

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Лабораторний практикум з фізики
(електрика і магнетизм)

Навчальний посібник

Дніпро 2022

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»



І. П. Гаркуша, Л. І. Барташевська, А. С. Зайцев, В.М. Мандрікевич

Лабораторний практикум з фізики
(електрика і магнетизм)

Навчальний посібник

Дніпро
НТУ «ДП»
2022

Матеріали методичного забезпечення дисципліни “Фізика” для студентів усіх спеціальностей. / Укладачі: І.П. Гаркуша, Л.І. Барташевська, А.С. Зайцев, В.М. Мандрікевич, – Д.: НТУ «ДП», 2022.– 106 с.

Укладачі:

Канд. фіз.-мат. наук, професор І.П. Гаркуша

Кандидати фіз.-мат. наук Л.І. Барташевська; А.С. Зайцев

Старший викладач В.М. Мандрікевич

Усі укладачі приймали участь в розробці методичних вказівок до лабораторних робіт та удосконаленні їх макетів.

Затверджено методичною комісією з напрямку підготовки 8.092204 №3 від 19.06.22 р. за поданням кафедри фізики (протокол № 4 від 6.06.2022 р.)

Зміст

Передмова.....	5
Основні поняття електродинаміки.....	6
Поняття про принципи роботи приладів електровимірювань.....	9
Лабораторна робота №30 Вимірювання опорів методом містка	18
Лабораторна робота №31 Вимірювання ЕРС методом компенсації	24
Лабораторна робота №32 Дослідження залежності коефіцієнта корисної дії джерела струму і його потужності від опору навантаження	30
Лабораторна робота №33 Експериментальний доказ дискретності електричного заряду (дослід Міллікена)	33
Лабораторна робота №34 Експериментальна перевірка закону Кулона на комп'ютерній моделі	37
Лабораторна робота №35 Експериментальне дослідження електростатичного поля методом моделювання	40
Лабораторна робота №36 Визначення опору міліамперметра та опору джерела струму методом шунтування	44
Лабораторна робота №38 Визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі за допомогою тангенс-гальванометра	47
Лабораторна робота №27.2 Вивчення електричних властивостей сегнетоелектриків	51
Лабораторна робота №27.3 Визначення питомого заряду електрона методом магнетрона	56
Лабораторна робота №27.4 Дослідження магнітного поля соленоїда за допомогою датчика Холла	63
Лабораторна робота №27.5 Дослідження явища взаємної індукції	68
Лабораторна робота №27.6 Вивчення явища термоелектронної емісії	72
Лабораторна робота №27.7 Дослідження гістерезису феромагнітних матеріалів	79
Лабораторна робота №40 Визначення ємності конденсатора містком Соті ..	83
Лабораторна робота №41 Визначення індуктивності котушок	86
Лабораторна робота №43 Вивчення роботи двохелектродної лампи	88
Лабораторна робота №48 Визначення відношення заряду електрона до його маси методом відхилення пучка електронів у магнітному полі Землі	92
Лабораторна робота №49 Вивчення магнітного поля соленоїда	94
Математична обробка результатів вимірювання.....	99

Передмова

Пропонований навчальний посібник написаний співробітниками кафедри фізики НТУ «Дніпровська політехніка» на основі створеного на кафедрі лабораторного фізичного практикуму відповідає всім програмам з «Фізики», що призначені для студентів технічних спеціальностей, які навчаються на кафедрі. При цьому автори широко використовували не лише свій досвід, а й досвід найкращих вузів України.

Наведені лабораторні роботи охоплюють розділ курсу фізики «Електрика та магнетизм».

Метою фізичного практикуму є самостійна перевірка студентами на досліді закономірностей, які вивчаються в курсі фізики. Виконуючи лабораторні роботи, студенти набувають навичок самостійної дослідницької роботи та, насамперед, технічно грамотного вимірювання фізичних величин.

Кожна з наведених методичних вказівок до лабораторних робіт містить короткі теоретичні відомості, опис установки, порядок виконання роботи. Для активізації самостійної роботи студента у кожній роботі наведено питання для самоконтролю.

Більшість лабораторних робіт практикуму розрахована на виконання їх студентами протягом двогодинного заняття. Через обмежений час, який відводиться у навчальному плані на вивчення фізики, зокрема, на лабораторні заняття, студент, природно, не може виконати всі наведені лабораторні роботи. Тому викладач вибирає лабораторні роботи, найближчі до майбутньої спеціальності студента.

Методично правильно було б проведення лабораторних занять фронтальним методом, проте жоден вуз не може забезпечити проведення занять фронтальним методом. Тому неминуче «забігання» лабораторних занять у порівнянні з теоретичним курсом.

У зв'язку з цим у посібнику перед кожною роботою вміщено теоретичний матеріал, що містить опис фізичного явища та виведення основних співвідношень, необхідних для проведення експерименту.

У зв'язку з обмеженими можливостями математичних викладок у теоретичному вступі до кожної лабораторної роботи деякі виведення опущені, і студенту пропонується готова формула того чи іншого закону або явища. При цьому студенту пропонується самостійно ознайомитися з явищем, що розглядається, за відомими підручниками, список яких наводиться в кожній роботі.

У посібнику в стислій формі надані основні поняття фізичних величин і одиниці їх вимірювання з розділу «Електродинаміка», розглянуто принципи дії деяких вимірювальних приладів, що застосовуються у лабораторному практикумі, схеми їх підключення в електричних колах та способи розширення діапазону вимірювань струму і напруги, а також пристрої для зміни струму і напруги в електричних колах споживача.

Наприкінці посібника наведені схеми розрахунку похибок вимірювань.

Основні поняття електродинаміки.

Електричний заряд – фізична величина, яка є джерелом електричного поля, а також характеристикою інтенсивності електромагнітної взаємодії. Елек-

тричний заряд існує у двох видах: позитивний і негативний. Умовно негативний заряд приписується електрону, а позитивний – протону.

Одиницею заряду в СІ є кулон (Кл).

Носій заряду – частинка, яка містить один або декілька елементарних електричних зарядів.

Питомим зарядом частинки носія заряду (електрона, протона, іона та інш.) називається величина, яка дорівнює відношенню заряду частинки q до її маси m :

$$q_{\text{ном}} = \frac{q}{m}$$

Електричне поле – один із видів матерії за допомогою якого відбувається взаємодія між зарядами (зарядженими тілами).

Напруженість електричного поля – векторна характеристика інтенсивності силової дії на заряджені тіла (заряди), які розміщені у цьому полі.

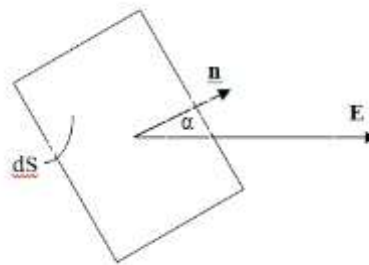
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Одиниця напруженості електричного поля – ньютон на кулон дорівнює напруженості електричного поля в точці поля, в якій на точковий заряд $q=1$ Кл поле діє з силою $F=1$ Н.

На практиці напруженість електричного поля виражається у вольтх на метр ($1 \frac{B}{m}$).

Потік вектору \vec{E} – число силових ліній, які пронизують елементарну площину dS , нормаль \vec{n} якої складає кут α з вектором \vec{E} :

$$d\Phi = E \cdot dS \cdot \cos(\vec{n}, \vec{E}) = \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad d\vec{S} = dS \cdot \vec{n}$$



Якщо є деяка довільна поверхня S , то потік вектору \vec{E} крізь неї $\Phi = \int_S \vec{E} d\vec{S}$

Одиниця потоку напруженості поля $[\Phi]=1$ В·м.

Вольт-метр дорівнює потоку напруженості крізь поверхню площиною 1 м², яка перпендикулярна силовим лініям поля напруженістю $1 \frac{B}{m}$.

Потенціал електричного поля φ – величина, яка числово дорівнює потенціальній енергії одиничного заряду в даній точці поля. Одиницею потенціалу є вольт (В).

$$\varphi = \frac{W}{q}$$

Електрична ємність C відокремленого провідника – величина, яка дорівнює відношенню заряду Δq , який надано провіднику, до приросту потенціалу $\Delta\varphi$ цього провідника

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta \varphi}$$

Конденсатор – система провідників, ємність яких значно більша, ніж ємність відокремленого провідника. Ємність конденсатора дорівнює відношенню заряду конденсатора до різниці потенціалів (цю різницю називають напругою): $C = \frac{q}{U}$. Одиниця електричної ємності $[C]=1 \frac{Кл}{В}$, одержала назву фарад (Ф).

Постійний електричний струм – електричний струм, який не змінюється з плином часу ні за силою, ні за напрямком. Постійний струм виникає під дією постійної напруги і може існувати лише у замкненому колі.

Сила електричного струму I за своїм фізичним змістом – скалярна характеристика струму, яка дорівнює відношенню заряду dq , що проходить через переріз провідника за інтервал часу dt до цього інтервалу $I = \frac{dq}{dt}$. Одиниця виміру сили струму $[I]=1 \text{ А}$.

Ампер дорівнює силі незмінного струму, який при проходженні по двом прямолінійним провідникам нескінченної довжини та незначно малої площини колового поперечного перерізу, розташованим у вакуумі на відстані 1 м один від одного, викликав би на кожній ділянці провідника довжиною 1 м силу взаємодії, яка дорівнює $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$.

Густина електричного струму \vec{j} – векторна величина. Модуль цього вектору чисельно дорівнює відношенню сили струму dI через елементарну площину, яка розташована в даній точці перпендикулярно напрямку руху носіїв, до її площі dS_{\perp} : $j = \frac{dI}{dS_{\perp}}$. Одиниця густини струму $[j]=1 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$

Електричний опір R – величина, яка характеризує однорідну ділянку електричного кола і дорівнює відношенню напруги U на кінцях ділянки до сили струму I в ній $R = \frac{U}{I}$. Одиниця опору $[R]=1 \frac{\text{В}}{\text{А}}$. Ця одиниця називається ом (Ом).

Ом дорівнює опору провідника, між кінцями якого виникає напруга 1 В при силі постійного струму 1 А.

Величина опору провідника залежить від його форми і розміру, а також від властивостей матеріала, з якого він зроблений. Для однорідного довгого циліндричного провідника

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

де l – довжина провідника, S – площа його поперечного перерізу, ρ – питомий електричний опір речовини, з якої зроблений провідник.

Електрична провідність (провідність) ділянки кола λ – величина обернена активному опору цього кола: $\lambda = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}$. Одиниця провідності $[\lambda]=\frac{1\text{А}}{1\text{В}}=1 \text{ Ом}^{-1}$. Ця одиниця називається сіменс (См).

Питомий електричний опір ρ – величина, яка дорівнює відношенню модуля напруженості електричного поля до модуля густини струму: $\rho = \frac{E}{j}$.

$$\text{Одиниця питомого опору } [\rho] = \frac{1 \frac{B}{m}}{1 \frac{A}{m^2}} = 1 \frac{B \cdot m}{A} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Питома електрична провідність σ – величина, яка характеризує електропровідність речовини і дорівнює відношенню модуля густини струму до модуля напруженості електричного поля $\sigma = \frac{j}{E}$

$$\text{Одиниця питомої електричної провідності } [\sigma] = \frac{1 \frac{A}{m^2}}{1 \frac{B}{m}} = 1 \frac{Cm}{m}$$

Магнітне поле – силове поле, яке діє на рухливі заряди (струми) і на тіла, що володіють магнітним моментом.

Стаціонарне магнітне поле – магнітне поле незмінних у часі електричних струмів за умови нерухомості провідників зі струмом.

Електромагнітна індукція – явище збудження електрорушійної сили у контурі при змінюванні магнітного потоку, зчепленого з ним.

Самоіндукція – електромагнітна індукція, викликана зміною зчепленого з контуром магнітного потоку, зумовленого електричним струмом цього контуру.

Взаємна індукція – електромагнітна індукція, викликана зміною зчепленого з контуром магнітного потоку, обумовленого електричними струмами в інших контурах.

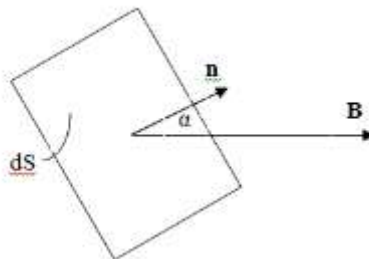
Сила Лоренца – векторна величина, яка являє собою силу діючу на заряджену частинку, яка рухається в електромагнітному полі.

Сила Лоренца має дві складові: електричну, яка не залежить від швидкості частинки і обумовлену електричним полем, і магнітну, яка пропорційна швидкості частинки, і діє з боку магнітного поля. $\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \vec{B}]$

Магнітна індукція – векторна величина, що характеризує магнітне поле і визначає силу, що діє на рухоми заряджену частинку з боку магнітного поля.

Одиниця магнітної індукції $[B] = 1 \text{ Тл (тесла)}$.

Потоком вектору магнітної індукції (магнітним потоком) через площадку dS називається скалярна фізична величина, яка дорівнює $d\Phi = \vec{B}d\vec{S} = BdS \cos \alpha$



Потік через довільну поверхню дорівнює $\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$.

Одиниця магнітного потоку $[\Phi] = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2 = 1 \text{ Вб}$. Ця одиниця одержала назву вебер.

Якщо у магнітному полі знаходиться контур, який складається з декількох витків, то алгебраїчна сума потоків крізь усі витки називається потокозчепленням (повним магнітним потоком).

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \Phi_i,$$

де Φ_i – магнітний потік через i -й виток. Для соленоїда, який складається з N послідовно з'єднаних витків $\Psi = \Phi N$,

де Φ – магнітний потік через один виток.

Магнітний момент \vec{p}_m плоского контуру зі струмом – векторна величина, яка чисельно дорівнює добутку сили струму I на площу, обмежену контуром струму і напрямлена вздовж позитивної нормалі \vec{n} до контуру.

Одиниця магнітного моменту $[p_m] = 1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$

Індуктивність L - скалярна величина, яка дорівнює відношенню потокозчеплення самоіндукції Ψ елемента електричного кола до сили струму I в ньому $L = \frac{\Psi}{I}$. Одиниця індуктивності $[L] = \frac{1 \text{ Вб}}{1 \text{ А}} = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{А}}$.

Ця одиниця носить назву генрі (Гн).

