

4. Під'єднати осцилограф і звуковий генератор до схеми, як показано на рис. 4.5.

5. З допомогою ручок подільників і підсилювачів каналів X і Y домогтися, щоб зображення еліпса не виходило за межі екрана.

6. Користуючись поділками координатної сітки на екрані осцилографа, визначити відстань x_0 і a або y_0 і b й обчислити зсув фаз за $/4,10/$.

Примітка. Точність визначення зсуву фаз цим методом невелика. Її можна значно збільшити, якщо змінювати фазу однієї з напруг, які подаються на вхід X або Y осцилографа. Це можна зліїснити з допомогою пристрою, який називається фазообертач /рис. 4.9/.

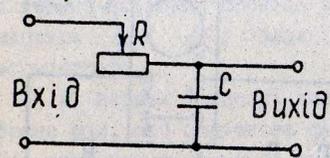


Рис. 4.9

Якщо фазообертач калібрований, то з його допомогою спочатку домогаються відсутності різниці фаз /пряма лінія на екрані осцилографа/, а потім за величиною внесеної ним різниці фаз визначають зсув між досліджуваними напругами.

Контрольні запитання

1. Яке призначення електронного осцилографа?
2. Будова і принцип дії електронно-променевої трубки.
3. Що таке чутливість електронно-променевої трубки за напругою?

4. Як виводиться формула для чутливості електронно-променевої трубки залежно від геометричних розмірів її елементів?

5. Чи буде однаковою чутливість для пластин X і Y електронно-променевої трубки? Чому?

6. Для чого призначені підсилювачі та послаблювачі вхідних сигналів осцилографа?

7. Яке призначення генератора розгортки?

8. Як здійснюється нанесення позначок часу на осцилограму?

9. Для чого потрібна синхронізація роботи генератора розгортки і досліджуваного сигналу?

10. Які ручки на панелі осцилографа служать для: а/ керування електронним променем, б/ регулювання досліджуваного сигналу, в/ керування розгортки?

11. У чому полягає попереднє регулювання осцилографа?

12. Що таке чутливість електронного осцилографа? В яких одиницях вона вимірюється?

13. Як виглядає схема установки для вимірювання чутливості електронного осцилографа?

14. Які дані треба знати для вимірювання напруги з допомогою осцилографа?

15. На якому принципі ґрунтується вимірювання опорів з допомогою осцилографа?

16. Як виводиться рівняння результуючого коливання, що отримується додаванням взаємно перпендикулярних коливань однакової частоти?

17. Як за формою еліпса на екрані осцилографа визначити зсув фаз між коливаннями?

18. Що таке фігури Ліссажу і як вони утворюються на екрані осцилографа?

19. У чому суть методу визначення частоти з допомогою фігур Ліссажу?

20. За яких умов фігури Ліссажу на екрані стійкі?

[8, §4, вступ; 4-7]

П. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ

Лабораторна робота № 5 ВІВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ

Мета роботи - ознайомити студентів з одним із способів вивчення характеристик електростатичних полів, що ґрунтується на математичному моделюванні, на прикладі поля з осью симетрії.

Прилади і пристрій: планшет з електродами, мікроамперметр типу М 906, джерело живлення УИП-2; зонд /електрод/.

Теоретичні відомості

Конструюючи електронні лампи, електронні лінзи та інші прилади, потрібно знати розподіл електричного поля в просторі між електродами довільної форми. Теоретичний розрахунок таких полів можливий тільки для найпростіших конфігурацій поля, а в загальному випадку такого розрахунку виконати не можна. Тому електричні поля складної конфігурації досліджуються експериментально, з допомогою методу моделювання.

Основними характеристиками електростатичного поля є напруженість і потенціал. Напруженість \vec{E} - це силова характеристика поля, що чисельно дорівнює силі, з якою поле діє на одиничний точковий додатний заряд q_0 , який знаходиться в даній точці поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$$

У випадку поля, створеного точковим зарядом q напруженість на відстані r від заряду визначається формулою

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$$

Енергетичною характеристикою поля є потенціал. Він вимірюється роботою, яку виконують сили поля, переміщуючи одиничний точковий додатний заряд з даної точки поля в безмежність:

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

де q_0 - заряд, що переміщується.

Потенціал є функцією відстані від даної точки поля до заряду q , що створює поле:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$$

Сукупність точок поля, що мають однаковий потенціал, утворює екіпотенціальну поверхню. Силкові лінії завжди перпендикулярні до поверхні однакового потенціалу.

Метод математичного моделювання електростатичного поля

Для математичного моделювання електростатичного поля використовується той факт, що електростатичне поле стаціонарного струму в середовищі зі слабкою провідністю завжди є потенціальним. Це дозволяє використати електричне поле стаціонарного струму в середовищі зі слабкою провідністю для моделювання електростатичного поля заряджених тіл у вакуумі.

У моделюванні використовують електроди, форма яких відповідає натуральним тілам, але виконані вони в певному масштабі /найчастіше збільшеному/. Взаємне розміщення електродів повинно бути таким самим, як і в приладі, що моделюється. На електроди подається напруга, що дорівнює або пропорційна напрузі на електродах приладу, який моделюється. При виконанні цих умов електричне поле між електродами матиме таку саму конфігурацію, як і те поле, що моделюється, відрізняючись від нього тільки значенням напруженості.

Якщо між електродами розмістити середовище зі слабкою провідністю, то конфігурація електричного поля зміниться. Проте за виконання певних умов таких змін можна уникнути. Які ж ці умови?

Розподіл поля у просторі задається рівняннями Максвелла для електричного поля. Розв'язок цих рівнянь, який визначає закон розподілу напруженості поля, залежить як від вигляду самих рівнянь, так і від граничних умов. Покажемо, що вигляд рівнянь Максвелла не зміниться, якщо замінити непровідне середовище на провідне.

Як відомо, густина електричного струму \vec{j} всередині провідника задовольняє рівняння неперервності:

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0$$

Використовуючи закон Ома в диференціальній формі і враховуючи, що питома електропровідність середовища є величиною сталою ($\lambda = \text{const}$), одержимо:

$$\text{div } \vec{j} = \text{div}(\lambda \vec{E}) = \lambda \text{div } \vec{E} = 0,$$

звідки

$$\text{div } \vec{j} = 0. \quad /5.1/$$

За відсутності змінного у часі магнітного поля виконується умова

$$\text{rot } \vec{E} = 0. \quad /5.2/$$

Таким чином, електричне поле сталого струму задовольняє рівняння /5.1/ і /5.2/. Ці самі рівняння задовольняє й електричне поле у вакуумі.

Рівняння /5.1/ і /5.2/, що описують поля у провідному середовищі і вакуумі, мають залежні від граничних умов розв'язки. Розглянемо граничні умови на електродах та інших поверхнях розділу середовищ. Якщо електропровідність середовища мала, то малий і струм, який протікає через це середовище. Електропровідність електродів, з другого боку, велика, і тому можна знехтувати падінням напруги в їх об'ємі і вважати, що поверхні електродів є екіпотенціальними. Тому лінії струму й силові лінії у слабопровідному середовищі перпендикулярні до границі розділу електрод - слабопровідне середовище. Аналогічний хід силових ліній і в діелектричному середовищі, наприклад у вакуумі. Проте граничні умови повинні виконуватися не тільки на поверхні розділу електроди - середовище, але й на інших поверхнях, що обмежують слабопровідне середовище. Як слабопровідне середовище використовується електропровідний папір, тому середовищами, які межують, є повітря та ізолююча підкладка. Оскільки на межах між електропровідним папером, повітрям і підкладкою електричний струм не може текти перпендикулярно до поверхні розділу з непровідного середовища у провідне/, то в провідному середовищі встановлюється такий розподіл потенціалу, за якого вектор \vec{E} не матиме складових, перпендикулярних до поверхні розділу. Тому в провідному середовищі лінії струму й силові лінії йдуть вздовж межі розділу з непровідним середовищем. Межа розділу не вносить викривлень у форму ліній струму і, отже, ліній напруженості, якщо контур цієї межі відповідає контуру ліній струму.

У разі виконання всіх цих умов можна створити модель поля електростатичних зарядів, використовуючи поле в слабопровідному середовищі. У такому моделюванні силовим лініям електростатичного поля відповідають лінії струму, а поверхням однакового потенціалу - поверхні однакових напруг. Перевагою такого моделювання є те, що виміряти поля у провідному середовищі набагато простіше, ніж в непровідному. Ця простота зумовлена тим, що в провідному середовищі звичайно вимірюється електричний потенціал, а не напруженість поля. Для таких вимірювань використовують зонди /електроди/, які вводять в поле. Зонд - це добре ізольований вздовж усієї довжини, крім кінця, провідник. Для вимірювання різниці потенціалів між двома точками поля в провідному середовищі потрібно доторкнутися до цих точок зондами, під'єднаними до вольтметра. Таким методом на електропровідному папері можна позначити лінії однакового потенціалу. Лінії струму на папері ортогональні до лінії однакового потенціалу і відповідають лініям напруженості електростатичного поля всередині циліндричного конденсатора. Такий самий характер має розподіл потенціалу електростатичного поля безмежної рівномірно зарядженої нитки.