Залежить індуктивність від форми і розміру контура, а також від магнітних властивостей середовища, яке оточує контур.

Поняття про принципи роботи приладів електровимірювань.

У практикумі з електромагнетизму необхідно вимірювати електричні величини – струм, напругу, електричний заряд, опір резисторів і так далі. Для визначення чисельних значень цих величин використовують прилади електровимірювань. За допомогою цих приладів можна вимірювати і неелектричні величини – інтенсивність світла, тиск, температуру, швидкість руху, частоту коливань, проміжки часу.

Тому у будь-якому приладі електровимірювання виділяють дві основні частини: 1) вимірювальний електричний ланцюг, який перетворює вимірювану величину в електричний струм або напругу; 2) вимірювальний механізм, що перетворює підведену до нього електричну енергію в механічну (теплову, магнітну.) і викликає переміщення рухливої частини механізму відносно його нерухомої частини.



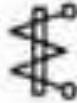



За призначенням основні прилади електровимірювань, які використовуються в нашому лабораторному практикумі, діляться на: а) прилади безпосередньої оцінки вимірюваної величини; б) прилади для спостереження форми кривої досліджуваного струму або напруги, тобто для одержання осцилограм, які зображують залежність $I = f(t)$ або $U = f(t)$; в) вимірювальні генератори – джерела синусоїдальних електричних коливань. Для зміни струму в електричному колі застосовують реостати, а для зміни напруги на елементах кола – подільники напруги. Для підбору різних опорів у широкому діапазоні застосовуються магазини опорів.

Електричні вимірювальні прилади безпосередньої оцінки.

Прилади безпосередньої оцінки – це прилади, за допомогою яких вимірювана величина (струм, напруга, опір) визначаються безпосередньо за показаннями на шкалі приладу.

Вимірювальні прилади безпосередньої оцінки розділяються на ряд систем: магнітоелектричну, електромагнітну, електродинамічну, теплову та інші системи. Символ (таблиця 1), що вказує на систему приладу наносять на шкалу (приклад на рис. 1).

Таблиця 1.

	Магнітоелектрична		Теплова
	Електромагнітна		Термоелектрична
	Електродинамічна		Електростатична

У нашому практикумі найбільш широке застосування мають прилади перших двох систем. Як за позначками, які нанесені на шкалу приладу, дізнатися про його характеристики?

Наприклад, на Рис. 1. показана шкала приладу, розрахованого на виміри постійного струму від 0 до 250 мА

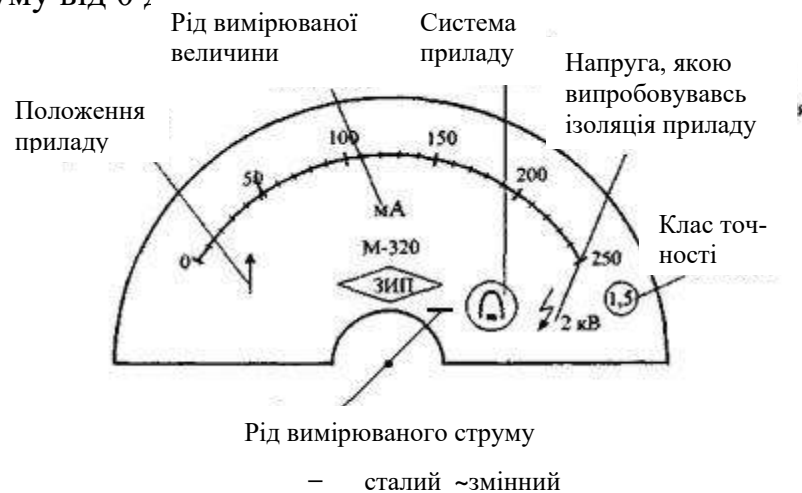


Рис.1.

Цей прилад магнітоелектричної системи призначений для виміру постійних струмів, клас точності 1,5(вказаний в кружечку). Прилади класів 0,1; 0,2; 0,5 застосовують для точних вимірів. У техніці(у лабораторних роботах) використовують менш точні прилади класів 1; 1,5; 2,5; 4.

Знак класу показує абсолютну похибку у відсотках від шкали виміру приладу.

Наприклад, міліамперметр класу 1,5 з шкалою 250 мА дасть у будь-якому місці шкали абсолютну погрешність що не перевищує

$$\Delta I = \pm 250 \cdot 0,015 = \pm 3,75 \text{ мА}$$

1. Прилади магнітоелектричної системи

Принципова схема вимірювального механізму приладу цієї системи показана на рис.2.

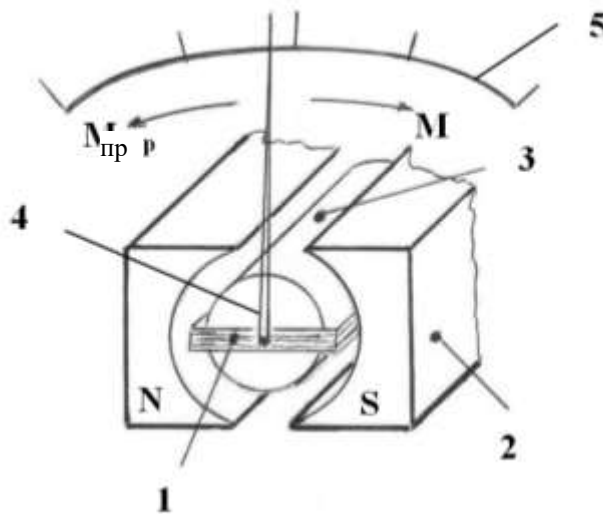


Рис. 2.

Основні частини цього механізму: 1 - рухлива рамка, що складається з алюмінієвого каркаса прямокутної форми з намотаним тонким мідним дротом; 2 - сильний постійний магніт з полюсними наконечниками, зверненими один до одного увігнутими циліндричними поверхнями; 3 - нерухомий феромагнітний циліндр; 4 - стрілка, жорстко пов'язана з рамкою; 5 - шкала приладу.

Завдяки феромагнітному осерддю 3 в кільцевому проміжку між ним і смугами магніту створюється сильне радіальне магнітне поле. Магнітна індукція цього поля не змінюється у напрямі твірних циліндра. Тому бічні сторони рамки знаходяться в постійному магнітному полі незалежно від їх положення. Силкові лінії магнітного поля перпендикулярні до її бічних сторін (рис. 3).



Рис. 3.

При проходженні струму через котушку виникає магнітний момент

$$\vec{p}_m = N \cdot I \cdot S \cdot \vec{n}, \quad (1)$$

де N - число витків в котушці, I - сила струму в ній, S - площа поперечного перерізу котушки \vec{n} - одиничний вектор нормалі до перерізу котушки.

На рамку із струмом, що знаходиться в магнітному полі, діє момент пари сил $\vec{M} = [\vec{p}_m \cdot \vec{B}]$. Цей момент створюють сили Ампера, прикладені до бічних сторін рамки. Модуль моменту пари сил дорівнює

$$M = p_m \cdot B \cdot \sin 90^\circ = I \cdot S \cdot N \cdot B \quad (2)$$

Видно, що чисельне значення обертового моменту не залежить від кута повороту рамки і є пропорційною струму через котушку (вимірюваному струму).

Рамка підвішена в магнітному полі на двох розтяжках(на рис.2 не показана). Розтяжка - металева стрічка, одним кінцем прикріплена до рамки, а іншим - до нерухомої частини вимірювального механізму. Розтяжки підтримують в потрібному положенні рамку в полі і підводять струм до рамки, створюють протидіючий момент, що виникає при їх закручуванні.

При повороті котушки під дією обертального моменту \vec{M} закручується і розтяжка. У ній виникає протидіючий момент пружної сили \vec{M}_{np} . Модуль моменту пружних сил $M_{np} = D \cdot \varphi$, де D - постійна кручення, φ - кут закручування (повороту). У положенні рівноваги $M = M_{np}$.

$$I \cdot S \cdot N \cdot B = D \cdot \varphi; \quad \varphi = \frac{S \cdot N \cdot B}{D} I \quad (3)$$

$$\text{де } \frac{S \cdot N \cdot B}{D} = C - \text{постійна приладу.} \quad (4)$$

Величина $\gamma = \frac{1}{C}$ називається чутливістю приладу. З (3) витікає, що шкала приладу рівномірна. Через те, що рамка виконана з алюмінію, то індукційний струм, що виникає в самому корпусі, створює гальмівний момент. Це призводить до швидкого згасання коливань рамки (її заспокоєнню).

Період коливань рамки залежить від її моменту інерції відносно осі обертання і зазвичай дорівнює секундам. Тому такий вимірювальний механізм не можна безпосередньо застосовувати для виміру змінного струму.

Але якщо використати випрямляч - пристрій для перетворення змінного струму(напруги) в постійний, то прилади магнітоелектричної системи можна використати в широкій області частот.

На рис. 4а і 4б показані найпростіші схеми для виміру змінного струму (рис. 4а) та змінної напруги (рис. 4б). Випрямлячі на напівпровідниках вмонтовані в один корпус з приладом магнітоелектричної системи. На рисунках $R_{ш}$ - опір шунта, $R_{дод}$ - додатковий опір.

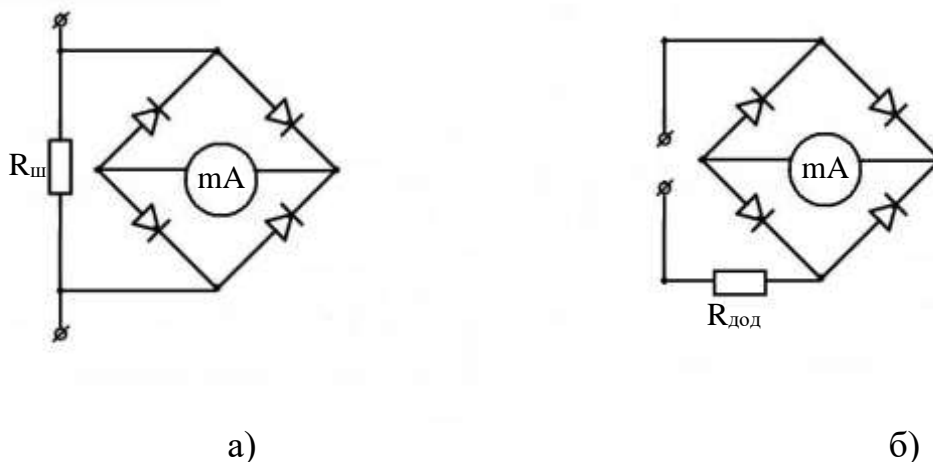


Рис. 4.

Позитивна якість магнітоелектричних приладів: висока їх чутливість і точність вимірів, мале споживання енергії, рівномірність шкали, нечутливість до зовнішніх магнітних полів, аперіодичність коливань рамки із стрілкою(швидке встановлення рівноваги).

Прилади магнітоелектричної системи(гальванометри) можна використати для виміру заряду q , що проходить через поперечний переріз ланцюга при імпульсі струму.

Такий гальванометр є основною частиною веберметра, який використовують для виміру магнітних потоків і індукції магнітного поля. Принципова схема для виміру магнітної індукції за допомогою веберметра показана на рис.5.



Рис.5.

Нехай вимірювальна котушка веберметра, яка має N витків, площину перерізу S , підключена до балістичного гальванометра і знаходиться усередині соленоїда. Осі котушки і соленоїда співпадають. Якщо увімкнути струм, що створює магнітне поле в соленоїді, то повний магнітний потік (потокозчеплення) крізь котушку стане рівним $\Psi = NBS$. У колі гальванометр-вимірювальна котушка виникає ЕРС-індукції

$$\varepsilon = -\frac{d\Psi}{dt} \quad (3)$$

За законом Ома для замкненого кола $I = \frac{\varepsilon_i}{R}$,

де R – опір вимірювального кола.

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{R} \frac{d\Psi}{dt}$$

звідки слідує

$$q = -\frac{1}{R} \int_0^{\Psi} d\Psi$$

після інтегрування виходить

$$q = \frac{\Psi}{R} = \frac{NBS}{R} \quad (4)$$

При виникненні індукційного струму у вимірювальному колі стрілка гальванометра робить відкид на n поділок. Тобто гальванометр фіксує заряд

$$q = Cn \quad (5)$$

де C – постійна балістичного гальванометра, n - число поділок шкали, на яке відкидається стрілка гальванометра. Порівнюючи (4) і (5) одержимо

$$B = \frac{CRn}{NS}$$

якщо застосувати позначення $K = CR$, то

$$B = \frac{Kn}{NS},$$

де K – ціна поділки веберметра.

2. Прилади електромагнітної системи

Прилади електромагнітної системи (рис. 6) застосовують для вимірів в колах постійного і змінного струмів.

Вимірювальний механізм містить нерухому котушку 1, плоский феромагнітний сердечник 2. Під дією магнітного поля, що створюється котушкою, феромагнітний сердечник намагнічується і втягується всередину котушки. При

цьому обертається і пов'язана з сердечником стрілка 4 вимірювального приладу. Протидіючий момент створюється спіральними пружинами 3.

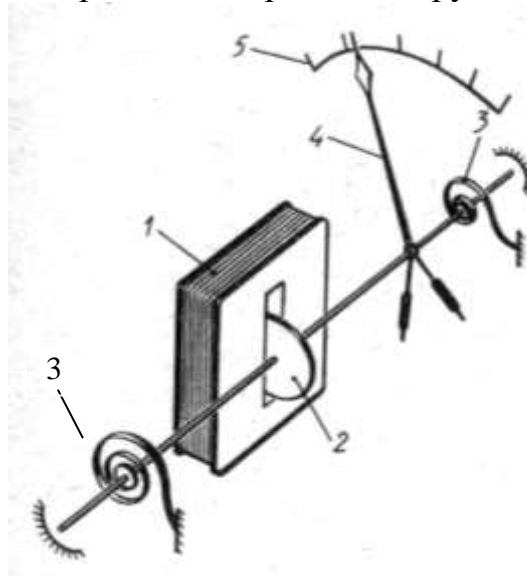


Рис.6.

Підбором форми осердя домагаються того, що шкала приладу виявляється практично рівномірною, починаючи зі значень, що становлять $0,15 \div 0,2$ граничного вимірюваного струму. Приладами електромагнітної системи в колах змінного струму вимірюють діюче (ефективне) значення струму.

$$I_{\text{діюче}} = \frac{I_{\text{ампл}}}{\sqrt{2}}$$

Відмінністю приладів електромагнітної системи є простота конструкції, стійкість до перевантажень.