Поле моделюється з допомогою електропровідного паперу, до якого щільно притиснуті два коаксіальних циліндричних електроди. Для такої моделі залежність напруженості та потенціалу поля від відстані r до осі системи можна розрахувати таким чином. Густина струму на відстані r від осі системи $j(r)$ знаходимо з умови неперервності

$$j(r) = \frac{I}{2\pi r d},$$

де I - повний струм, що проходить через папір; d - товщина паперу. Тоді напруженість поля на відстані r

$$E(r) = \frac{j(r)}{\sigma}, \quad \text{або} \quad E(r) = \frac{I}{2\pi r},$$

де σ - електрична провідність паперу.

Експериментальна установка у даній роботі зібрана так, що в досліді вимірюється різниця потенціалів між зовнішнім електродом, потенціал якого приймається таким, що дорівнює нулю, і даною точкою поля. Розрахуємо теоретично цю різницю потенціалів, використавши зв'язок між напруженістю поля та його потенціалом:

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi.$$

У полярній системі координат ця рівність переписється так:

$$E(r) = - \frac{d\varphi(r)}{dr} = - \frac{dU(r)}{dr},$$

звідки

$$U(r) = - \int_r^{r_2} E(r) dr = \frac{I}{2\pi b d} \ln \frac{r_2}{r},$$

де r_2 - радіус зовнішнього електрода.

Сержані вирази для $U(r)$ і $E(r)$ можна переписати у вигляді, зручному для дослідження, якщо замість G, I, d ввести величини $r_2, r_{ен}, U_0$, що легко вимірюються експериментально / $r_{ен}$ - радіус внутрішнього електрода, U_0 - різниця потенціалів між зовнішнім і внутрішнім електродами /:

$$U_0 = U(r_{ен}) = \frac{I}{2\pi b d} \ln \frac{r_2}{r_{ен}}; \quad /5.3/$$

$$U(r) = \frac{U_0}{\ln \frac{r_2}{r_{ен}}} \ln \frac{r_2}{r}; \quad /5.4/$$

$$E(r) = \frac{U_0}{\ln \frac{r_2}{r_{ен}}} \frac{1}{r}. \quad /5.5/$$

Зміст даної роботи полягає у визначенні дослідним шляхом залежностей $U = U(r)$ і $E = E(r)$ і порівнянні отриманих результатів з цими самими залежностями, отриманими теоретично /формули /5.4/ і /5.5//.

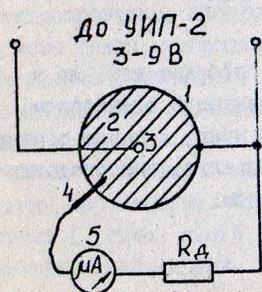


Рис. 5.1

Опис експериментальної установки

Електрична схема установки для моделювання розподілу потенціалу і напруженості електростатичного поля, що має осьову симетрію, зображена на рис. 5.1, де 1 - зовнішній електрод з радіусом r_2 ; 2 - провідний папір; 3 - центральний електрод з радіусом $r_{ен}$; 4 - зонд /електрод/; 5 - мікроамперметр; R_d - додатковий опір до мікроамперметра.

Електрична схема живиться від джерела живлення УИП-2 сталюю регульованою стабілізованою напругою, яка знімається з виходу "3... ..9 В".

Схема дозволяє виконувати вимірювання напруги між зовнішнім електродом 1 і якою-небудь точкою А провідного середовища 2. Вимірювальним приладом є мікроамперметр, який завдяки великому додатковому опорі $R_d \approx 100$ кОм, працює в режимі вольтметра. Оскільки додатковий опір R_d є великим порівняно з опором ділянки електропровідного паперу між точкою А і зовнішнім електродом, під'єднання вимірювального кола не вносить помітних викривлень у силі струму на цій ділянці, і, отже, у спад напруги $U(r)$ між точкою А і зовнішнім електродом. Якщо знехтувати опором зони контакту між зондом і електропроводним папером, а також внутрішнім опором мікроамперметра порівняно з величиною R_d , то струм, що протікає через мікроамперметр:

$$I(r) = \frac{U(r)}{R_d},$$

де r - відстань від осі моделі до точки А.

Вимірявши силу струму $I(r)$, що протікає через мікроамперметр, знайдемо:

$$U(r) = I(r) R_d. \quad /5.6/$$

Для точнішого визначення $I(r)$ виміри повторюють кілька разів для точок А, що знаходяться на різних радіусах, але на однаковій відстані від осі моделі. Після цього знаходять середнє значення:

$$\langle I(r) \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i(r). \quad /5.7/$$

І, нарешті, отримуємо:

$$U(r) = \langle I(r) \rangle R_d.$$

Описана нами установка дозволяє змінювати r від 1 см /внутрішній електрод/ до 8 см /зовнішній електрод/ з кроком $\Delta r = 1$ см. Значення R_d бказано на установці.

Використовуючи обчислені значення $U(r)$, можна знайти залежність напруженості поля в даній точці електропровідного паперу від відстані r . Для цього використовуємо залежність між $E(r)$ і $U(r)$:

$$E(r) = \frac{U(r) - U(r + \Delta r)}{\Delta r}.$$

У даній роботі напруга $U(r)$ вимірюється в точках, що знаходяться на відстані $\Delta r = 0,01$ м одна від одної. Напруженість поля в цих точках можна визначити, якщо скористатися даними для $U(r)$. Проте, розрахунок поля в цих точках був би не досить точним. Значно точніше можна визначити напруженість в проміжних точках: $r = 1,5; 2,5; \dots; 7,5$ см за формулою

$$E(r + \frac{1}{2} \text{ см}) = \frac{U(r) - U(r + 1 \text{ см})}{0,01} \quad /5.8/$$

у вольтах на метр В/м, якщо U подано у вольтах.

Порядок виконання роботи

1. Користуючись описом, ознайомитися з установкою.
2. Підготувати установку до роботи.

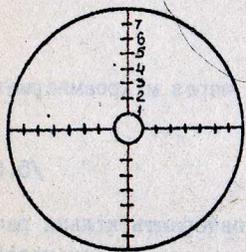


Рис. 5.2

Для цього перевести ручку потенціометра, що регулює напругу на виході "3...9 В" УИПа, у крайню ліву позицію і під'єднати з допомогою провідників установку до гнізд "3...9 В", стежачи за полярністю.

3. Увімкнути тумблер "СЕТЬ" УИПа.
4. Доторкнутися зондом внутрішнього електрода і обертанням ручки потенціометра регулятора УИПа "3...9 В" домогтися, щоб стрілка мікроамперметра відхилилася на всю шкалу приладу /за необхідності переключити тумблер, що змінює межі регулювання напруги/.

Позначимо максимальний струм, що протікає через прилад, I_0 . Очевидно, $U_0 = I_0 R_d$.

5. Вибрати на електропровідному папері промінь /радіус/. Встановити зонд послідовно в точки цього радіуса на відстані 1, 2, 3, ..., 8 см (рис. 5.2) і записати відповідні покази мікроамперметра $I_i(r)$ в другий стовпчик табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Радіус r , см	Струм $I_i(r)$, мкА, за променями				Середній струм $\langle I(r) \rangle$	$U(r)$, В	
	1-й	2-й	3-й	4-й		Експериментальне значення $U_{\text{екс}} = \langle I(r) \rangle R_d$	Теоретичне значення

Примітка. При вимірюванні струму зонд потрібно с'явити не на сам промінь, а поряд з ним на електропровідний папір. Зонд має бути притиснутий до паперу, щоб забезпечити добрий контакт, про що можна зробити висновок з досягнення струмом максимального значення.

6. Повторити вимірювання, описані в п. 5, на 2, 3, 4-му променях. Отримані значення $I_2(r), I_3(r), I_4(r)$ занести у табл. 5.1.

7. Вимкнути УИП. Зонд вставити в гніздо на установці. Ручку регулятора напруги на виході "3...9 В" повернути в крайню ліву позицію.

8. Виміряти з допомогою лінійки радіуси внутрішнього $r_{\text{вн}}$ і зовнішнього $r_{\text{з}}$ електродів і занести дані до протоколу. Туди ж занести значення R_d , вказане на установці.

Обробка результатів вимірювань

1. Обчислити значення $U_0 (U_0 = I_0 R_d)$.
2. Обчислити а/ для кожного значення $r / 1, 2, 3, \dots, 8$ см / середнє значення струму $I(r)$ за формулою /5.7/; б/ експериментальне значення різниці потенціалів $U_{\text{екс}}(r) = \langle I(r) \rangle R_d$; в/ теоретичне значення різниці потенціалів $U_{\text{теор}}(r)$ за формулою /5.4/. Занести одержані значення у табл. 5.1.
3. Розрахувати за формулою /5.8/ експериментальне значення $E_{\text{екс}}$ для $r = 1,5; 2,5; 3,5; \dots; 7,5$ см. Занести результати у табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Радіус r , см	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5
$E_{\text{екс}}$, В/м							
$E_{\text{теор}}$, В/м							

4. За формулою /5.5/ знайти теоретичне значення $E_{\text{теор}}(r)$ для тих самих значень r , що і в п.3, а також внести їх у табл. 5.2.

5. Користуючись даними табл. 5.1, 5.2, побудувати графіки залежностей $E_{\text{теор}}$ і $U_{\text{теор}}$ від r і нанести на ці графіки результати експерименту, виділяючи точки колючками.