До недоліків електромагнітних вимірювальних приладів можна віднести нерівномірність шкали, меншу точність, ніж в магнітоелектричних приладах, залежність показань від зовнішніх магнітних полів.

3. Електронні прилади.

Електронний осцилограф – вимірювальний прилад, призначений для візуального дослідження швидкоплинних електричних і неелектричних величин. Останні після перетворення в електричні.

Також осцилограф може бути використаний для вимірювання частоти, фази, напруги, коротких проміжків часу.

Принцип дії осцилографа оснований на використанні властивостей електронно-променевої трубки. На рис. 7. схематично зображено будову трубки разом зі схемою її живлення та керування електронним променем.

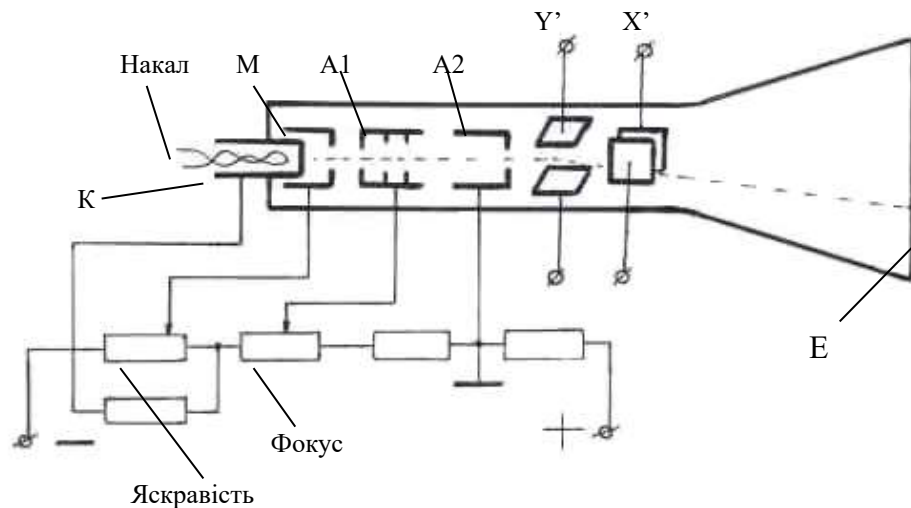


Рис. 7.

Яскравість зображення на екрані (Е) регулюється зміною потенціалу на модулюючому електроді (М). При цьому змінюється кількість електронів, які попадають на екран, тим самим змінюючи яскравість точки на екрані.

Аноди трубки A_1 та A_2 сконструйовані у вигляді циліндрів і мають позитивний потенціал відносно катода (К). Між анодами створюється неоднорідне електричне поле, яке діє на електронний пучок як збираюча лінза, що фокусує електрони у визначеній точці. Другий анод A_2 має нульовий потенціал відносно землі.

Для керування електронним променем (зміщенням світної точки на екрані) застосовують дві пари відхиляючих пластин, які розташовані взаємно перпендикулярно. За допомогою електричного поля, яке створюється між пластинами пучок можна відхилити по вертикалі (вісь «Y») або по горизонталі (вісь «X»). Відповідно буде змінюватися й положення світної точки на екрані. За допомогою спеціальної схеми на «X» пластини можна подавати напругу пилкоподібної форми.

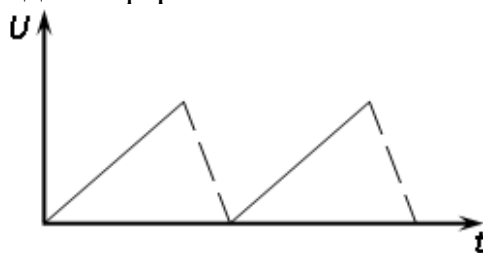


Рис. 8.

Під дією такої напруги світна точка буде зміщуватись уздовж горизонтальної лінії зліва направо з постійною швидкістю. Після пробігання всього екрана вона практично миттєво повертається назад і знову повторює увесь шлях. Такий рух точки (електронного пучка) називається розгорткою.

Якщо на «Y» пластини подати змінну напругу і підібрати частоту розгортки так, щоб ці частоти співпадали, то на екрані одержимо нерухомий графік процесу, який вивчається.

2. У лабораторному практикумі використовують також такі електронні прилади, як **вимірювальні генератори**. Вони являють собою джерело синусоїдальних електричних коливань звукової частоти і використовуються при дослідженні складання гармонійних коливань та для збуджування стоячих хвиль у струнах.

3. Реостати, потенціометри, магазини опорів.

Реостат - змінний опір, який включають в електричне коло послідовно(у розрив кола) для зміни струму в цьому колі. Схема включення реостата показана на рис.9.

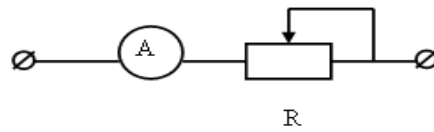


Рис.9.

Якщо користувачу треба тільки деяка частка напруги джерела ЕРС, то використовують потенціометри – реостати, які підключаються так, як показано на рис. 10а.

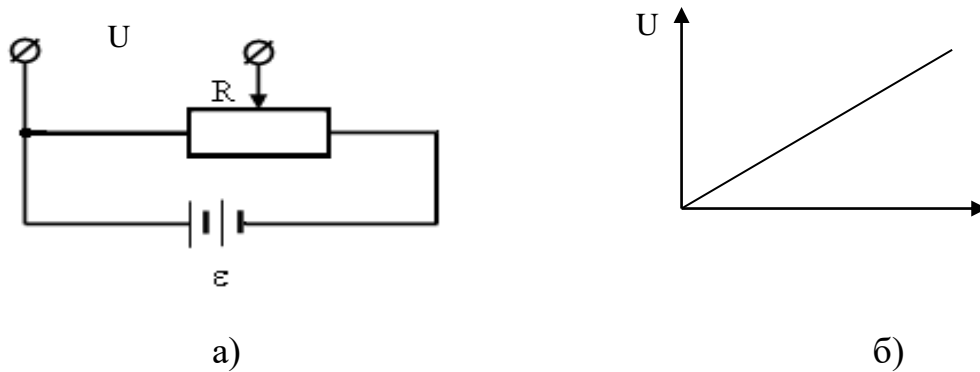


Рис. 10.

Залежність напруги від положення повзунка при цьому буде такою, як показана на рис. 10б.

Якщо реостат включити так, як показано на рис. 11а, то споживач отримує напругу від $-U$ до $+U$ (рис. 11б).

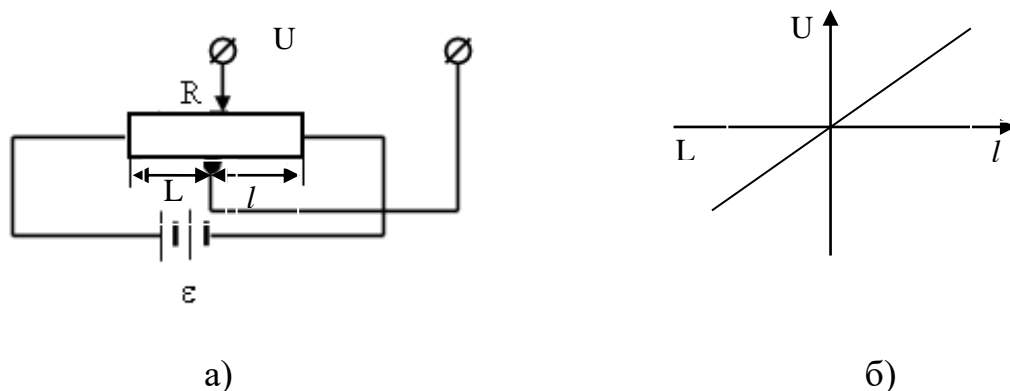


Рис. 11.

Для підбору опорів в широкому діапазоні застосовують магазини опорів. Набір опорів в магазині - це котушки, на які намотують ізольований манганіновий дріт. При намотуванні високоомних опорів використовують біфілярне намотування. В цьому випадку індуктивність котушки буде мінімальною $L \sim 0$.

Вимір великих постійних струмів безпосередньо приладами утруднено, а часто і неможливо. Для розширення меж виміру, наприклад міліамперметра, служать шунти. **Шунт** - опір, який включається паралельно тій ділянці ланцюга, на якій треба змінити(зменшити) струм (рис. 12).

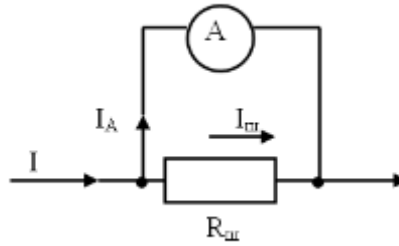


Рис. 12.

Через шунт проходить така частина струму $I_{ш}$, що струм через амперметр I_A не перевищує допустимої величини.

$$I = I_A + I_{ш} \quad I_A \cdot R_A = I_{ш} R$$

$$R_{ш} = \frac{I_A \cdot R_A}{I_{ш}} = \frac{I_A \cdot R_A}{I - I_A} = \frac{R_A}{n - 1};$$

де $n = \frac{I}{I_A}$; $R_{ш} = \frac{R_A}{n - 1}$, де R_A – внутрішній опір приладу.

У багатошкальних міліамперметрах (амперметрах) є набір шунтів, перемикаючи які можна змінювати межі виміру струму. На рис.13.

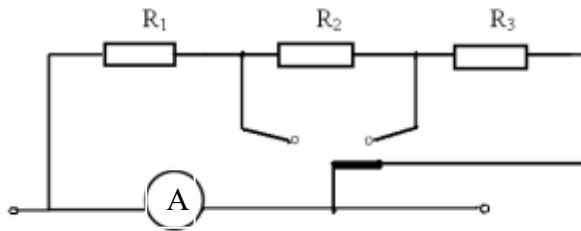


Рис.13.

Міліамперметр(амперметр) можна використати як вольтметр, якщо послідовно до нього приєднати великий додатковий опір $R_{дод}$.

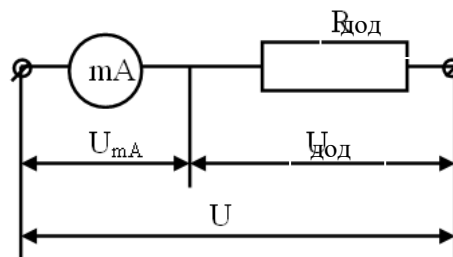


Рис.14.

$$U = U_{mA} + U_{дод}; \quad I = \frac{U_{дод}}{R_{дод}} = \frac{U_{mA}}{R_{mA}};$$

$$R_{дод} = \frac{U_{дод} \cdot R_{mA}}{U_{mA}} = \frac{U - U_{mA}}{U_{mA}} R_{mA} = \left(\frac{U}{U_{mA}} - 1 \right) R_{mA};$$

$$\frac{U}{U_{mA}} = n; \quad R_{дод} = (n - 1) R_{mA},$$

де R_{mA} - внутрішній опір міліамперметра.

У всіх лабораторних роботах, що виконуються на кафедрі з розділу курсу фізики електромагнетизм, всі вони пов'язані з експериментальною перевіркою основних законів, що розглядаються на лекційних заняттях.

Лабораторна робота № 30

Вимірювання опорів методом містка

Мета роботи: ознайомитися з мостовим методом вимірювання опорів, знайти невідомі опори декількох резисторів, експериментально перевірити справедливність формул для послідовного і паралельного з'єднання опорів.

Прилади й принадлежности: джерело постійного струму, магазин відомих опорів, набір невідомих опорів, реохорд, гальванометр, кнопковий ключ.

Теоретичний вступ

Існують різні методи вимірювання опорів провідників. Опір можна виміряти за допомогою амперметра і вольтметра. Якщо I - сила струму в амперах, який показується амперметром, а U - напруга в вольтах на кінцях провідника, то опір провідника в омах дорівнює $R = U/I$. Ще більш простий метод - пряме вимірювання відповідним приладом - омметром. Але для точного вимірювання опорів вживають метод порівняння опору, що вимірюється, з еталонними (мостовий метод).

Мостова схема (місток Уїтстона, англ. фізика) складається з чотирьох опорів R_1 , R_2 , R_x , R , з'єднаних у вигляді чотирикутника, як вказано на рис.1. Електричний струм джерела розгалужується між паралельними гілками ACB та ADB , між якими включається гілка CD , яка містить гальванометр G . Ця гілка називається **містком**.

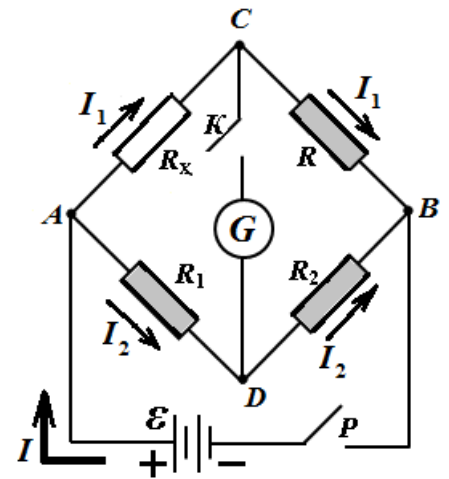


Рис.1.



Фото 1

Гальванометром називається високочутливий електровимірювальний прилад для вимірювання малих струмів, напруг і зарядів. Нуль розміщений на середині шкали гальванометра (фото 1), що дозволяє фіксувати струми протилежних напрямків.



Фото 2.

Опір R_x , що вимірюється, утворює ділянку AC , а в ділянку CB включають магазин опорів.

Магазин опорів (фото 2) являє собою набір відомих опорів, змонтованих в одному корпусі. В магазині опорів закладений принцип послідовного з'єднання резисторів. Повертаючи ручку того чи іншого декадного перемикача, ми додаємо (або зменшуємо) опір на величину, відмічену цифрами на ручці перемикача.

Наприклад, $3 \times 100 + 5 \times 10 + 2 \times 1 = 352$

(Ом).

Суть методу містка полягає в тому, що, знаючи три опори R_1 , R_2 , R , (на рис. 1 позначені сірим кольором), можна визначити четвертий R_x (на рисунку білого кольору).

Розглянемо принцип роботи цієї схеми. Замкнемо ключ P (див. рис.1). Тоді від джерела проходить струм I , який в точці A буде розгалужуватися на дві частини - струми I_1 і I_2 .

Під час замикання кнопки K в гілці CD також піде струм, напрям якого залежить від того, яка з точок (C або D) має більш високий потенціал.

Особливий інтерес представляє випадок, коли струм в діагоналі CD дорівнює нулю. У цій ситуації говорять, що міст «збалансований». З'ясуємо, при яких співвідношеннях між опорами резисторів можливий баланс моста. Оскільки на ділянці CD струму немає, через ділянки AC і CB проходить однаковий струм. Позначимо його I_1 . Струм через ділянку ADB позначимо I_2 .

Відсутність струму на ділянці CD означає, що потенціали точок C і D є рівними, $\varphi_C = \varphi_D$. Звідси випливає, що від точки A (потенціал якої φ_A) до точок C і D потенціал падає на однакову величину, тобто

$$\varphi_A - \varphi_C = \varphi_A - \varphi_D,$$

або

$$U_{AC} = U_{AD}.$$

Використовуючи закон Ома, можна переписати цю рівність

$$I_1 R_x = I_2 R_1. \quad (1)$$

Оскільки ділянки CB і DB сходяться в одній точці B (с потенціалом φ_B), то падіння потенціалу на цих ділянках буде однаковим

$$\varphi_C - \varphi_B = \varphi_D - \varphi_B,$$

тобто

$$U_{CB} = U_{DB},$$

або за законом Ома

$$I_1 R = I_2 R_2. \quad (2)$$

Поділивши почленно рівності (1) і (2), отримаємо умову балансу моста:

$$\frac{R_x}{R} = \frac{R_1}{R_2},$$

звідки
$$R_x = R \frac{R_1}{R_2}. \quad (3)$$

Отже, знаючи R , R_1 і R_2 , можна визначити невідомий опір R .

Для зручності вимірювань ділянку ADB (R_1 і R_2) замінюють **реохордом**, який являє собою калібрований за діаметром ніхромовий дріт, натягнутий вздовж лінійки із шкалою AB (рис 2). Вздовж реохорда переміщується рухомий контакт D , який ділить дріт на два опори R_1 і R_2 (фото 3).

Оскільки опір однорідного дроту пропорційний його довжині $R = \rho \frac{l}{S}$, опори R_1 і R_2 пропорційні довжинам відповідних ділянок AD (l_1) і DB (l_2).

Тоді відношення опорів можна замінити відношенням довжин цих ділянок (питомий опір ρ та переріз дроту S ділянок l_1 та l_2 однакові), отримаємо розрахункову формулу:

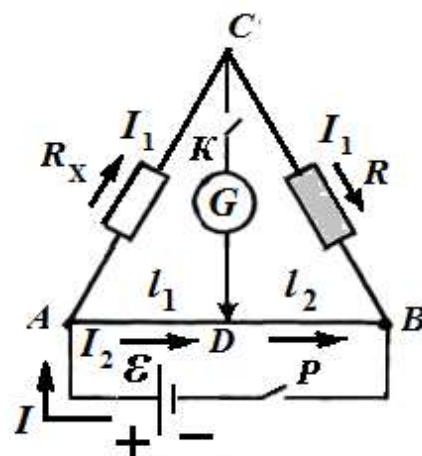


Рис.2.



Фото 3.

$$R_x = \frac{l_1}{l_2} R \quad (4)$$

Таким чином, вимірювання опорів за допомогою мостової схеми зводиться до вимірювання довжин. Знаючи R , l_1 та l_2 , можна визначити R_x .

Порядок виконання роботи.



Фото 4.

1. Збирають електричне коло за схемою рис. 2. Обирають один з резисторів (фото 4), опір якого R_x буде визначено, і під'єднують його у відповідне плече містка. Після перевірки кола викладачем замикають коло ключем P .

2. Окремо доводиться у теорії похибок вимірювання (див. Додаток 2 в кінці даної інструкції), що вимір опору за допомогою моста буде тим точніше, чим ближче до середини реохорда встановлюється рухомий контакт D при балансі моста.

Тому у першій частині роботи повзунок реохорду заздалегідь встановлюють посередині реохорду.

Далі поворотом відповідних ручок (показує викладач) підбирають в еталонному магазині опорів **такий опір R** , при якому після замикання на короткий час кнопки

K стрілка гальванометра НЕ БУДЕ відхилятися.

Зауваження! Кнопку K ключа в колі гальванометра натискають короткочасно, щоб уникнути нагріву провідників.

Це означає, що на ділянці CD струм дорівнює нулю.

Як правило, за допомогою магазину опорів цілком врівноважити міст не вдається. Тоді, вичерпав можливості магазину опорів, зникнення струму в гальванометрі добиваються шляхом незначного пересування повзуна D . У таблицю записують величину опору R і довжини плечей l_1 і l_2 реохорда.

3. При будь-якому вимірюванні, як би старанно його не проводили, неминучі похибки. Тому необхідно повторити вимірювання невідомого опору при новій величині опору магазина. Для цього переміщують повзун реохорда вправо або вліво від середнього положення на 1-2 см, Далі підбирають опір на магазині опорів такий, щоб стрілка гальванометра встановлювалась на нуль. Вичерпав можливості магазина опорів зникнення струму в гальванометрі добиваються шляхом незначного пересування повзуна D .

Записують в таблицю нове значення опору магазину R та плечей l_1 і l_2 реохорда.

4. Вимірявши опір одного резистора R_{x1} три рази, переходять до вимірювань опору R_{x2} іншого резистора.

5. Після цього визначають опори послідовно і паралельно з'єднаних резисторів.

6. За формулою (4) визначають усі значення R_x та заносять їх у таблицю.

За середніми значеннями $\langle R_{x1} \rangle$ і $\langle R_{x2} \rangle$ розраховують $R_{\text{послід}}$ і $R_{\text{парал}}$ за формулами:

$$R_{\text{посл}}^{\text{теор}} = \langle R_1 \rangle + \langle R_2 \rangle; R_{\text{парал}}^{\text{теор}} = \frac{\langle R_1 \rangle \langle R_2 \rangle}{\langle R_1 \rangle + \langle R_2 \rangle} \quad (5)$$

і порівнюють їх з вимірними.

Таблиця

№ дослід- тів	Опір	Результати вимі- рів			R_{x_i} Ом	$\langle R_x \rangle$ Ом	ΔR_{x_i} Ом	$\Delta R_{x_i}^2$,	$S\langle R_x \rangle$ Ом	α	$t_{\alpha, n}$	ΔR_x Ом	$E, \%$
		l_1 мм	l_2 мм	R Ом									
1 2 3	R_{x1}												
1 2 3	R_{x2}												
1 2 3	Послі- довне з'єд- нання												
1 2 3	Пара- лельне з'єд- нання												

Остаточний результат записують у вигляді:

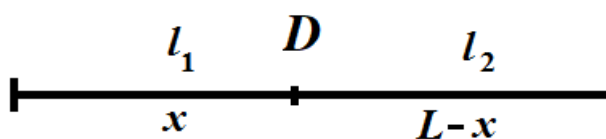
$$R_{x1} = \left(\langle R_{x1} \rangle \pm \Delta R_{x1} \right) \text{ Ом при } \alpha = \quad ;$$

$$R_{x2} = \left(\langle R_{x2} \rangle \pm \Delta R_{x2} \right) \text{ Ом при } \alpha = \quad ;$$

Контрольні питання

1. Яка фізична величина називається електричним потенціалом? Напругою?
2. Сформулюйте закон Ома для однорідної ділянки кола.
3. Яка фізична величина називається ЕРС?
4. Поясніть принцип роботи містка Уїтстона.
5. При якому положенні повзунка реохорда точність виміру мостовою схемою є максимальною?
6. Чи зміниться робота мосту, якщо поміняти місцями джерело струму і гальванометр?
7. Чому гальванометр, який застосовується в роботі, має двосторонню шкалу з нулем посередині?
8. Які переваги має метод визначення опору містком Уїтстона у порівнянні з методом амперметра і вольтметра?

Додаток



Як було показано, визначається за

Рис. 3.

невідомий опір формулою

$$R_x = R \frac{l_1}{l_2}.$$

Вимірювання можна проводити при будь-якому співвідношенні плечей l_1 і l_2 реохорда (рис. 3). Однак, точність вимірювань буде залежати від положення контакту D . Покажемо це.

Позначимо загальну довжину реохорда через L , довжину відрізка $l_1 = x$, $l_2 = L - x$. (рис. 3). Тоді робоча формула (4) переписеться так: $R_x = \frac{Rx}{L - x}$.

Визначимо абсолютну похибку ΔR_x за формулами для непрямих вимірювань. Абсолютна похибка знаходиться за правилами диференціювання.

При цьому позначка диференціала d замінюється позначкою похибки Δ . Абсолютна похибка дробу дорівнює сумі добутку знаменника на абсолютну похибку чисельника і чисельника на абсолютну похибку знаменника, поділений на квадрат знаменника.

$$\Delta R_x = R \frac{(L-x)\Delta x + x\Delta x}{(L-x)^2} = R \frac{L\Delta x}{(L-x)^2}$$

Тут знак "мінус" в абсолютній похибці аргументу Δx замінюється знаком "плюс", так щоб величина похибки була максимальною. Відносна похибка E величини R_x буде дорівнювати

$$E = \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{L\Delta x}{x(L-x)}$$

Величина E буде найменшою при максимумі знаменника. Максимум можна знайти, взявши похідну від знаменника по x і прирівнявши її нулю:

$$\frac{d}{dx}(x(L-x)) = 0$$

або

$$L - 2x = 0,$$

звідки

$$x = \frac{L}{2}$$

Це означає, що вимірювання опору за допомогою моста Вітстона буде тим точніше, чим ближче до середини реохорда встановлюється рухомий контакт D при балансі мосту.

Рекомендована література

1. Кучерук І. М., Горбачук І. Т, Луцик П. П. Загальний курс фізики у трьох томах : навч. посіб. Київ: Техніка, 2006. Т. 2 : Електрика і магнетизм. 450 с.
2. Курс фізики (під редакцією Лопатинського І.Є.. – Львів. – "Бескід Біт". – 2002.
3. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф.. Курс фізики. У 2 кн.: Кн.1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.:«Либідь», 2001. – 448с.
4. Загальна фізика. Лабораторний практикум.: Навч. посібник./ В.М.Барановський, П.В.Бережний, І.Т.Горбачук. та ін.. За заг. ред.. І.Т.Горбачука. – К. Вища шк., 1992 – 509 с.
5. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 3. Електрика і магнетизм. [Електронне видання]: - Д. Національний гірничий університет, 2018. - 165 с.

Лабораторна робота № 31

Вимірювання ЕРС методом компенсації

Мета роботи: ознайомлення з методом компенсації та вимірювання ЕРС методом компенсації.

Прилади й принадлежности: Джерело постійного струму В5-46 з ЕРС ε_0 , ртутно-кадмієвий нормальний елемент Вестона ε_n з ЕРС = 1,0183 В, досліджуваний гальванічний елемент (лужний акумулятор) з ЕРС ε_x , високочутливий гальванометр G з нулем на середині шкали, реохорд з повзунком C , довжина струни реохорда 100 см, перемикач P .

Теоретичний вступ

Що таке ЕРС? Нехай у провіднику AB (рис. 1) створено електричне поле E , спрямоване у бік падіння потенціалу від φ_A до φ_B . Для зручності міркувань припустимо, що носіями струму є позитивні заряди. Насправді у металевих провідниках струм провідності створюється рухом негативних зарядів - електронів. (Така заміна не змінює суті міркувань).

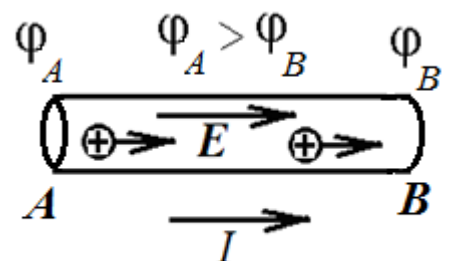


Рис. 1.

Протягом дуже короткого часу відбуватиметься переміщення зарядів у бік поля E від A до B доти, доки у провіднику не встановиться однаковий потенціал; при цьому напруженість електричного поля всередині провідника дорівнюватиме нулю, і струм I припиниться.

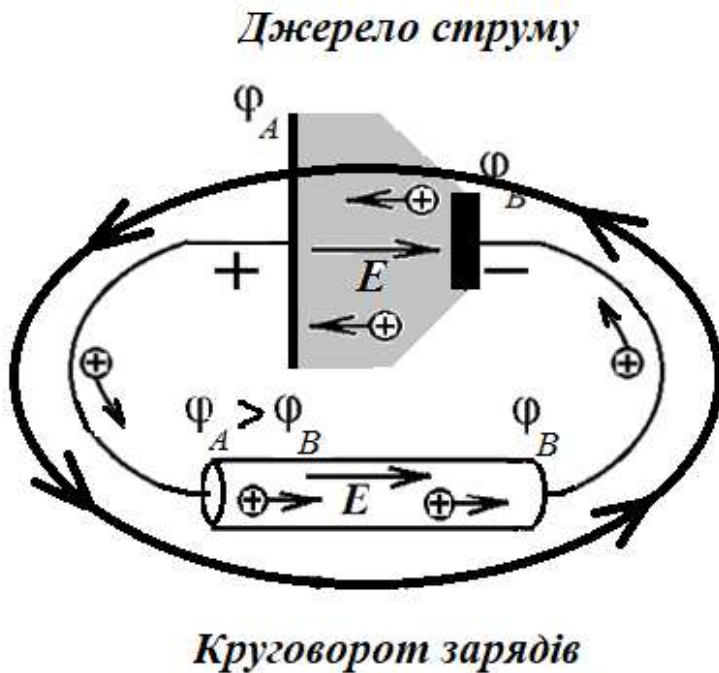


Рис. 2.

Джерело струму має два полюси (рис. 2): позитивний, з більш високим потенціалом (на схемі позначається тонкою довгою рисою), і негативний, з нижчим потенціалом (на схемі позначається короткою жирною рисою).

Заряди у зовнішній частині рухаються у бік зменшення потенціалу φ , тобто. від плюсу до мінусу, а всередині джерела – від мінусу до плюсу.