6. Оцінити середнє відносне відхилення ϵ_U і ϵ_E експериментальних даних від теоретичних кривих /у процентах відносно максимального значення U і E /.

Контрольні запитання

1. Що таке напруженість і потенціал електростатичного поля?
 3. Який зв'язок між напруженістю і потенціалом у даній точці електростатичного поля?
 3. Яке поле називається потенціальним? Доведіть потенціальний характер електростатичного поля?
 4. У чому полягає метод моделювання електростатичних полів з допомогою струмів у слабкопровідному середовищі?
 5. Як довести, що лінії струму ортогональні до еквіпотенціальних поверхонь?
 6. Як виводяться формули для $E(r)$ і $U(r)$ у даній роботі?
 7. Як провадяться вимірювання $U(r)$ у даній роботі?
 8. Як обчислити $E(r)$ за вимірними значеннями $U(r)$?
- [1, т.2, §5,8,12-14,31,32; 2, §5,6,18,19,40,41,46,47]

Лабораторна робота № 6

ПОЛЯРИЗАЦІЯ СЕГНЕТООЛЕКТРИКІВ

Мета роботи - дослідити залежності поляризації діелектриків від напруги електричного поля.

Прилади і пристрої: джерело струму УШП-2, електронний осцилограф типу СІ-19Б, досліджуваний сегнетоелектрик, наприклад титанат барію, підвищуючий трансформатор, потенціометри, еталонний конденсатор ємністю 0,1 мкФ.

Теоретичні відомості

У більшості діелектриків поляризація відсутня, якщо немає зовнішнього електричного поля, тобто сумарний електричний дипольний момент діелектрика дорівнює нулю. Якщо внести такі діелектрики в електричне поле, вони поляризуються. На поверхні діелектрика з'являються зв'язані заряди і відповідне їм зворотне поле, що зменшує зовнішнє електричне поле. Для кількісної оцінки ступеня поляризації діелектрика користуються вектором поляризації \vec{P} , який характеризується електричним дипольним моментом одиниці об'єму діелектрика

$$\vec{P} = \frac{\sum \vec{p}_i}{\Delta V},$$

де p_i - дипольні моменти окремих молекул, що знаходяться в об'ємі ΔV ; ΔV - фізично нескінченно малий об'єм.

Для великого класу ізотропних діелектриків і широкого кола явищ вектор поляризації пропорційний вектору напруженості електричного поля всередині діелектрика E :

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E},$$

де χ - діелектрична проникність речовини діелектрика /безрозмірна величина/.

Такий характер залежності між \vec{P} і \vec{E} пояснюється тим, що напруженості макроскопічних електричних полів звичайно набагато менші порівняно з напруженостями мікрополів всередині атомів і молекул.

Електричним зміщенням називається векторна величина $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$. В ізотропних діелектриках \vec{D} і \vec{E} зв'язані співвідношенням

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 \chi \vec{E} = \epsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon \vec{E},$$

де ϵ - відносна діелектрична проникність речовини.

З молекулярної точки зору поляризація діелектриків полягає або у зміщенні пружно зв'язаних зарядів, що утворюють молекулу, атом чи іон діелектрика в електричному полі /пружна поляризація/, або у появі упорядкованості в хаотичному тепловому русі слабо пов'язаних дипольних молекул чи іонів під дією електричного поля /релаксаційна поляризація/. Пружна поляризація може бути електронною чи іонною.

Якщо діелектрик складається з неполярних молекул, то в електричному полі відбувається зміщення електронів відносно ядер в атомах /в іонах/ і молекула одержує дипольний момент /індукований дипольний момент/, пропорційний напруженості електричного поля \vec{E} . Таким чином, χ і ϵ для таких діелектриків не залежить від \vec{E} . Особливістю електронної поляризації є незалежність χ і ϵ від температури.

Іонна поляризація пружного зміщення виникає при пружному зміщенні в електричному полі додатно і від'ємно заряджених іонів, що утворюють ґратку іонних кристалів, від їх положення рівноваги. В цьому випадку зв'язок між \vec{P} та \vec{E} лінійний, тобто χ і ϵ не залежать від \vec{E} .

Існують діелектрики, молекули яких за відсутності зовнішнього електричного поля мають дипольний момент /полярні молекули/. За умови $E = 0$ такий діелектрик не поляризований, тому що внаслідок теплового руху молекули-диполі хаотично орієнтовані у просторі.

лянка AD . Зростання ρ на цій ділянці пов'язане тільки зі збільшенням індукованої поляризації. Якщо ділянку AD продовжити вліво, то вона перетне вісь ρ у точці, що відповідає спонтанній поляризації ρ_0 . Поляризація сегнетоелектрика складається зі спонтанної та індукованої.

Доменна структура діелектрика призводить до явища діелектричного гістерезису. Це явище полягає у тому, що за зменшення зовнішнього електричного поля зміна поляризації відбувається не кривою DAO , а кривою DAP_0 , яка розміщується вище. Це викликано тим, що поляризований стан у сегнетоелектриках зберігається навіть після зменшення напруженості поля до нуля. Отже, поляризація ρ не визначається одночасно значенням напруженості поля E , а залежить також від попереднього стану сегнетоелектрика. Ця властивість називається гістерезисом. Поляризація, яка зберігається за відсутності зовнішнього поля, називається залишковою поляризацією /точка P_0 на рис. 6.1/.

Щоб зняти залишкову поляризацію, необхідно змінити напрям зовнішнього електричного поля на протилежний. Значення напруженості зворотного електричного поля, за якої поляризація зникає, називається коерцитивною силою, або коерцитивним полем E_x . Якщо сегнетоелектрик помістити до змінного електричного поля, то внаслідок наявності гістерезису залежність $\rho = \rho(E)$ матиме вид замкненої кривої /крива $AP_0E_xA'BAI$, що має назву петлі гістерезису. Аналогічний вигляд має і залежність $D = D(E)$. Дійсно, $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$, але оскільки для сегнетоелектриків $\chi \gg 1$, то $\rho \gg \epsilon_0 E$ і $D \approx \rho$. У лабораторній роботі досліджується залежність $D = D(E)$ для титанату барію який є сегнетоелектриком в області температур від 5 до 120 °C.

Опис експериментальної установки та методики вимірювань

Електричну схему експериментальної установки показано на рис. 6.2.

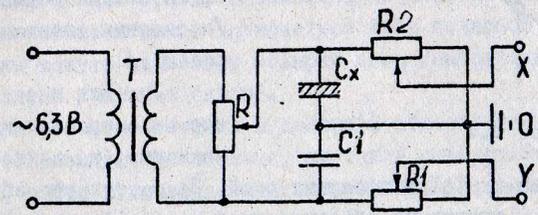


Рис. 6.2

Живлення здійснюється від виходу УІП "63 В" через підвищувальний трансформатор T . Змінна регульована напруга, що знімається з вторинної обмотки трансформатора з допомогою потенціометра $R1$ подається на два послідовно з'єднані плоскі конденсатори C_x і $C1$. Між обкладками конденсатора C_x знаходиться досліджуваний сегнетоелектрик. По-значимо через U_x і $U1$ напруги на конденсаторах відповідно C_x і $C1$; через E і D - напруженість електричного поля і електричне зміщення всередині сегнетоелектрика, через S і l - площу пластин і відстань між ними для конденсатора C_x . Тоді для напруженості поля E і електричного зміщення D можна записати співвідношення

$$E = \frac{U_x}{l}; \quad /6.1/$$

$$D = \frac{q_x}{S} = \frac{q_1}{S} = \frac{U_1 C_1}{S}, \quad /6.2/$$

де q_x і q_1 - заряди на обкладках відповідних конденсаторів /при послідовному з'єднанні конденсаторів вони однакові: $q_x = q_1$. Таким чином, напруга на конденсаторі C_x буде пропорційна E - напруженості електричного поля у сегнетоелектрику, а напруга U_1 буде пропорційна D - електричному зміщенню у сегнетоелектрика. Подаючи напругу U_x на вертикальні пластини / X -пластини/ осцилографа, на екрані осцилографа отримуємо залежність $D = D(E)$, тобто на екрані в деякому масштабі отримаємо зображення петлі гістерезису сегнетоелектрика. Розмір петлі залежатиме від амплітуди змінної напруги, що подається на конденсатори й регулюється потенціометром R . Зміщення променя в напрямках осей X та Y залежить також від чутливості відповідних каналів осцилографа. Якщо позначити ціну поділки осі X масштабної сітки осцилографа через a_x /у вольтах на поділку/, а осі Y - через a_y , то можна записати:

$$U_x = a_x X; \quad U_1 = a_y Y. \quad /6.3/$$

Очевидно, що коефіцієнти a_x і a_y визначаються не тільки позицією ручки осцилографа "Підсилювач X " і "Підсилювач Y ", але й позиціями ковзунів потенціометрів $R1$ і $R2$ /рис. 6.2/. Потенціометри $R1$ і $R2$ використовуються в роботі як підлагоджувальні.

Враховуючи співвідношення /6.3/, формули /6.1/ і /6.2/ можна переписати так:

$$E = \frac{a_x}{l} X; \quad /6.4/$$

$$D = \frac{C_1 a_y}{s} y. \quad /6.5/$$

Якщо з допомогою потенціометра R змінювати напругу конденсаторів, то, користуючись даними дослідів й обчисливши E і D за формулами /6.4/ і /6.5/, можна побудувати криву залежності $D = D(E)$.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути УИП-2 й осцилограф у мережу.
2. Встановити ручку потенціометра R у крайню ліву позицію, що відповідає відсутності напруги в установці і, отже, на входах X, Y осцилографа.
3. Перемикач "Горизонт. пластини" на осцилографі встановити у позицію "Вих".
4. Перевести ручку потенціометра R у крайню праву позицію. Тоді на конденсатори C_x і C_1 подається максимальна напруга, позначимо відповідно U_{x0} і U_{10} .
5. З допомогою ручок горизонтального та вертикального входів X та Y осцилографа домогтися, щоб петля на екрані осцилографа займала всю площу масштабної сітки.
6. Визначити координати верхньої точки петлі гістерезису X_0 і Y_0 і записати у протокол. Туди ж занести значення $U_{x0}, U_{10}, C_1, l, S$, наведені у паспорті.
7. За формулами $a_x = \frac{U_{x0}}{X_0}$; $a_y = \frac{U_{10}}{Y_0}$ знаходимо a_x і a_y у вольтах на поділку.
8. Поступово зменшуючи з допомогою потенціометра R напругу живлення, зробити 8-10 вимірів значення координат X та Y верхнього кінця петлі за різних напруг.

Обробка результатів вимірювань

1. За формулами /6.4/ і /6.5/ визначити E і D .
2. За формулою $\epsilon = \frac{D}{\epsilon_0 E}$ обчислити відносну діелектричну проникність сегнетоелектрика для різних значень напруженості електричного поля E .
3. За отриманими табличними даними побудувати графіки залежностей $D = D(E)$ і $\epsilon = \epsilon(E)$.

X , мм	
Y , мм	
E , В/м	
D , Кл/м ²	
ϵ	

Контрольні запитання

1. Що таке електричний диполь? Наведіть приклади диполів.
 2. Як поводиться диполь в однорідному електричному полі?
 3. У чому полягає поляризація діелектриків? Що таке вектор поляризації?
 4. Які види поляризації ви знаєте? Охарактеризуйте їх.
 5. Як описується електричне поле в діелектриках? Що таке вектор електричного зміщення?
 6. Що таке спонтанна поляризація діелектриків і піроелектриків?
 7. Які властивості й будова сегнетоелектриків? Що таке точка Кюрі?
 8. У чому полягає явище гістерезису для сегнетоелектриків?
 9. Що таке конденсатори? Які властивості послідовного з'єднання конденсаторів?
 10. Чому D пропорційне Y , а E пропорційне X ?
 11. Який порядок дослідження залежності $D = D(E)$?
- [1, т.2, §9, 15, 19, 23, 27; 2, §4, 10, 12, 15, 26, 38, 39; 5]

Лабораторна робота № 7
ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ

Мета роботи - вивчити залежності величини термоЕРС від температури і визначення коефіцієнта термоЕРС термопари.

Прилади і пристрої: установка для дослідження термоЕРС, блок живлення УИП-2; потенціометр ПП-63; міст сталого струму.

Теоретичні відомості

У 1821 р. Зеебек встановив, що в замкненому електричному колі, що складається з різнорідних провідників, виникає електрорушійна сила, якщо в місцях контактів підтримувати різні температури. Це явище дістало назву явища Зеебека, а вказана електрорушійна сила - термоЕРС. У найпростішому випадку, коли електричне коло складається з двох різних провідників, воно називається термоелементом, або термопарою.

ТермоЕРС залежить тільки від температури гарячого T_1 і холодного T_2 спаїв /контактів/ і від природи матеріалів /провідників або напівпровідників/, що утворюють термопару.

У невеликому інтервалі температур термоЕРС можна вважати пропорційною $T_1 - T_2 = \Delta T$ і деякому коефіцієнту α , який називається коефіцієнтом термоЕРС, або чутливістю термопари:

$$\mathcal{E} = \alpha \Delta T. \quad /7.1/$$

Коефіцієнт термоЕРС α залежить від роду обох матеріалів і від інтервалу температур, в якому досліджується або використовується термопара. Порядок величини коефіцієнта α для металів і сплавів знаходиться в інтервалі $10^{-4} \dots 10^{-1}$ мВ/К.

Поява в колі термопари струму при створенні градієнта температур між спаями означає, що в колі виникають сторонні сили, які діють на носіїв струму. Ці сторонні сили виникають у місцях спаїв термопари і тому ЕРС термопари є різницею ЕРС в гарячому і холодному контактах:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}(T_1) - \mathcal{E}(T_2). \quad /7.2/$$

З'ясуємо фізичну природу виникнення термоЕРС у спаях термопари. ТермоЕРС обумовлена, в основному, двома причинами.

1. На межі між двома різними металами виникає різниця потенціалів, яка називається внутрішньою контактною різницею потенціалів. Виникнення контактної різниці потенціалів можна пояснити, скориставшись моделлю вільних електронів. Розглянемо два різних метали 1 і 2 /рис. 7.1/, що знаходяться в контакті за однакової температури, тобто розглянемо один спай термопари.

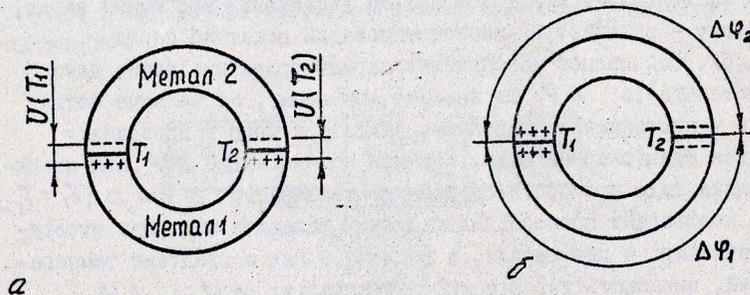


Рис. 7.1

Через те що концентрація електронів у металах різна, виникає переважний дифузійний потік електронів у напрямі до металу з меншою концентрацією електронів. Припустимо, що концентрація електронів у металі 1 більша, ніж у металі 2. Тоді внаслідок дифузії метал 2 зарядиться від'ємно й електрони, що перейшли у метал 2, будуть локалізовані біля контакту, тому що вони утримуються некомпенсованим додатним зарядом металу 1. Внаслідок цього у місці контакту утвориться подвійний електричний шар /рис. 7.1,а/. Електричне поле подвійного електричного шару спрямоване так, що перешкоджає дифузії електронів з першого металу в другий. Дифузія припиняється за деякого значення різниці потенціалів \mathcal{U} між металами. Ця різниця потенціалів відповідає стану рівноваги між металами і є внутрішньою контактною різницею потенціалів. Контактна різниця потенціалів зосереджена в дуже тонкому приграничному шарі. Для даної пари металів внутрішня контактна різниця потенціалів залежить від температури контакту T : $\mathcal{U} = \mathcal{U}(T)$. В термопарі виникають дві контактні різниці потенціалів: на гарячому кінці $\mathcal{U}(T_1)$ і на холодному $\mathcal{U}(T_2)$. Якщо вибрати напрям обходу кола термопари за годинниковою стрілкою за додатний, то повний приріст потенціалу на спаях $\mathcal{E}_{кон} = \mathcal{U}(T_2) - \mathcal{U}(T_1)$.

Ця величина називається контактною складовою термоЕРС. Отже, наявність контактної складової термоЕРС зумовлена температурною залежністю контактної різниці потенціалів.

2. Якщо існує перепад температур вздовж провідника, то електрони на гарячому кінці мають вищі швидкості й енергії, ніж на холодному. Внаслідок цього виникає потік електронів від гарячого кінця до холодного і на холодному кінці збирається додатковий від'ємний заряд, а на гарячому – залишається некомпенсований додатний заряд /рис. 7.1,б/. Цей процес накопичення заряду триватиме доти, доки різниця потенціалів $\Delta \varphi$, що виникає при цьому, не викличе потік електронів у протилежному напрямку, внаслідок чого у провіднику встановиться стаціонарний стан. Різниця потенціалів $\Delta \varphi$ між кінцями провідника буде пропорційною різниці температур: $\Delta \varphi = \beta (T_1 - T_2)$, де β – коефіцієнт пропорційності, який залежить від роду провідника. У термопарі є два метали, в кожному з них є градієнт температур і, отже, виникають дві різниці потенціалів: $\Delta \varphi_1$ і $\Delta \varphi_2$ /рис. 7.1,б/. Ці різниці потенціалів дорівнюють

$$\Delta \varphi_1 = \beta_1 (T_2 - T_1); \quad \Delta \varphi_2 = \beta_2 (T_1 - T_2).$$

Повний приріст потенціалу всередині провідника при обході контуру термопарі за годинниковою стрілкою /раніше цей напрямок було вибрано як додатний/

$$\mathcal{E}_{об} = \Delta \varphi_1 + \Delta \varphi_2 = \beta' (T_1 - T_2),$$

де $\beta' = \beta_2 - \beta_1$.

Величина $\mathcal{E}_{об}$ називається об'ємною складовою термоЕРС.

Повна ЕРС термопарі є алгебраїчною сумою контактної та об'ємної складових:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{кон} + \mathcal{E}_{об} = U(T_2) - U(T_1) + \beta' (T_1 - T_2).$$

Цей вираз можна подати ще й так:

$$\mathcal{E} = [\beta' T_1 - U(T_1)] - [\beta' T_2 - U(T_2)].$$

Одержаний вираз для термоЕРС доводить справедливість формули /7.2/, причому $\mathcal{E} = \beta' T - U(T)$.