Але, як відомо, однойменні заряди відштовхуються (на рис. 2 «плюс» заряду та «плюс» полюса джерела), різнойменні – притягуються (на рис. 2 «плюс» заряду та «мінус» полюса джерела). Тому для переміщення зарядів усередині між полюсами повинні існувати сили *не кулонівського* походження, які називаються **сторонніми силами**.

Походження сторонніх сил може бути різним. У батареях та акумуляторах вони обумовлені хімічними процесами. У сонячних батареях – енергією фотонів. В електричних генераторах це сили, що діють на заряди, які рухаються в магнітному полі.

Переміщуючи електричні заряди, сторонні сили виконують роботу проти кулонівських сил за рахунок енергії, що витрачається в джерелі струму.

Величина, що дорівнює роботі сторонніх сил по переміщенню одиничного позитивного заряду, називається **електрорушійною силою (ЕРС) ε** , що діє в замкнутому колі або на його ділянці. Отже, якщо робота сторонніх сил над зарядом q дорівнює $A_{ст}$, то

$$\varepsilon = \frac{A_{ст}}{q} . \quad (1)$$

Таким чином, провідник, у якому діють лише електростатичні сили, згодом переходить у рівноважний стан.

Для того щоб підтримувати струм тривалий час, потрібно здійснити **круговорот зарядів** (див. рис. 2), за якого вони рухалися б по замкнутому шляху.

Пристрій, що створює та підтримує різницю потенціалів $\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_B$ на кінцях провідника називається **джерелом струму**.

Струм проходить у зовнішній частині кола по провіднику, й у внутрішній – по джерелу струму.

Оскільки робота вимірюється в Дж = Кл В, то ЕРС вимірюється в тих же одиницях, що і потенціал, тобто у вольтах (В).

Чи можна виміряти ЕРС вольтметром?

Відповідно до закону Ома для замкненого кола постійного струму (рис.3)

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (2)$$

де I - сила струму в колі, ε - ЕРС джерела струму, r - внутрішній опір джерела струму, R - зовнішній опір.

Добуток $IR = U$ називається падінням напруги на зовнішньому колі чи напругою на затискачах джерела. Як впливає з формули (2) напруга на затискачах працюючого джерела

$$U = \varepsilon - Ir \quad (3)$$

є величиною змінною, що залежить від сили струму, тобто навантаження джерела. Напруга на затискачах U менша за ЕРС ε на величину Ir , яка є падінням напруги на внутрішньому опорі джерела.

З формули (3) видно, що використовувати вольтметр для вимірювання ЕРС джерела, підключивши його безпосередньо до клем джерела, не можна, так як сам вольтметр при цьому утворює зовнішню ділянку кола з опором R і його показання будуть відрізнятися від ЕРС на величину Ir .

Очевидно, чим вищий опір вольтметра в порівнянні з опором джерела, тим менша відмінність між показаннями вольтметра $U = IR$ та ЕРС ε джерела, і цю відмінність принципово не можна звести до нуля

Висновок. Вимірювання ЕРС ε не можна здійснити звичайним вольтметром.

Зауваження. Оскільки внутрішній опір джерела r має порядок десятих часток ома, а опір вольтметра R - сотні кОм, а то і десятки МОм, то на практиці для оцінки ЕРС джерел з невеликим внутрішнім опором можна користуватися вольтметром, підключивши його до затискачів джерела струму без навантаження

Суть методу компенсації

З рівняння (3) видно, що для визначення ЕРС необхідно, щоб у момент вимірювання сила струму через джерело з вимірюваною ЕРС дорівнювала нулю. Це є основою всіх методів визначення ЕРС.

Сутність методу компенсації полягає в тому, що вимірювана ЕРС (рис. 4) компенсується (урівноважується) відомою компенсуючою напругою U_K .

Джерела вимірюваної ЕРС ε_X та компенсуючої напруги U_K з'єднуються однойменними полюсами (рис 4). При цьому два полюси з'єднують безпосередньо, а два інші – через індикатор рівності (гальванометр).

Гальванометром називається високочутливий електровимірювальний прилад для вимірювання малих струмів, напруг і зарядів. Нуль розміще-

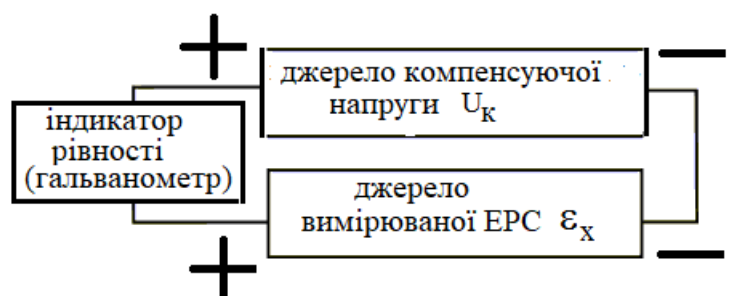


Рис. 4.

ний на середині шкали гальванометра, що дозволяє фіксувати струми протилежних напрямків.

Сила та напрямок струму, що проходить через гальванометр, визначатиметься різницею ε_x та U_K (див. рис. 4). При рівності цих величин **сила струму в колі дорівнює нулю**, і «індикатор рівності» дає нульове показання. Таким чином, плавно регулюючи U_K , можна досягти нульового показання гальванометра. Тоді невідома вимірювана ЕРС ε_x дорівнює відомій напрузі U_K , що компенсує.

Електрична схема установки для вимірювання ЕРС методом компенсації

Компенсуюче джерело струму з ЕРС ε_0 , яка більша, ніж ЕРС ε_x досліджуваного елемента, $\varepsilon_0 > \varepsilon_x$, замикають на реохорд (рис. 5). **Реохордом** називається однорідний ніхромовий провід (AB на рис. 5) у вигляді струни, укріплений на панелі з вимірювальною лінійкою та рухомих контактом C .

До кінця A реохорда, до якого підключений позитивний полюс джерела ε_0 , приєднують позитивний полюс досліджуваного елемента ε_x . Негативний полюс елемента ε_x через **гальванометр** G з нулем на середині шкали підключають до рухомого контакту реохорду C . Таким чином, компенсуюче джерело ε_0 включене назустріч досліджуваному джерелу ε_x .

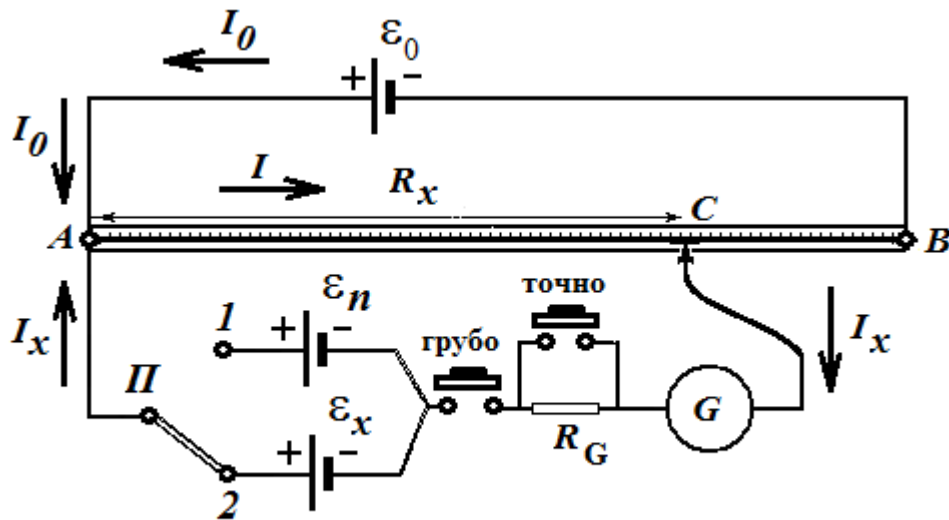


Рис. 5.

При переміщенні рухомого контакту змінюється різниця потенціалів $\varphi_A - \varphi_C$ на ділянці AC реохорда і струм, що проходить через підключене паралельно до цієї ділянки джерело ε_x .

Якщо різниця потенціалів $\varphi_A - \varphi_C$ не буде дорівнювати ЕРС досліджуваного елемента, то по гілці з гальванометром потече струм, унаслідок чого стрілка гальванометра відхилиться.

Якщо різниця потенціалів у точках A і C буде меншою за ЕРС елемента ε_x , струм буде проходити в одному напрямку (стрілка гальванометра відхилиться в один бік); якщо більше, то – у протилежну (стрілка відхилиться в інший бік).

Якщо різниця потенціалів у точках A і C дорівнюватиме ЕРС елемента ε_x , струму не буде (стрілка гальванометра не відхилиться).

Оскільки $\varepsilon_0 > \varepsilon_x$, то на реохорді AB завжди буде така точка, різниця потенціалів між якою і точкою A дорівнюватиме електрорушійній силі досліджуваного елемента. Переміщуючи контакт C вздовж реохорда, шукають таке його положення, при якому в контурі з елементом ε_x струму не буде.

Тим самим досягається **компенсація** падіння напруги на ділянці AC реохорда і підключеної до цієї ділянки електрорушійної сили ε_x , і **джерело ε_x виявляється знеструмленим**, а його ЕРС дорівнюватиме різниці потенціалів $\varphi_A - \varphi_C$.

Якщо позначити ЕРС компенсуючого джерела через ε_0 , а через R – опір всього реохорду, то сила струму через реохорд буде

$$I = \frac{\varepsilon_0}{R}, \quad (4)$$

Якщо R_x - опір ділянки AC , то різниця потенціалів

$$\varphi_A - \varphi_C = IR_x = \frac{\varepsilon_0}{R} R_x. \quad (5)$$

Отже, ЕРС ε_x випробуваного елемента буде

$$\varepsilon_x = \frac{\varepsilon_0}{R} R_x. \quad (6)$$

Потім замінюють випробуваний елемент так званим *нормальним*, ЕРС ε_n якого відома дуже точно, і знову шукають таке положення рухомого контакту C , за якому в гілці з елементом струму не буде. Як і в попередньому випадку,

$$\varepsilon_n = \frac{\varepsilon_0}{R} R_n. \quad (7)$$

Розділивши вираз (6) на вираз (7), отримаємо

$$\varepsilon_x = \varepsilon_n \frac{R_x}{R_n}. \quad (8)$$

Оскільки опір ділянки реохорда пропорційний до його довжини

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

то в отриманій формулі можна замінити відношення опорів на відношення довжин $\frac{l_x}{l_n}$:

$$\varepsilon_x = \frac{l_x}{l_n} \varepsilon_n. \quad (9)$$

Таким чином, вимірювання ЕРС ε_x зводиться до відліку за шкалою реохорду показань l_x при компенсації невідомої ЕРС ε_x та показань l_n при компенсації відомої ЕРС ε_n з подальшим розрахунком за формулою (9).

До складу установки входять:

- Джерело постійного струму В5-46 з ЕРС ε_0 ;

Остаточний результат записати у вигляді

$$\varepsilon_x = (\langle \varepsilon_x \rangle \pm \Delta \langle \varepsilon_x \rangle), \text{ В} \quad \text{при } \alpha=0,9$$

Контрольні питання

1. Які сили називають сторонніми? Дайте визначення ЕРС джерела струму.
2. Сформулюйте закон Ома для замкненого кола.
3. Чому звичайним вольтметром неможливо виміряти ЕРС джерела струму?
4. У чому полягає метод компенсації?

Рекомендована література

1. Кучерук І. М., Горбачук І. Т, Луцик П. П. Загальний курс фізики у трьох томах : навч. посіб. Київ: Техніка, 2006. Т. 2 : Електрика і магнетизм. 450 с.
2. Курс фізики (під редакцією Лопатинського І.Є.. – Львів. – "Бескід Біт". – 2002.
3. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф.. Курс фізики. У 2 кн.: Кн.1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.:«Либідь», 2001. – 448с.
4. Загальна фізика. Лабораторний практикум.: Навч. посібник./ В.М.Барановський, П.В.Бережний, І.Т.Горбачук. та ін.. За заг. ред.. І.Т.Горбачука. – К. Вища шк., 1992 – 509 с.
5. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 3. Електрика і магнетизм. [Електронне видання]: - Д. Національний гірничий університет, 2018. - 165 с. -

Лабораторна робота № 32

Дослідження залежності коефіцієнта корисної дії джерела струму і його потужності від опору навантаження

Мета роботи: експериментальна перевірка теоретичних висновків про залежність корисної потужності та ККД джерела струму від опору зовнішнього навантаження.

Прилади й принадлежности: джерело струму; магазин опорів; міліамперметр.

Теоретичний вступ

Якщо деяке джерело струму, ЕРС якого дорівнює ε і внутрішній опір r , увімкнути в коло з зовнішнім опором R (рис.1.), то на кожній ділянці кола буде витратитися енергія джерела струму.

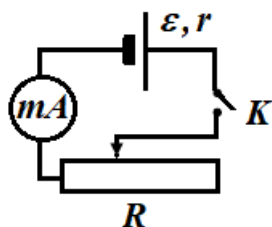


Рис.1.

Потужність $P_{кор}$, що виділяється у зовнішній частині кола, називається **корисною потужністю** і становить

$$P_{кор} = I^2 R. \quad (1)$$

Потужність $P_{внутр}$, яка **марно втрачається** у самому джерелі струму на його нагрівання при проходженні струму в колі, становить

$$P_{\text{внутр}} = I^2 r . \quad (2)$$

Повна енергія, яка витрачається джерелом в одиницю часу (повна потужність), виражається формулою

$$P = P_{\text{кор}} + P_{\text{внутр}} = I^2 R + I^2 r = I \varepsilon \quad (3)$$

Скориставшись законом Ома для замкненого кола

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} , \quad (4)$$

одержимо залежність корисної потужності від опору R при заданій ЕРС у вигляді

$$P_{\text{кор}} = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2} , \quad (5)$$

З формули (5) випливає, що корисна потужність $P_{\text{кор}}$ дорівнює нулю у двох випадках: під час короткого замикання ($R = 0$) та при разомкненому колі ($R = \infty$).

Щоб визначити, за яких умов функція $P_{\text{кор}} = f(R)$ буде мати максимальне значення, треба дослідити її на екстремум.