Опис експериментальної установки та методика вимірювання

Експериментальна установка для вивчення залежності величини термоЕРС від температури складається з нагрівача, всередині якого знаходиться термоопір TO і один спай термопарі TP /рис.7.2/. Термоопір служить для вимірювання температури гарячого спаю термопарі /при цьому використовується залежність опору термістора від температури/.

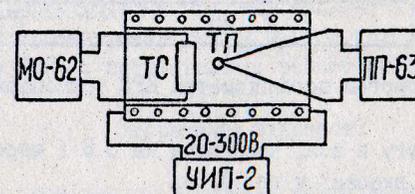


Рис. 7.2

Термоопір потрібно спочатку проградувати, тобто побудувати графік залежності його опору від температури. Цей графік знаходиться на робочому місці біля установки. Для визначення температури всередині нагрівача у тому місці, де знаходиться термістор, вимірюють його опір з допомогою моста сталого струму типу МО-62. Знаючи опір термістора, з графіка залежності $R = R(T)$ визначають температуру всередині нагрівача. Гарячий спай термопарі знаходиться безпосередньо біля термоопору, тому його температура практично дорівнює температурі термістора. Температури термістора та термопарі однакові ще й тому, що в тій області нагрівача, де вони знаходяться, немає градієнта температур.

Електрорушійна сила термопарі вимірюється компенсаційним методом з допомогою потенціометра ПП-63. Температуру всередині нагрівача можна плавно змінювати, регулюючи силу струму, що проходить через його обмотку. Напруга для живлення обмотки нагрівача подається з виходу "20...300 В" джерела живлення УИП-2.

Порядок виконання роботи

1. Встановити ручку регулятора напруги виходу "20...300 В" УИП в крайню ліву позицію, а перемикач діапазонів цього виходу в позицію "70 В". Увімкнути УИП в мережу і дати прогрітися протягом 5...10 хв.

2. Увімкнути потенціометр ПШ-63 і міст МО-62 й після прогріву підготувати їх до роботи.

3. Встановити на виході "20...300 В" напругу близько 5 В. Виміряти з допомогою моста опір R термістора. Повторюючи вимірювання опору через 2...3 хв, встановити момент, коли опір не буде більше змінюватися. Це відповідатиме стаціонарному тепловому режиму нагрівача. Записати в таблицю значення опору R за стаціонарного режиму нагрівача:

R, Ω	$\mathcal{E}, \text{мВ}$	$T, \text{К}$
-------------	--------------------------	---------------

4. Виміряти з допомогою потенціометра ЕРС термопари і занести результати у таблицю.

5. Збільшити напругу в колі нагрівача на 5 В і через 2...3 хв повторити вимірювання, вказані у пп. 3, 4.

6. Виконати ІО-І2 дослідів, збільшуючи кожного разу напругу в колі нагрівача на 5 В /не подавати напругу більшу за 70...80 В/. Результати дослідів записати у таблицю.

7. Розбити область зміни температури на ІО-І5 невеликих однакових інтервалів шириною ΔT і визначити в кожному інтервалі відповідний приріст термо ЕРС $\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}(T + \Delta T) - \mathcal{E}(T)$. Обчислити для кожного інтервалу коефіцієнт термо ЕРС термопари, користуючись формулою $\alpha(T) \approx \frac{\Delta \mathcal{E}}{\Delta T}$. Побудувати графік залежності $\alpha = \alpha(T)$.

Контрольні запитання

1. У чому полягає явище Зеебека? Як залежить термо ЕРС від температури?
2. Що таке коефіцієнт термо ЕРС термопари і від чого він залежить?
3. Чому виникає контактна різниця потенціалів? Що таке контактна складова термо ЕРС?
4. Чому виникає різниця потенціалів між кінцями провідника, в якому існує градієнт температур? Що таке об'ємна складова термо ЕРС?
5. Що таке сторонні сили й електрорушійна сила?
6. У чому полягає суть мостового методу вимірювання опору?
7. Як формулюється перший закон Кірхгофа? Другий закон Кірхгофа?
8. В якій послідовності виконуються вимірювання опору мостом сталого струму типу МО-62?

9. У чому полягає компенсаційний метод вимірювання ЕРС і напруги?

10. Як користуватися потенціометром ПШ-63 для вимірювання ЕРС?
[1, т.2, §33, 36, 77, т.3, §62, 63; 2, § 43, 45, 104, 105]

Лабораторна робота № 8

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРОННОЇ ЕМІСІЇ

Мета роботи - визначити роботу виходу вольфраму.

Прилади і пристрої: спеціальний вакуумний діод з вольфрамовим катодом; мікроамперметр типу М 906; вольтметр змінного струму; джерело струму УІП-2; потенціометр; резистори.

Теоретичні відомості

Електрони провідності в металах мають велику концентрацію /порядку 10^{28} см^{-3} /, але самочинно не виходять з металу. Цьому перешкоджає електричне поле, що виникає в поверхневому шарі. Для того щоб електрон міг вийти з металу, повинна бути виконана робота проти сил цього поля, яка називається роботою виходу електрона з металу.

Всередині металу заряд електронів скомпенсований зарядом додатних іонів. Проте електрони поверхневого шару внаслідок теплового руху можуть перетнути поверхню металу й віддалитися на кілька атомних відстаней. Над поверхнею утворюється електронна хмарка, густина якої швидко зменшується при віддаленні від металу. Тому навколо поверхні металу утворюється подвійний електричний шар, який складається з від'ємно зарядженого електронного шару і додатно зарядженого приповерхневого шару іонів металу. Цей подвійний шар не створює електричного поля у зовнішньому просторі, але при проходженні через нього електрон повинен виконати певну роботу.

Причиною появи роботи виходу є також і те, що під час виходу електрона з металу /внаслідок теплового руху/ на поверхні останнього з'являється індукований додатний заряд, який притягує електрон до себе. Силу, з якою цей додатний заряд діє на електрон, можна обчислити, скориставшись методом дзеркальних зображень. Робота проти "сили електричного зображення" складає частину роботи виходу електрона. Повна робота виходу електрона таким чином, складається з роботи, потрібної для проходження подвійного електричного шару, і роботи проти "сили електричного зображення".

Затримуюче електричне поле зосереджене в тонкому шарі поблизу поверхні металу, тому далеко від металу на електрон не діють ніякі сили. Отже, зовні металу потенціальна енергія електрона має стати величину. Причемо це значення потенціальної енергії за нульовий рівень /рис. 8.1/.

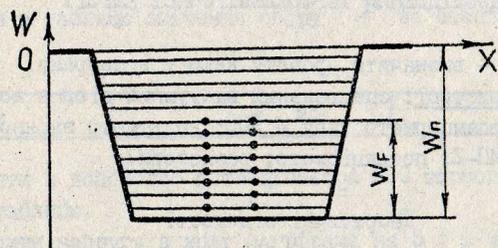


Рис. 8.1

В області затримуючого поля потенціальна енергія електрона різко зменшується, за що відповідають спрямовані всередину металу сили. Всередині металу потенціальна енергія електрона також має стати від'ємне значення. Якщо спрямувати вісь x перпендикулярно до поверхні металу, то залежність потенціальної енергії W від x матиме вигляд, зображений на рис. 8.1. Отже, для електронів метал становить потенціальну яму глибиною W_T . Повна енергія електрона в металі - це сума потенціальної та кінетичної енергії. Кінетична енергія електрона всередині металу може набувати тільки певних дозволених значень. Дозволені значення енергії утворюють систему близько розміщених дискретних рівнів. На рис. 8.1 енергетичні рівні зони провідності вписані в потенціальну яму. За температури $T = 0$ К електрони займають найнижчі рівні, розміщуючись попарно. Найвищий заповнений електронами рівень відповідає деякій певній енергії електронів, яка називається енергією Фермі W_F . Сам цей рівень називається рівнем Фермі. З рис. 8.1 видно, що за $T = 0$ К енергія електронів у металі знаходиться в інтервалі $W_T \leq E \leq -(W_T - W_F)$, тому в цьому випадку електрони не можуть самостійно покинути метал. Для того щоб електрон вийшов з металу, йому треба надати додаткової енергії, мінімальне значення якої дорівнює $W_T - W_F$. Цю енергію можна передати, зокрема, нагріванням. Мінімальна енергія $W = W_T - W_F$,

яка потрібна для переведення електрона з металу /з рівня Фермі/ у вакуум, називається роботою виходу електрона з металу. При температурі вищій від абсолютного нуля збільшується кінетична енергія теплового руху електронів в околі рівня Фермі. Це призводить до перерозподілу електронів по рівнях і розмиванню межі між повністю зайнятими та вільними електричними рівнями. Якщо одержана електронном енергія перевищує W , такий електрон може вийти з металу. Явище випромінювання електронів нагрітими металами /або будь-якими твердими та рідкими тілами/ називається термоелектронною емісією.

Електрони, що вилітають з нагрітого металу, можна видалити з поверхні, якщо створити в оточуючому метал вакуумі електричне поле, спрямоване до поверхні металу. При цьому у вакуумі буде текти електричний струм, що називається термоелектронним.