Необхідно знайти величину $\frac{dP_{\text{кор}}}{dR}$ і дорівняти її нулеві :

$$\frac{dP_{\text{кор}}}{dR} = \frac{\varepsilon^2 (R + r)^2 - 2\varepsilon^2 R(R + r)}{(R + r)^4} = 0 \quad (6)$$

Знаменник тут не дорівнює нескінченності, отже максимум має місце тільки тоді, коли чисельник дорівнює нулю, тобто

$$\varepsilon^2 (R + r)^2 - 2(R + r)\varepsilon^2 R = \varepsilon^2 (R + r)(R + r - 2R) = 0 \quad (7)$$

Рівність (7) здійснюється тільки тоді, коли $R = r$. Таким чином, *корисна потужність джерела стає найбільшою*, коли зовнішній опір кола буде дорівнювати внутрішньому опору джерела.

Коефіцієнтом корисної дії (ККД) джерела називається відношення корисної потужності $P_{\text{кор}}$ до його повної потужності:

$$\eta = \frac{P_{\text{кор}}}{P} = \frac{I^2 R}{I^2 (R + r)} = \frac{R}{R + r} = \frac{1}{1 + \frac{r}{R}} . \quad (8)$$

Звідси випливає, що ККД η буде тим більше прагнути до одиниці, чим більше опір навантаження R у порівнянні з внутрішнім опором r джерела струму.

Коефіцієнт корисної дії η дорівнює 0 при $R = 0$, тобто при короткому замиканні джерела; дорівнює 0,5 при $R = r$ і прагне до 1 при необмеженому зростанні R .

Коефіцієнт корисної дії η дорівнює одиниці (100 %) при разомкненому колі ($R = \infty$), але в цьому випадку корисна потужність дорівнює нулю.

Таким чином, вимоги одночасного отримання максимальної корисної потужності при максимальному ККД є нездійсненними.

Порядок виконання роботи.

1. Зберіть схему установки відповідно до рис. 1.
2. Збільшуючи через кожні 10 Ом опір навантаження R , знімайте значення сили струму за показаннями міліамперметра і занесіть значення R та I у таблицю

Таблиця

№	R , Ом	I , мА	$P_{кор}$, Вт	P , Вт	r , Ом	η
1						
2						
3						
...						
n						

3. За формулою $P_{кор} = I^2 R$ розрахуйте значення корисної потужності за різних значень опору навантаження. Отримані значення $P_{кор}$ занести в таблицю.

4. Побудуйте графік залежності $P_{кор} = f(R)$ і за графіком визначте значення внутрішнього опору джерела струму r . Це значення опору відповідає максимуму побудованої кривої. Занесіть значення r в таблицю.

Приблизний вид графіків показаний на рис.2.

За формулою $P = I^2(R+r)$ розрахуйте значення потужності, що виділяється в колі, за різних значень опору навантаження. Отримані значення P занесіть у таблицю.

Побудуйте графік залежності $P = f(R)$.

6. За формулою $\eta = \frac{R}{R+r}$ розрахуйте

ККД за різних значень опору навантаження. Отримані дані занесіть у таблицю. Побудуйте графік залежності $\eta = f(R)$.

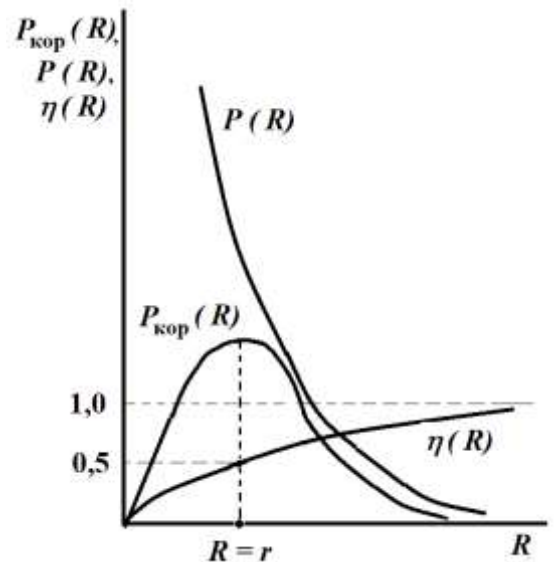


Рис.2.

Контрольні питання

1. Сформулюйте закон Ома для замкнутого кола.
2. Сформулюйте закон Джоуля-Ленца в інтегральній формі.
3. Як по отриманим у результаті експерименту даних визначити ЕРС даного джерела? Визначте її.
4. Як, знаючи значення струму I_1 і I_2 при різних значеннях опору навантаження R_1 і R_2 , визначити внутрішній опір джерела струму? Визначте по отриманим у результаті експерименту даним внутрішній опір джерела запропонованим методом. Порівняйте значення r , отримані різними методами (за формулою і за графіком) $P_{кор} = f(R)$.

Рекомендована література

1. Кучерук І. М., Горбачук І. Т, Луцик П. П. Загальний курс фізики у трьох томах : навч. посіб. Київ: Техніка, 2006. Т. 2 : Електрика і магнетизм. 450 с.
2. Курс фізики (під редакцією Лопатинського І.Є.. – Львів. – "Бескід Біт". – 2002.
3. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф.. Курс фізики. У 2 кн.: Кн.1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.:«Либідь», 2001. – 448с.

4. Загальна фізика. Лабораторний практикум.: Навч. посібник./ В.М.Барановський, П.В.Бережний, І.Т.Горбачук. та ін.. За заг. ред.. І.Т.Горбачука. – К. Вища шк., 1992 – 509 с.

5. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 3. Електрика і магнетизм. [Електронне видання]: - Д. Національний гірничий університет, 2018. - 165 с. -

Лабораторна робота 33

Експериментальний доказ дискретності електричного заряду (дослід Міллікена)

Мета роботи: ознайомлення з дослідом Міллікена; підтвердження дискретності заряду за допомогою комп'ютерної моделі лабораторної установки досвіду Міллікена.

Прилади й належності: 1) персональний комп'ютер; 2) комп'ютерна модель лабораторної установки досвіду Міллікена.

Теоретичний вступ

Експериментальне визначення величини елементарного заряду e і пряме підтвердження дискретності електричного заряду було здійснено американським вченим Міллікеном в 1908-1917 роках.

Складно здійснений в умовах учбової лабораторії досвід Міллікена можна провести за допомогою комп'ютерної моделі, представленої в даній лабораторній роботі. На рис. 1 представлена схема досвіду, на якій зображені горизонтально розташовані пластини конденсатора (1); пульверизатор (2) для отримання дрібних крапельок; джерело напруги (3), за допомогою якої і відбувається зарядка конденсатора, а значить і створюється різниця потенціалів між пластинами конденсатора; кнопка (4); джерело рентгенівського випромінювання (5); окуляр мікроскопа (6), що дає можливість побачити рух крапельок між двома лініями, розташованими на різних висотах, при цьому час руху фіксується за допомогою секундоміра.

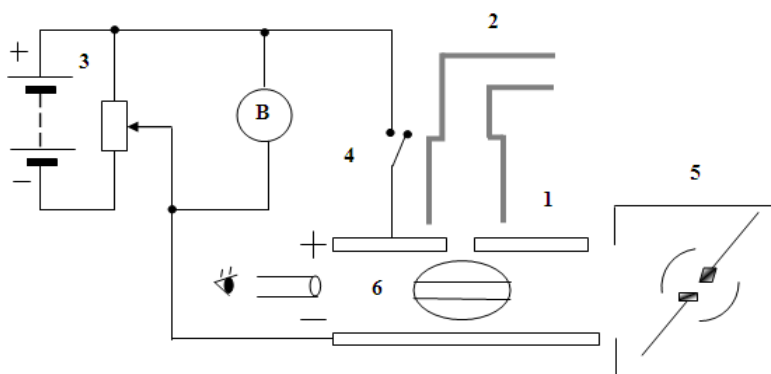


Рис. 1

В даній роботі розглядається рух крапельки у водні з урахуванням сили Архімеда і сили внутрішнього тертя – сили Стокса.

На рис. 2 показані сили, що діють на заряджену крапельку у відсутності електричного поля (а) і в полі (б). І в першому і в другому випадках рух крапельки рівномірний. У випадку а) крапелька рухається вниз, а у випадку б) – вгору.

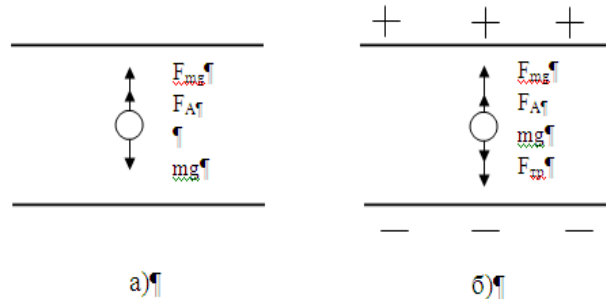


Рис. 2

Записавши рівняння руху крапельки у векторній формі

$$\left. \begin{aligned} \vec{F}_A + m \vec{g} + \vec{F}_{mp1} &= 0 \\ \vec{F}_{эл} + \vec{F}_A + m \vec{g} + \vec{F}_{mp2} &= 0 \end{aligned} \right\},$$

а потім в скалярній

$$\left. \begin{aligned} mg - F_{mp1} - F_A &= 0 \\ mg + F_{mp2} - F_A - F_{эл} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

і враховуючи, що сила Архімеда $F_A = \rho_{H_2} \cdot gV$, де ρ_{H_2} – густина водню, V – об’єм крапельки, а сила тертя при малих швидкостях руху краплі пропорційна її швидкості $F_{mp} = k\mathcal{V}$, отримаємо

$$\left. \begin{aligned} mg - k\mathcal{V}_0 - \rho_{H_2} gV &= 0 \\ mg + k\mathcal{V}_1 - \rho_{H_2} gV - qE &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Виразивши з рівнянь (2) швидкості руху крапельки \mathcal{V}_0 для випадку а) і \mathcal{V}_1 для випадку б), отримаємо

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{V}_0 &= \frac{1}{k}(mg - \rho_{H_2} gV) \\ \mathcal{V}_1 &= \frac{1}{k}(\rho_{H_2} gV + qE - mg). \end{aligned} \right\}$$

Розділивши перше рівняння на друге, отримаємо

$$\frac{\mathcal{V}_0}{\mathcal{V}_1} = \frac{mg - \rho_{H_2} gV}{\rho_{H_2} gV + qE - mg} \quad (3)$$

В дослідах Міллікена велика частина крапель, що потрапляють в простір між пластинами, заряджаються, придбаваючи негативний заряд. Крапельки між

пластинами конденсатора рухаються майже рівномірно унаслідок наявності внутрішнього тертя середовища. Створивши між пластинами поле, можна примусити краплю підійматися, а при її наближенні до верхньої пластини, вимкнувши поле, опуститися під впливом сили тяжкості.

Включаючи і вимикаючи поле, можна примусити краплю багато разів повторювати рухи між пластинами то вгору, то вниз. У момент включення і виключення поля відбувається швидка зміна швидкості краплі, а як видно з (3) такі зміни швидкості можливі тільки при зміні заряду краплі, оскільки m , g , E і ρ_{H_2} залишаються постійними при даних наглядах.

Міллікен припустив, що заряджена крапля, рухаючись в середовищі іонізованого рентгенівським випромінюванням газу, захоплює іони, що і приводить до зміни заряду краплі, а отже, і швидкості її руху. Слід зазначити, що оскільки середовищем, в якому рухаються краплі в даній роботі, є водень, то іонізація цього газу приводить до виникнення електронів і однозарядних позитивних іонів. А оскільки маса іона багато більше маси електрона, то і переріз його взаємодії з крапелькою на декілька порядків більше, ніж переріз взаємодії з електронами. Саме тому крапелька захоплює позитивний іон, а, отже, її негативний заряд зменшується.

Початковий заряд крапельки q_1 і заряд краплі після захвату $-q_2$ пропорційні $((\mathcal{G}_0 + \mathcal{G}_1))$ і $((\mathcal{G}_0 + \mathcal{G}_2))$ відповідно.

А різниця $(q_2 - q_1)$ визначає заряд, придбаний крапелькою.

$$\Delta q = q_2 - q_1 = \frac{g(m - \rho_{H_2} V)}{v_0 E} (\mathcal{G}_2 - \mathcal{G}_1). \quad (3)$$

(Висновок формули (3) приведений в додатку).

Таким чином, величина захопленої крапелькою заряду пропорційна різниці швидкостей руху краплі після і до захоплення.

З численних дослідів, виконаних Міллікеном, ним був зроблений висновок: де б ні зустрічався електричний заряд q на ізоляторах, провідниках, в електродних або в металі – скрізь він є сумою деяких елементарних зарядів e , які завжди однакові $\Delta q = ke$ де $k=1; 2; 3...$

Порядок виконання роботи.

1. Ознайомтеся з схемою роботи установки.
2. Виберіть будь-яку з падаючих крапель і зафіксуйте її, натискаючи клавішу «пропуск» у момент перетину нею верхньої лінії. Включіть джерело рентгенівського випромінювання, для чого **короткочасно** натискуйте на клавішу «F»-4.
3. Після досягнення «міченою крапелькою» нижньої лінії тією ж клавішею «пропуск» вимкнете секундомір.
4. Включіть за допомогою клавіші «↑» поле і зафіксуйте той момент, коли вибрана вами крапелька перетне верхню лінію.
5. Вимкніть поле, натискаючи клавішу «↓», після чого перейдіть до нового досвіду.

6. Проаналізуйте автоматично заповнювану таблицю, в якій приведені величини зарядів, «захоплених» крапелькою Δq . Переконайтеся в тому, що всі отримані величини зарядів придбані крапелькою кратно цілому числу елементарних зарядів $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Контрольні питання

1. Яким чином крапелька одержує первинний заряд?
2. Яким чином проводиться в даному досвіді іонізація водню?
3. Який умова рівномірного руху зарядженої крапельки в електричному полі?
4. Який умова рівномірного руху незарядженої крапельки?
5. Чому рівний елементарний заряд і які частинки володіють цим зарядом?

Рекомендована література

1. Кучерук І. М., Горбачук І. Т, Луцик П. П. Загальний курс фізики у трьох томах : навч. посіб. Київ: Техніка, 2006. Т. 2 : Електрика і магнетизм. 450 с.
2. Курс фізики (під редакцією Лопатинського І.Є.. – Львів. – ”Бескід Біт”. – 2002.
3. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф.. Курс фізики. У 2 кн.: Кн.1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.:«Либідь», 2001. – 448с.
4. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 3. Електрика і магнетизм. [Електронне видання]: - Д. Національний гірничий університет, 2018. - 165 с.

Додаток 1.

З рівняння (3) знайдемо величину заряду крапельки

$$q = \frac{(\mathcal{G}_0 + \mathcal{G}_1) g (m - \rho_{H_2} v)}{\mathcal{G}_0 E}. \quad (\text{П.1})$$

Масу краплі виразимо через густину краплі ρ_M і її об'єм $V = \frac{4}{3} \pi r^3$.

Після підстановки $m = \rho_M \cdot V = \rho_M \frac{4}{3} \pi r^3$ в (П.1), отримаємо

$$q = \frac{(\mathcal{G}_0 + \mathcal{G}_1) g \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_M - \rho_{H_2})}{\mathcal{G}_0 E}.$$

За відсутності електричних полів рух частинки описується рівнянням

$$m \vec{g} + \vec{F}_{\text{тр}} + \vec{F}_A = 0$$

В скалярній формі цей закон можна записати у вигляді

$$mg - F_A - F_{\text{тр}} = 0 \quad (\text{П.2})$$

З урахуванням того, що $F_{\text{тр}} = F_{\text{стокса}} = 6\pi\eta r v_0$, де η – коефіцієнт внутрішнього тертя водню, після підстановки F_A і $F_{\text{тр}}$ в (П.2), отримаємо

$$(\rho_M - \rho_{H_2}) \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 g = 6\pi\eta r \mathcal{G}_0. \quad (\text{П.3})$$

Виразити з (П.3) $r = \sqrt{\frac{9\eta \mathcal{G}_0}{2g(\rho_M - \rho_{H_2})}}$ і підставивши його в (П.1), отримаємо

$$q = \frac{\varrho_0 + \varrho_1}{E} \cdot \frac{18\pi\eta}{\sqrt{2g}} \cdot \sqrt{\frac{\eta\varrho_0}{(\rho_M - \rho_{H_2})}}. \quad (\text{П.4})$$

Нехтуючи ρ_{H_2} по порівнянню з ρ_M і, підставляючи всі відомі величини, вираз (П.4) перепишемо у вигляді

$$q = \frac{12,77(\varrho_0 + \varrho_1)\eta}{E} \sqrt{\frac{\eta\varrho_0}{\rho_M}},$$

а вираз для Δq запишемо так:

$$\Delta q = \frac{12,77(\varrho_2 - \varrho_1)\eta}{E} \sqrt{\frac{\eta\varrho_0}{\rho_M}}.$$

Ця формула співпадає з приведеною в лабораторній роботі, що розглядає модель досвіду Міллікена на ПК, але в ній позначення деяких величин не співпадають із загальноприйнятими.

Так, в'язкість η середовища, в якому відбувається рух краплі позначена буквою P , а густина масла ρ_M – літерою R .

З урахуванням цього, вираз для Δq набуває вигляд

$$\Delta q = \frac{12,77(\varrho_2 - \varrho_1)P}{E} \sqrt{\frac{P\varrho_0}{R}}.$$

В даній роботі розрахунок q і Δq проводиться автоматично після кожного досвіду, при цьому таблиця результатів також поповнюється автоматично.

Лабораторна робота №34

Експериментальна перевірка закону Кулона на комп'ютерній моделі

Мета роботи: переконатися, що сила F взаємодії двох точкових зарядів у вакуумі: 1) пропорційна їх величинам q_1 та q_2 ; 2) обернено пропорційна квадрату відстані між ними.

Опис експерименту

Закон Кулона – один з експериментальних фактів, на яких побудовано вчення про електрику.

Раціональний запис закону Кулона для двох нерухомих точкових зарядів у вакуумі має вигляд

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1q_2|}{r^2} \quad (1)$$

де F - модуль сили Кулона, q_1 та q_2 – величини взаємодіючих зарядів, r - відстань між зарядами, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$ - електрична стала.

Експериментально доведено, що закон Кулона виконується на відстанях від 10^{-15} м до 10^7 м. Для більшої відстані прямі експериментальні дослідження не проводили.

Перевірка закону прямим вимірюванням сили взаємодії з великою точністю утруднена через те, що у експериментаторів немає нерухомих точкових зарядів.

Можливість моделювання фізичних явищ за допомогою комп'ютерних програм дозволяє в навчальній лабораторії ознайомитись з методом, який використав Кулон для вимірювання сили взаємодії двох заряджених кульок.

Експериментальна установка в дослідах Кулона показана на рис. 1.

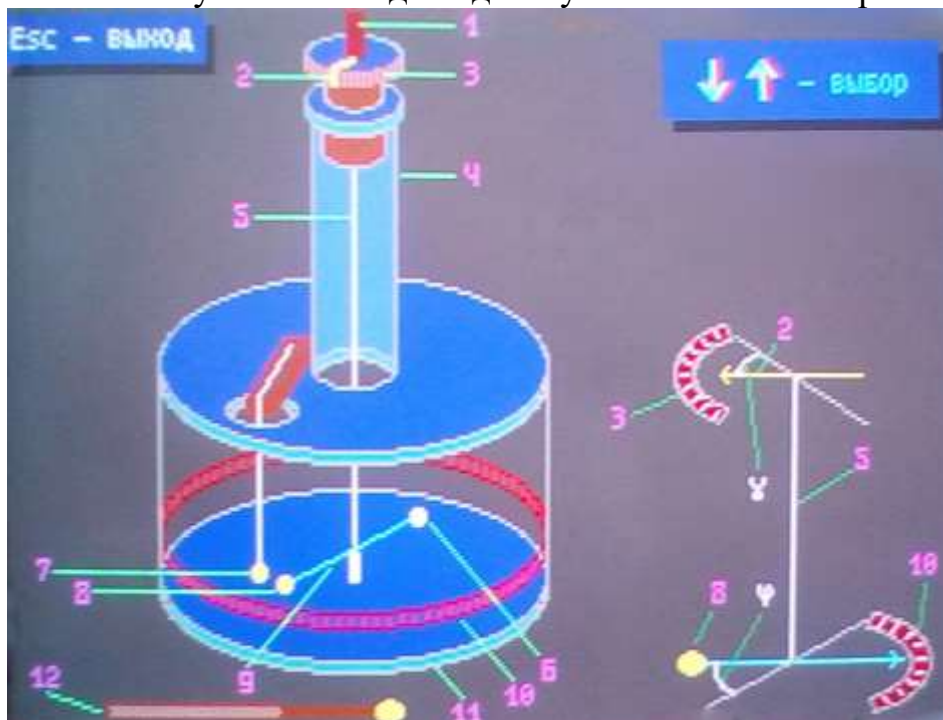


Рис. 1.

Це чутливі крутильні терези схожі з тими, які використовував Кавендіш для визначення гравітаційної сталої.

На тонкій кварцовій нитці було підвішено горизонтально коромисло (9) з маленькою зарядженою кулькою (8) на одному кінці, а на другому – з противагою. Друга заряджена кулька (7), яка знаходилась на деякій відстані від першої кульки в тій же горизонтальній площині. Скляний циліндр (11) захищає чутливі частини приладу від зовнішніх впливів.

Всередині скляного циліндра знаходяться дві шкали: одна для вимірювання (фіксації) кута γ (2) закручування нитки, друга – для вимірювання кута φ (10) повороту коромисла. Там же знаходяться головка приладу (1). Кут γ та φ вимірюються в градусах.

Лабораторна робота складається з двох частин – перевірки залежностей:

$$1) F \sim q_1 q_2;$$

$$2) F \sim \frac{1}{r^2}.$$

Розглянемо, як перевірити залежність $F \sim q_1 q_2$.

Нехай знаки зарядів однакові. В результаті електростатичного відштовхування вони віддаляться на якусь відстань. При цьому коромисло терезів повернеться на кут φ . Якщо змінювати заряди кульок, але зберігати незмінною відстань між ними, то не буде змінюватись і кут φ .

При цьому визначають кут γ , який пропорційних моменту сили M , модуль якого дорівнює

$$M = FR = k \frac{q_1 q_2}{r^2} R \quad (2)$$

де F - сила, яка створює крутильний момент (сила Кулона), R - плече сили.

Під дією моменту сили коромисло буде повертатися до тих пір, поки цей момент не буде зрівноважений протидіючим моментом $M_{пр}$ пружних сил. Модуль протидіючого моменту дорівнює

$$M_{пр} = G \frac{\pi r_n^4}{2l} \gamma \quad (3)$$

де r_n - радіус нитки; l - довжина нитки; G - модуль кручення матеріалу нитки.

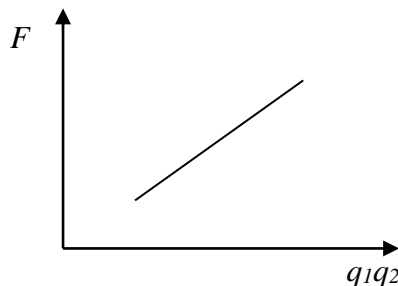
Положенню рівноваги відповідає

$$M = M_{пр} \quad (4)$$

В процесі експерименту G , r_n , l , R не змінюються. Отже, сила взаємодії кульок, як витікає з (4) прямо пропорційна куту γ закручування нитки

$$F = G \frac{r_n^4}{2lR} \gamma \quad (5)$$

З цього робимо висновок, що $F \sim \gamma$, тобто $F \sim q_1 q_2$. Отже графік залежності $F \sim \gamma = f(q_1 q_2)$ є пряма лінія.



Для перевірки залежності сили Кулона від відстані між зарядженими кульками треба залишати їх заряди незмінними.

Відстань між кульками автоматично змінюється з поворотом коромисла на кут φ . Для малих кутів довжина дуги, на яку опирається кут φ та довжина хорди r , яка стягує кінці дуги збігаються $r = \int dl = \int R d\varphi = R\varphi$.

Висновок: відстань між кульками пропорційна куту φ повороту коромисла.

Тепер рівняння (4) можна записати так

$$G \frac{\pi r_n^4}{2l} \gamma = k \frac{q_1 q_2}{(R\varphi)^2} R \quad (6)$$

$$F \sim \frac{const}{\varphi^2}$$

Порядок виконання роботи

I. Перевірка залежності сили Кулона від добутку величин зарядів $q_1 q_2$.

1. Зарядити кульку (7) та змінюючи кут повороту коромисла до нуля, торкнутися цієї кульки другою однакового розміру кулькою, яка є на коромислі. Після того, як кульки відштовхнуться, записати в таблицю 1 величини зарядів q_1 та q_2 , а також кути закручування γ й повороту φ .

2. Зменшити або збільшити заряд q_1 , але залишаючи відстань між зарядами (тобто кут φ зостається попереднім). Занести значення кута γ та зарядів q_1 та q_2 в таблицю. Повторити дослід не менше п'яти разів.

Побудувати графік залежності $F=f(q_1q_2)$, враховуючи, що $F\sim\gamma$.

II. Перевірка залежності сили Кулона від відстані між зарядами.

1. Надати заряди кулькам і залишаючи їх величини постійними, змінювати відстань між кульками. При цьому записувати в таблицю 2 значення кутів φ та γ .

2. Дослід повторити не менше п'яти разів.

Побудувати графіки залежності $F=f(r^2)$; $F = f\left(\frac{1}{r^2}\right)$, пам'ятаючи, що $F\sim\gamma$, а

$r\sim\varphi$.

Контрольні питання

1. Що означає точковість зарядів, про які іде мова у законі Кулона?
2. Які властивості мають заряди?
3. Чому дорівнює елементарний заряд?
4. Наведіть приклади носіїв елементарного заряду.
5. Заряд якої величини можна виявити у такому експерименті: дві маленькі кульки масами $m=0,12$ г кожна підвішені на шовкових нитках так, що їх поверхні стикаються. Після надання кулькам електричного заряду вони відштовхнулись і їх центри розійшлися на відстань $d=6$ см. Довжина нитки $l=30$ см.

Рекомендована література

1. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф. Курс фізики. У 2 кн.: Кн. 1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. К.: «Либідь», 2001. – 448 с.
2. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 3. Електрика і магнетизм. [Електронне видання]: - Д. Національний гірничий університет, 2018. - 165 с.

Лабораторна робота 35

Експериментальне дослідження електростатичного поля методом моделювання

Мета роботи: дослідження електростатичного поля методом моделювання.

Прилади й принадлежности: ванна з електродами різної форми, частково заповнена водою; джерело живлення; вольтметр; пантограф із зондом; масштабна лінійка.

Теоретичний вступ

Для характеристики електростатичного поля в кожній точці простору використовують вектор напруженості \vec{E} поля і потенціал φ поля. Ці величини зв'язані співвідношенням:

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

Знаючи розподіл ліній рівного потенціалу, можна, з огляду на те, що лінії напруженості перпендикулярні екіпотенціальним лініям у точках перетинання, побудувати лінії напруженості поля (рис. 1).

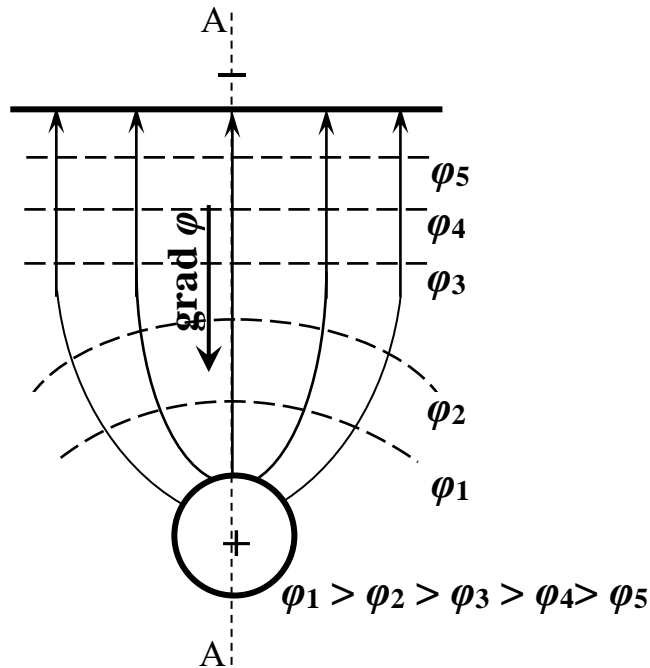


Рис. 1

У більшості випадків геометричне розташування електродів занадто складне, щоб екіпотенціальні лінії можна було визначити аналітично. У цих випадках застосовують пристрої, що дозволяють завдяки аналогії між розподілом електричного потенціалу і розподілом відповідної величини в системі пристрою легко побудувати екіпотенціальні лінії. Вивчення електростатичного поля заміняють вивченням його на моделі, що представляє собою електричне поле постійного в часі (стаціонарного) струму в слабко провідному середовищі між електродами, форма і взаємне розташування яких такі ж, як і в досліджуваному полі. У такому середовищі поле в просторі має ту ж конфігурацію, яку воно мало б у непровідному середовищі та у вакуумі.