Для спостереження та вивчення термоелектронної емісії використовують вакуумний діод. Один з його електродів - катод - це нитка з тугоплавкого металу /молібден, вольфрам тощо/, що розігрівається електричним струмом. Другий електрод /анод/ найчастіше має форму циліндра, навколо катода, на нього осідають термоелектрони. Щоб одержати в діоді термоелектронний струм, потрібно катод нагріти, а між катодом і анодом створити прискорююче електричне поле. Сила термоелектричного струму залежить від потенціалу анода відносно катода.

На рис. 8.2 зображено залежність сили струму в діоді від анодної напруги: $I_a = I(U_a)$. Ця крива називається вольт-амперною характеристикою діода. На вольт-амперній характеристиці можн. виділити три ділянки: I, II, III. При достатньо великій напрузі на аноді U_a /область III/ усі термоелектрони сягають анода і тому I_a майже не залежить від U_a . Максимальний струм через діод називається струмом насичення I_s . Невелике збільшення струму на цій ділянці згідно з формулою $I_a = I_s \left(e^{\frac{const \cdot U_a}{kT}} - 1 \right)$ зумовлене тим, що зі збільшенням прискорюючого поля глибина потенціальної ями, а, отже, й робота виходу електронів з катода дещо зменшується /ефект Шоткі/.

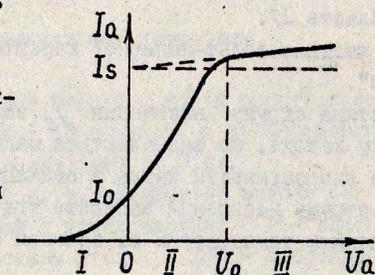


Рис. 8.2

Електрони, що рухаються у вакуумному проміжку діода, створюють в ньому від'ємний заряд. Електричне поле цього заряду $E_{об}$ накладається на зовнішнє поле $E_{зобн}$ між анодом і катодом. Поле $E_{об}$ гальмуватиме електрони у просторі, що прилягає до катода, і прискорюватиме їх біля анода.

У режимі струму насичення внаслідок зменшення концентрації електронів в області просторового заряду повне поле $E_{збн} + E_{об}$ прискорюватиме електрони в усьому вакуумному проміжку. За зменшення анодної напруги U_a зменшуватиметься і $E_{зобн}$, тому за деякого значення $U_a = U_0$ сумарне поле катода дорівнюватиме нулю, а за ще менших значень U_a воно стане навколо катода гальмуючим. Внаслідок цього струм I стане меншим, ніж I_s і змінюватиметься зі зміною відповідно до закону Ленгмюра: $I_a \sim U_a^{3/2}$ /ділянка II/.

З наступного зменшення потенціалу анода поле $E_{зобн} + E_{об}$ стає гальмуючим в усьому вакуумному проміжку. На анод тепер потраплятимуть тільки ті електрони, чия кінетична енергія достатня для того, щоб подолати зовнішній затримуючий потенціал U_a . Залежність струму I від U_a в цьому випадку визначається геометрією електродів і законом розподілу термоелектронів за початковими швидкостями /область I/.

Ця частина вольт-амперної характеристики називається "кривою затримки".

Густина струму насичення j_s залежить від емісійної здатності матеріалу катода, що визначається максимальним числом електронів, які може випромінювати катод з одиниці поверхні за одиницю часу. Густина струму насичення залежить від матеріалу катода і збільшується з підвищенням температури за законом Річардсона - Дешмана:

$$j_s = AT^2 e^{-\frac{W}{kT}}, \quad /8.1/$$

де A - термоелектронна стала, однакова для всіх металів,

$$A = \frac{4\pi me k^2}{h^3}; \quad A = 1,2 \cdot 10^6 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-2};$$

W - робота виходу.

Формула /8.1/ може бути отримана, якщо припустити, що електрони в металі підлягають законам ідеального газу і всі електрони, що вилетіли з катода, сягають анода. З цієї формули видно, що за низьких

температур ($T \ll \frac{W}{k}$) $e^{-\frac{W}{kT}} \ll 1$. Й емісії немає. Струм насичення $I_s = j_s S / S$ - площа поверхні катода/ різко збільшується зі збільшенням температури, тому що сила цього струму визначається головним чином множителем $\exp(-\frac{W}{kT})$, який залежить від температури. Враховуючи співвідношення $I_s = j_s S$, рівняння /8.1/ перепишемо у вигляді

$$I_s = A S T^2 e^{-\frac{W}{kT}}.$$

Логарифмуючи цей вираз, дістанемо:

$$\lg \frac{I_s}{T^2} = \lg (AS) - \frac{W}{kT} \lg e = \text{const} - \frac{5040}{T} W \text{ eB.} \quad /8.2/$$

Таким чином, в координатах $(\lg \frac{I_s}{T^2}, \frac{5040}{T})$ залежність, що описується формулою /8.1/, має вигляд прямої лінії, кутівий коефіцієнт якої дорівнює роботі виходу W в електрон-вольтах. Визначивши у досліді залежність $I_s(T)$, можна обчислити роботу виходу W матеріалу катода.

Опис експериментальної установки

Для вивчення термоелектронної емісії у даній роботі використовується вакуумний діод спеціальної конструкції з вольфрамовим катодом прямого /безпосереднього/ розжарення /рис. 8.3,а/.

Катод K - це вольфрамовий дріт, натягнутий вздовж осі циліндричного анода. Анод зроблений з трьох частин: A - власне анод, який вмикається у вимірювальну схему діода, OK - охоронне кільце, яке компенсує неоднорідність поля біля країв анода і перепади температури на кінцях катода, тобто усуває небажані явища, пов'язані з обмеженими розмірами електродів. На охоронні кільця подається такий самий додатний потенціал, як і на анод. Для усунення впливу перепаду потенціалу вздовж катода /нееквіпотенціальності катода/, зумовленого струмом розжарення, катод живиться змінним струмом і під'єднується до джерела анодної напруги симетрично /рис. 8.3,б/.

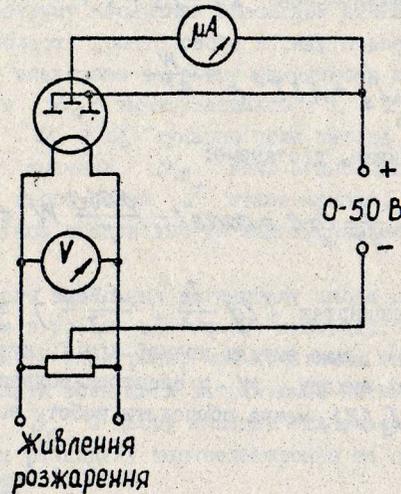
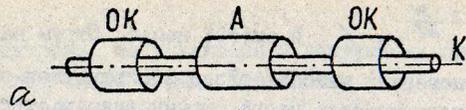


Рис. 8.3

Температура розжарення катода визначається за величиною падіння напруги на нитці розжарення, яка вимірюється вольтметром в колі катода. Для зручності вимірювання температури розжарення шкала вольтметра розмічена у градусах. Дані про залежність між температурою катода й потужністю електричного струму, довжиною та діаметром нитки було взято з довідника.

Конструктивно установка виконана у вигляді блоку, на верхній панелі якого змонтовано мікроамперметр для вимірювання анодного струму і вольтметр для вимірювання напруги розжарення, а отже, і температури катода. На панелі знаходиться також ручка "НАКАЛ" для регулювання напруги розжарення. Живлення установки здійснюється від джерела струму УИП-2. Для розжарення використовується змінний струм, що знімається з виходу "0,3 В". Анодне коло живиться від виходу "0...50 В".

Порядок виконання роботи

1. Встановити ручки регулювання напруги розжарення і анодної напруги у крайні ліві позиції, що відповідає відсутності напруг.
2. Увімкнути УИП і дати прогрітисся протягом 5...10 хв.
3. Встановити ручку "НАКАЛ" у таку позицію, щоб за відсутності анодної напруги з'явився невеликий анодний струм /5...10 мкА/. Дати діоду прогрітисся /коливання анодного струму повинні припинитися/. Записати у табл. 8.1 температуру катода T_1 /у кельвінах/.
4. Для 10-15 різних значень анодної напруги U_a виміряти анодний струм I_a . Дані записати у табл. 8.1. Межі зміни повинні забезпечити отримання ділянки насичення.

Таблиця 8.1

T_1		T_2		T_3		T_4		T_5	
$U_a, В$	$I_a, мкА$								

5. Виконати вимірювання, вказані в п.4, для п'яти різних температур катода. Дані записати в табл. 8.1.

Обробка результатів вимірювань

1. Побудувати на одному графіку всі одержані вольт-амперні характеристики, використавши дані табл. 8.1.
2. Визначити графічно /див. рис. 8.1/ силу струму насичення для кожного значення температури T , занести значення в табл. 8.2.
3. Розрахувати і занести в табл. 8.2 вирази $\frac{5040}{T}$;

$$\frac{I_s (мкА) \cdot 10^6}{T^2}; \text{ і } \lg \frac{I_s \cdot 10^6}{T^2}$$

/множник 10^6 введено для зручності розрахунків, він не впливає на значення роботи виходу/.

Таблиця 8.2

$I_s, мкА$	$T, К$	$\frac{5040}{T}$	$\frac{I_s \cdot 10^6}{T^2}$	$\lg \frac{I_s \cdot 10^6}{T^2}$

4. Використовуючи дані табл. 8.2, побудувати графік, відкладаючи на осях координат величину $\frac{5040}{T}$ на осі x і $lg \frac{I_s \cdot 10^6}{T^2}$ на осі y . Графік повинен мати вигляд прямої лінії, що проходить між двома точками.

5. Визначити кутовий коефіцієнт нахилу отриманої прямої /з точністю до десятих/, який дорівнює /в електрон-вольтах/ роботі виходу електрона з вольфраму.

Контрольні запитання

1. Що таке напруженість і потенціал електричного поля? У чому полягає зв'язок між ними?
 2. Чому дорівнює енергія заряду в електричному полі?
 3. Що таке заряд, сила струму, густина струму? Який зв'язок між ними?
 4. Як формулюється закон Ома в диференціальній формі?
 5. Які причини виникнення затримуючого потенціалу у поверхневому шарі металу?
 6. Як пояснити хід кривої потенціальної енергії електрона в металі?
 7. Як розподілені електрони за рівнями в металі за умови $T = 0$ К? Що таке рівень Фермі, енергія Фермі?
 8. Що таке робота виходу? Як можна визначити її, знаючи струм насичення?
 9. У чому полягає явище термоелектронної емісії?
 10. Яка будова діода? Яка його вольт-амперна характеристика і як її пояснити?
 11. Яка залежність густини струму насичення від температури катода? У чому полягає зміст формули Річардсона - Дешмана?
 12. У чому полягає суть методу визначення роботи виходу за струмом насичення?
 13. Яка будова діода, що використовується в даній роботі?
 14. У чому полягає метод дзеркальних зображень?
- [1, т.3, § 60, 61; 2, §23, 99-102]

Лабораторна робота № 9

ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Мета роботи - визначити відношення заряду електрона e до його маси використовуючи закони руху електрона у взаємноперпендикулярних асиметричних електричному та магнітному полях.

Прилади і пристрої: вакуумний діод з циліндричним анодом, соленоїд, мікроамперметр типу М 906, джерело струму типу УШП-2, стабілізатор живлення розігріву діода, резистор.

Теоретичні відомості.

Використовується метод визначення e/m який дістав назву методу магнетрона. Походження такої назви пов'язане з електровакуумним приладом - магнетроном, який використовується для генерації електромагнітних хвиль в СВЧ-діапазоні. Метод запозичає в магнетроні конфігурацію магнітного й електричного полів.

Електрони, що вилітають у результаті термоелектронної емісії з розігрітого катода, рухаються у просторі між катодом і анодом /коаксіальні електроди/. Завдяки такій формі і розміщенню електродів, електричне поле E в міжелектродному просторі спрямоване вздовж радіуса від анода до катода. Сам вакуумний діод знаходиться асередині соленоїда так, що магнітне поле соленоїда B спрямоване паралельно осі катода, тобто перпендикулярно до електричного поля. Електричне поле прискорює електрони в просторі між електродами, а магнітне поле викривляє їх траєкторію. Розглянемо траєкторії електронів, що рухаються під дією електричного та магнітного полів. Вважатимемо, що початкова швидкість електрона, який вилетів з катода, дорівнює нулю, тобто нехтуємо тепловою швидкістю електронів. Очевидно, що за заданої орієнтації електричного та магнітного полів електрон рухатиметься в площині, перпендикулярній до осі електродів. Для розрахунків використовуємо полярну систему координат, тобто положення електрона визначатиметься вектором \vec{r} , який бере початок від осі катода, і полярним кутом φ /рис. 9.1/.

Рух електрона в площині (r, φ) з точки 1 в точку 2 зручно описати,

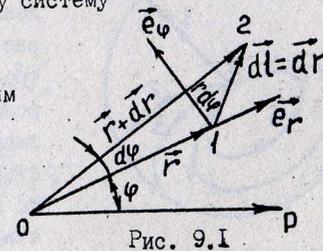


Рис. 9.1

якщо скористатися рівнянням моментів:

$$\frac{dL}{dt} = r \times qE + r \times q[\vec{v} \times \vec{B}], \quad /9.1/$$

де $q = -e$ - заряд електрона.

Спроеціюємо рівняння /9.1/ на вісь z , спрямовану вздовж осі катода. Одержимо:

$$\frac{d(mr^2\dot{\varphi})}{dt} = eBrv. \quad /9.2/$$

Визначаючи проекції окремих складових рівняння /9.1/ на вісь, брали до уваги, що $L_z = J_z \omega$, де J_z - момент інерції електрона відносно осі z , $J_z = mr^2$, звідки $L_z = mr^2\dot{\varphi}$. Очевидно, що $[\vec{r} \times q\vec{E}]_z = 0$. Складнішим виявилось визначення другої складової рівняння /9.1/, яка є подвійним векторним добутком. /Знаходження цієї проекції див. у додатку./ Проінтегруємо рівняння /9.2/ за часом:

$$mr^2\dot{\varphi} + C = \frac{1}{2} eBr^2. \quad /9.3/$$

Стала інтегрування C може бути знайдена з початкових умов. Радіус катода r_k - величина мала, тому на початку рух електрона r малий, мала і швидкість його v , а звідси й величина $\dot{\varphi}$. Це дозволяє для початкового моменту часу припустити, що $r = 0$. Тоді стала інтегрування в рівнянні /9.3/ дорівнюватиме нулю. З цього одержуємо

$$\omega = \dot{\varphi} = \frac{eB}{2m}. \quad /9.4/$$

Таким чином, кутова швидкість обертання електрона лінійно залежить від B і за заданої індукції магнітного поля є величиною сталою. Наявність кутової швидкості $\dot{\varphi}$ обертання електронів свідчить про викривлення їх траєкторії магнітним полем. На рис. 9.2 зображено приблизний вигляд траєкторії електрона. Траєкторія електрона у загальному випадку є кривою зі змінною кривиною, і кривина ця зменшується з наближенням до анода. Чим сильніше магнітне поле, тим більше викривлюється траєкторія електронів. За умови

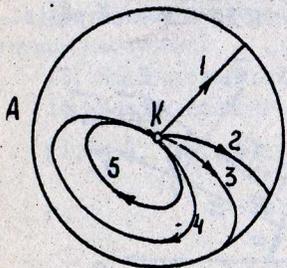


Рис. 9.2

$B = 0$ траєкторія - пряма лінія /1/ на рис. 9.2/. У слабкому полі траєкторія дещо викривлюється, але електрон все-таки сягає анода /криві 2, 3/. За деяких критичних значень індукції магнітного поля $B_{кр}$ траєкторія викривлюється настільки, що у найвіддаленішій від катода точці тільки дотикається до анода /крива 4/; нарешті, у випадках, коли $B > B_{кр}$, електрон зовсім не потрапляє на анод і повертається до катода /крива 5/. Струм діода за умови $B = B_{кр}$ починає різко зменшуватися.

Індукцію критичного поля $B_{кр}$ можна знайти, якщо взяти до уваги, що за умови $B = B_{кр}$ радіальна складова швидкості електрона у точці $r = r_a / r_a$ - радіус анода/ перетворюється на нуль. У цій точці є тільки тангенціальна складова швидкості:

$$v_c = v = r_a \dot{\varphi}. \quad /9.5/$$

Магнітне поле не здійснює роботи над електронем, тому робота переміщення електрона від катода до анода дорівнює кінетичній енергії електрона, бо початковою швидкістю вилітаючих з катода електронів нехтуємо:

$$eU = \frac{mv^2}{2}, \quad /9.6/$$

де U - різниця потенціалів між катодом і анодом.

Підставляючи у формулу /9.6/ значення v і $\dot{\varphi}$ з формул /9.4/ і /9.5/, дістанемо:

$$U = \frac{1}{8} r_a^2 B_{кр}^2 \frac{e}{m}. \quad /9.7/$$

Індукцію магнітного поля всередині соленоїда можна пов'язати з силою струму, що протікає через соленоїд I_c :

$$B = \mu_0 n I_c; \quad B_{кр} = \mu_0 n I_{кр}.$$

Враховуючи останнє співвідношення, рівняння /9.7/ можна переписати так

$$eU = \frac{e}{m} I_{кр}^2, \quad /9.8/$$

$$k = \frac{8}{\mu_0^2 n^2 r_a^2}. \quad /9.9/$$

Рівняння /9.8/ дозволяє обчислити відношення $\frac{e}{m}$. Для цього побудуємо графік залежності kU від I_{kp}^2 , тангенс кута нахилу його до осі x /вісь I_{kp}^2 / дасть величину відношення $\frac{e}{m}$.

Опис експериментальної установки

Принципову електричну схему експериментальної установки зображено на рис. 9.3, де D - діод; L - соленоїд, μA - прилад для вимірювання анодного струму; V - вольтметр для вимірювання анодної напруги U ; $R_{ш}$ - регулюючий шунт; $R1$ - опір, що симетризує потенціал нитки розжарення; $R2, R3$ - подільники анодної напруги.

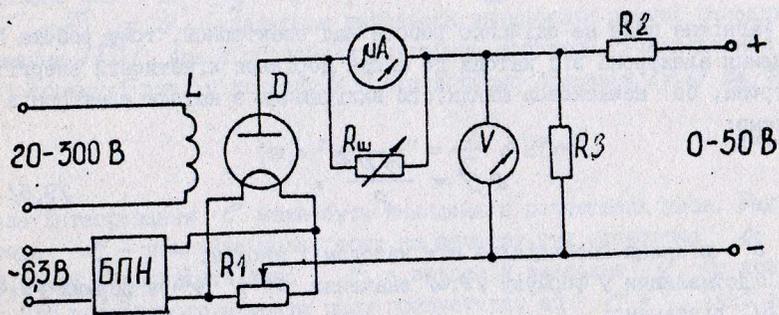


Рис. 9.3

Живлення установки здійснюється від джерела живлення УИП-2. Нитка розжарення діода живиться від виходу "6,3 В" через блок стабілізації БПН, що захищає нитку розжарення від перевантажень. Середня точка кола живлення приєднана до мінуса джерела анодної напруги. Анодне коло живиться від виходу "0-50 В", напругу виходу можна плавно регулювати потенціометром на блоці живлення. Оскільки використовується діапазон анодної напруги 0-25 В, то встановлюють на вході подільник напруги $R2, R3$, щоб вберегти установку від перевантажень. Ручку регулювального шунта мікроамперметра, яким вимірюється анодний струм, виведено на передню панель установки.

Обмотка соленоїда живиться від виходу "20-300 В" блока живлення. Сила струму соленоїда вимірюється міліамперметром панелі УИП.

Струм соленоїда можна змінювати, регулюючи напругу на виході блока живлення.

Порядок виконання роботи

1. Перед початком роботи встановити потенціометри, які регулюють напругу виходів "20-300 В" і "0-50 В" УИПа, в крайню ліву позицію. Ручку регулювального шунта мікроамперметра встановити в середню позицію.

2. Ввімкнути УИП в мережу і дати прогрітися протягом 5...7 хв.

3. З допомогою потенціометра встановити анодну напругу в межах робочого діапазону "5-25 В". Обертаючи ручку регулювального шунта, домогтися, щоб стрілка мікроамперметра, що вимірює анодний струм I_a , знаходилася в останній третині шкали /за умови $I_c = 0$ /. Записати значення U і I_a / I_a вимірюється в поділках шкали приладу/ у табл. 9.1.

Таблиця 9.1

$U_1, В$		$U_2, В$...	$U_n, В$	
$I_a, \text{дел}$	$I_c, \text{мА}$	$I_a, \text{дел}$	$I_c, \text{мА}$...	$I_a, \text{дел}$	$I_c, \text{мА}$

4. Ручкою регулювання виходу "20-300 В" збільшувати струм соленоїда з кроком 10 мА і одночасно стежити за силою анодного струму I_a . Струм соленоїда збільшувати до досягнення критичного режиму, тобто домогтися значного зменшення анодного струму зі збільшенням струму соленоїда. Значення величин I_c та I_a занести у табл. 9.1.

5. Вказані в пп. 3, 4 вимірювання провести 6-8 разів з різними значеннями анодної напруги в інтервалі "5-25 В". Для кожного значення U з допомогою регулювального шунта встановити стрілку мікроамперметра в останній третині шкали /при $I_c = 0$ />.

Обробка результатів вимірювань

1. Побудувати графік залежності $I_a = f(I_c)$ для різних значень U . Оскільки в електронів, що вилітають з катода, є деяка початкова швидкість, а також має місце розкид електронів з цієї швидкості, то залежність $I_a = f(I_c)$ /скидна характеристика/ не буде такою стрімкою, як це випливає з теорії і як зображено на рис. 9.4 пунктирною лінією. Критичні умови досягатимуться для різних електронів неодноразом і це призведе до плавнішого спадання струму /суцільна

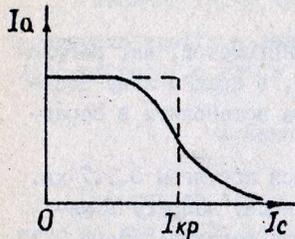


Рис. 9.4

лінія на рис. 9.4/. Ця і деякі інші причини, наприклад некоаксіальність анода та катода, призводять до додаткового згладжування кривої, що утруднює точне визначення $I_{кр}$.

2. З побудованих залежностей $I_a = f(I_c)$ визначити критичні струми соленоїда $I_{кр}$, які дорівнюють силі струму соленоїда I_c в точці найбільшої крутості спаду струму I_a . Знайдені значення $I_{кр}$ і відповідні значення U занести у табл. 9.2.

Таблиця 9.2

$U, В$	$I_{кр}, мА$	kU	$I_{кр}^2$
--------	--------------	------	------------

3. Розрахувати і занести у табл. 9.2 величини kU і $I_{кр}$. Значення λ_a і r взяти з паспорта установки.

4. Побудувати графік залежності kU від $I_{кр}^2$, що повинен мати вигляд прямої лінії; з обох боків якої знаходяться експериментальні точки. Тангенс кута нахилу цієї прямої дасть величину $\langle e/m \rangle$.

5. Порівняти одержане значення $\langle e/m \rangle$ з табличним значенням e/m для електрона і визначити відносну похибку вимірювання.

Контрольні запитання

1. Що таке сила Лоренца? Поясніть магнетизм як релятивістський ефект.
2. Як виводиться формула для величини індукції магнітного поля всередині безмежно довгого соленоїда?
3. Який вигляд матиме траєкторія заряджених частинок, що влітають зі сталою швидкістю v у магнітне поле з індукцією B , якщо а/ $v \perp B$; б/ v утворює з B деякий кут? Поясніть відповідь.
4. Як рухається заряджена частинка, що влітає в електричне поле, силові лінії якого паралельні напрямку швидкості частинки?
5. Як визначити величину відхилення зарядженої частинки в магнітному полі, напрямленому перпендикулярно до швидкості частинки?
6. Який на рис. 9.2 напрям векторів E і B , а також вектора швидкості електрона v і сили Лоренца F_L у довільній точці траєкторії для випадку коаксіальних електродів діода.

7. Які можливі траєкторії електронів за різних значень B /покажіть на рисунку/? Що таке критичне поле $B_{кр}$?

8. Як впливає зміна характеристик електричного E і магнітного B полів на форму траєкторії електрона?

9. Як пояснити хід характеристики скиду $I_a = f(I_c)$?

10. Чому, виконуючи роботу, немає потреби знати абсолютне значення анодного струму?

11. Чи змінюється релятивістська маса частинки за умови руху її в магнітному полі; в електричному полі?

[1, т.2, § 43, 50, 72, 73; 2, §40, 55, 86]

ДОДАТОК

Для розкриття виразу $\vec{r} \times q [\vec{v} \times \vec{B}]$ використаємо формулу

$$\vec{A} \times (\vec{B} \times \vec{C}) = \vec{B}(\vec{A} \cdot \vec{C}) - \vec{C}(\vec{A} \cdot \vec{B}).$$

Тоді

$$\vec{r} \times q [\vec{v} \times \vec{B}] = q \vec{v} (\vec{r} \cdot \vec{B}) - q \vec{B} (\vec{r} \cdot \vec{v}),$$

оскільки $\vec{v} \perp \vec{B}$ і перша складова дорівнює нулю. Для знаходження проєкції подвійного векторного добутку на вісь Z потрібно помножити одержаний вираз скалярно на одиничний вектор k в напрямку осі:

$$\begin{aligned} Z = (\vec{r} \times q [\vec{v} \times \vec{B}]) \cdot k &= \{-q \vec{B} (\vec{r} \cdot \vec{v})\} \cdot k = -q \vec{B} \{r (\cos \theta_n + r \psi \cos \theta_\varphi)\} \cdot k = \\ &= -q \vec{B} r \cos \theta_n k - q \frac{r^2}{B} \psi \cos \theta_\varphi k = -q B r \cos \theta_n k = e B r \cos \theta_n. \end{aligned}$$

Тут прийнято до уваги, що $\vec{v} = v \cos \theta_n \vec{e}_n + v \sin \theta_n \vec{e}_\varphi$, де \vec{e}_n і \vec{e}_φ - одиничні вектори радіуса-вектора \vec{r} і полярного кута ψ , $(\vec{B} \cdot k) = B$; $(\vec{e}_n \cdot k) = \cos \theta_n$, $(\vec{e}_\varphi \cdot k) = 0$; $q = -e$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев И. В. Курс общей физики: В 3 т. - М.: Наука, 1977-1979. - Т.1: Механика. Молекулярная физика. - 416 с.; Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - 480 с.; Т.3: Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика аномного ядра и элементарных частиц. - 304 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики: В 3 т. - М.: Наука, 1977. - Т.3: Электричество. - 430 с.
3. Калашников С.Г. Электричество. - М.: Наука, 1985. - 576 с.
4. Лабораторные занятия по физике /Под ред. Л.Л.Гольдина. - М.: Наука, 1983. - 704 с.
5. Физический практикум. Электричество и оптика /Под ред. проф. В.И.Ивероной. - М.: Наука, 1968. - 806 с.
6. Лабораторный практикум по физике: В 2 ч. / В.А.Базакца, Л.Г.Воинова, Н.И.Гнидеш и др. - Х.: Изд-во Харьк. ун-та, 1969. - Ч.1. - 244 с.
7. Кортнев А.В., Рублев Д.В., Куценко А.Н. Практикум по физике. - М.: Высш.шк., 1965. - 568 с.
8. Черкашин В.П. Физика, электричество и магнетизм. - К.: Выща шк., 1966. - 166 с.