Таким чином, електростатичне поле в непровідному середовищі (у вакуумі або діелектрику) і поле постійних струмів в однорідному середовищі практично однакові, обидва поля потенційні, а їхні лінії напруженості перпендикулярні поверхням заряджених провідників – електродів (поблизу цих поверхонь). Через те, що існують прості способи і прилади для виміру різниці потенціалів, розподіл потенціалів простіше вивчати експериментально.

Дослідження розподілу потенціалів в електростатичному полі здійснюється за допомогою методу зонда. Сутність цього методу складається у введенні в досліджувану точку поля, створюваного зарядженими провідниками (електродами), спеціального електрода – зонда, з'єднаного з приладом, що вимірює потенціал точки, в якій розміщено зонд.

Експериментальна установка складається з ванни, виконаної з матеріалу з високими електроізоляційними властивостями, джерела живлення і вольтметра (рис. 2).

У ванну поміщені металеві електроди, поле між якими досліджується, і налита вода шаром близько 5 мм. Питома провідність води порядку 10^{-3} – 10^{-2} См/м, а питома провідність матеріалу електродів 10^{-7} См/м.

При роботі необхідно цілком усунути можливість електролізу рідини, оскільки виникаючі пухирці газу викликають місцеві зміни потенціалу і приводять до значних неточностей. Тому роботу варто проводити зі змінною напругою. Для фіксації положення і форми екіпотенціальних ліній користуються спеціальним пристроєм – пантографом. До кінця направляючої лінійки прикріплюють зонд 2, що переміщається з лінійкою в горизонтальній площині над ванною. Нижній кінець зонда поміщають у воду. Пантограф служить для фіксації екіпотенціальних ліній на листі паперу. Система лінійок улаштована так, що олівець на пантографі повторює рух зонда, залишаючи на папері слід.

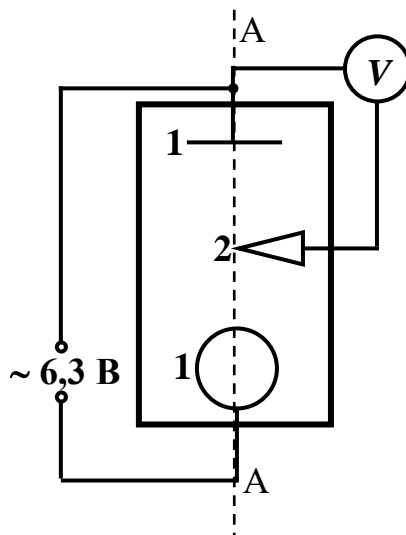


Рис. 2

Щоб приступити до побудови на папері екіпотенціальних ліній досліджуваного електричного поля, необхідно одержати контури горизонтальних перетинів електродів, встановлених у ванні. Для цього при *виключеному* джерелі живлення потрібно обвести зондом контури поверхонь електродів. Для одержання на папері зображення точок рівного потенціалу досліджуваного поля необхідно, переміщаючи зонд в електролітичній ванні, визначати точки з однаковим потенціалом. Повторюючи ці операції для різних значень потенціалу зонда, на папері одержують зображення сімейства екіпотенціальних ліній досліджуваного поля. За отриманим розташуванням екіпотенціальних ліній можна побудувати лінії напруженості поля.

Порядок виконання роботи.

1. Зібрати коло як на рис. 2.
2. Помістити зонд у точку, що знаходиться поблизу одного з електродів, записати показання вольтметра і відзначити точку з отриманим значенням потенціалу.
3. Переміщаючи зонд, знайти ще 4–6 точок, що мають такий же потенціал і розташованих по ту ж сторону осі симетрії *AA*, а потім знайти аналогічні точки з іншого боку цієї осі.
4. Побудувати екіпотенціальні лінії, для цього на рисунку з'єднати точки з однаковим значенням потенціалу.

5. Повторити виміри для інших значень потенціалу. У просторі між електродами необхідно одержати не менш 7-ми ліній рівного потенціалу.

6. Побудувати лінії напруженості.

7. Побудувати графік залежності потенціалу φ поля від координати x . Значення x вибрати для точок, що належать осі симетрії. Початок відліку сполучити з поверхнею електрода, поблизу якого зареєстрований менший потенціал.

При побудові графіків $E(x)$ і $\varphi(x)$ та для спрощення розрахунків E доцільно вимірювати відстань не від опорного електрода до точки, у якій розглядається еквіпотенціальна лінія, а відстань від зображення опорного електрода до зображення відповідної еквіпотенціальної лінії, отриманої за допомогою пантографа.

Порівнюючи відстань L між електродами в електролітичній ванні і відстань l між зображенням цих електродів на папері, одержуємо масштабний коефіцієнт, який дорівнює $\frac{L}{l}$.

Цей коефіцієнт враховується безпосередньо при виборі масштабу по осі абсцис при побудові графіків залежностей $\varphi(x)$ і $E(x)$.

8. Користуючись побудованим графіком $\varphi(x)$, методом чисельного диференціювання знайти напруженість E поля для різних значень x , вважаючи, що

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x},$$

де $\Delta\varphi$ – зміна потенціалу на відрізку Δx .

Розрахунок за наведеною формулою проводити у такій послідовності. Вибравши значення x_1 , установити за графіком значення φ_1 , що відповідає значенню x_1 , а потім значення φ_2 для $x_2 = x_1 + \Delta x$.

Розділивши $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ на Δx , одержимо числове значення напруженості E поля, яке варто віднести до середини вибраного інтервалу $x_1, x_1 + \Delta x$. Розрахунок виконати для 7–8-ми значень x , що охоплюють увесь інтервал відстаней між електродами. Значення $\Delta x, \Delta\varphi$, значення координат, що відповідають серединам інтервалів Δx (у таблиці ця величина позначена x_i), E занести в таблицю. По отриманим даним побудувати графік залежності $E(x)$.

№ виміру	$\Delta x_i,$ мм	$\Delta\varphi_i,$ В	Координата середини інтервалу $x_i, мм$	$E,$ В / м
1				
...				
10				

Контрольні питання.

1. Що називають напруженістю \vec{E} і потенціалом φ електричного поля? Який зв'язок між ними?
2. Як зобразити силове поле, знаючи розподіл еквіпотенціальних ліній.

3. Пояснити розподіл ліній напруженості та еквіпотенціальних ліній для дослідженого поля.
4. Який має вигляд теоретична залежність $E = f(x)$? Чому?

Рекомендована література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. – К.:Техніка, 2001. – Т.2, розд.2.
2. Лопатинський І.Є., Зачек І.Р., Кравчук І.М., Романишин Б.М., Габа В.М., Гончар Ф.М. Курс фізики. Підручник. – Львів: Афіша, 2003. – 376 с.
3. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 3. Електрика і магнетизм. [Електронне видання]: - Д. Національний гірничий університет, 2018. - 165 с.

Лабораторна робота 36

Визначення опору міліамперметра та опору джерела струму методом шунтування

Мета роботи: 1) вивчення законів постійного струму, 2) визначення опору гальванометра і джерела струму методом шунтування.

Прилади й принадлежности: міліамперметр; джерело струму; два магазини опору; ключ і кнопка; з'єднувальні провідники.

Теоретичний вступ

Для визначення опору міліамперметра і внутрішнього опору джерела струму застосовується метод шунтування. Опір міліамперметра вимірюється за схемою, що на рис.1.

1. Джерело струму ε , ключ K_n , міліамперметр mA (опір R_z , якого потрібно визначи-

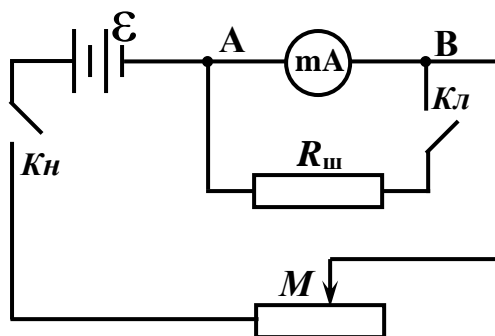


Рис. 1

ти) і магазин опорів M з'єднують послідовно. При замиканні кнопки K_n через опір R_1 магазину M протікає струм I_1 . Після присєднання паралельно міліамперметру шунта опором $R_{ш}$ струм через гальванометр зменшиться. Тепер можна підібрати в магазині M такий опір R_2 , при якому міліамперметр покаже попередній струм I_1 . Зневажаючи внутрішнім опором гальванічного елемента, у першому випадку (без шунта) одержимо за законом Ома для замкнутого ланцюга запишемо

$$\varepsilon = I_1(R_1 + R_2). \quad (1)$$

Для другого випадку (із шунтом), застосовуючи перше і друге правила Кирхгофа, одержимо:

для вузла А
$$I_2 = I_1 + I_{ш}; \quad (2)$$

для контуру $\varepsilon ABR\varepsilon$
$$\varepsilon = I_1 R_2 + I_2 R_2; \quad (3)$$

для контуру $ABR_{ш}A$
$$0 = I_1 R_2 + I_{ш} R_{ш}. \quad (4)$$

Розв'язуючи ці чотири рівняння, отримаємо

$$R_2 = \frac{R_1 - R_2}{R_2} R_{ш}. \quad (5)$$

Порядок виконання роботи.

1. Зібрати електричне коло за схемою рис. 1.
2. Після перевірки кола викладачем увімкнути опір магазина 10 - 15 кОм і, замкнувши кнопку K_n , зазначити на шкалі положення стрілки гальванометра.
3. За вказівкою викладача увімкнути шунт $R_{ш}$ і, замикаючи кнопку K_n , підібрати в магазині такий опір R_2 , щоб спостерігалось попереднє відхилення стрілки гальванометра.
4. Дослід повторити при різних значеннях R_1 і $R_{ш}$.
5. Результати вимірів і обчислень записати в табл. 1.

Остаточний результат записати у вигляді

$$R_{2_{іст}} = (\langle R_2 \rangle \pm \Delta R_2) \text{ Ом при } \alpha = \dots$$

II. Щоб визначити внутрішній опір гальванічного елемента r , необхідно зібрати коло за схемою рис. 2.

Якщо замкнути ключ K_l , то по колу протікає струм I_1 , і за законом Ома

для замкненого кола
$$\varepsilon = I_1 (R_1 + R_2 + r). \quad (6)$$

Не розмикаючи ключа K_l , замкнути кнопку K_n , підібрати в магазині такий опір R_3 , щоб через гальванометр протікав струм I_1 . На базі правил Кирхгофа запишемо:

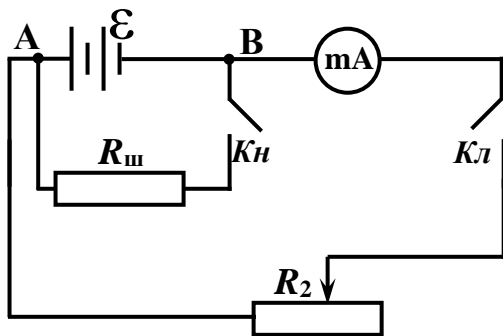


Рис. 2

для вузла А:
$$I_1 = I_2 + I_{ш}; \quad (7)$$

для контуру $A R_{ш} B R A$:
$$0 = I_{ш} R_{ш} + I_1 (R_2 + R_3); \quad (8)$$

для контуру $A\varepsilon B R_{ш} A$:
$$\varepsilon = I_2 r - I_{ш} R_{ш}. \quad (9)$$

Розв'язуючи системи (6) – (9), одержимо

$$r = \frac{R_1 - R_3}{\langle R_2 \rangle + R_3} R_{ш}. \quad (10)$$

Вимірювання провести у такій послідовності, як і в пунктах 2, 3, 4, причому R_1 приймають 15000 – 10000 Ом, $R_{ш}$ – береться за вказівкою викладача.

Результати вимірів занести в табл. 2.

Остаточний результат записати у вигляді

$$r_{\text{ист}} = (\langle r \rangle \pm \Delta r) \text{ Ом при } \alpha = \dots$$

Таблиця 1

№ Виміру	R_1 , Ом	n , поділ.	$R_{\text{ш}}$, Ом	R_2 , Ом	R_{2i} , Ом	$\langle R_2 \rangle$, Ом	ΔR_{2i} , Ом	ΔR_{2i}^2 , (Ом) ²	$S\langle R_2 \rangle$, Ом	α	$t_{\alpha, n}$	ΔR , Ом	E , %
1													
2													
3													

Таблиця 2

№ виміру	R_1 , Ом	n , поділ	$R_{\text{ш}}$, Ом	R_3 , Ом	$\langle R_2 \rangle$, Ом	r_i , Ом	$\langle r \rangle$, Ом	Δr_i , Ом	Δr_i^2 , (Ом) ²	$S\langle r \rangle$, Ом	α	$t_{\alpha, n}$	Δr , Ом	E , %
1														
2														
3														

Контрольні питання

1. Як і який опір потрібно підключити до міліамперметра, розрахованого на струм 300 мА, щоб можна було вимірювати з його допомогою струм 3А?
2. Як і який опір потрібно підключити до міліамперметра, щоб вимірювати напругу в n раз більшу, ніж та, на яку він розрахований?
3. Сформулюйте 1- і 2-ге правило Кирхгофа.
4. Сформулюйте закон Ома для замкненого кола.

Рекомендована література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. – К.:Техніка, 2001. – Т.2, розд.2.
2. Лопатинський І.Є., Зачек І.Р., Кравчук І.М., Романишин Б.М., Габа В.М., Гончар Ф.М. Курс фізики. Підручник. – Львів: Афіша, 2003. – 376 с.
3. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 3. Електрика і магнетизм. [Електронне видання]: - Д. Національний гірничий університет, 2018. - 165 с.

Лабораторна робота № 38

Визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі за допомогою тангенс-гальванометра

Мета роботи: знайомство з елементами земного магнетизму, визначення горизонтальної складової напруженості магнітного поля.

Прилади й принадлежности: тангенс - гальванометр, джерело постійного струму, амперметр, перемикач.

Теоретичний вступ

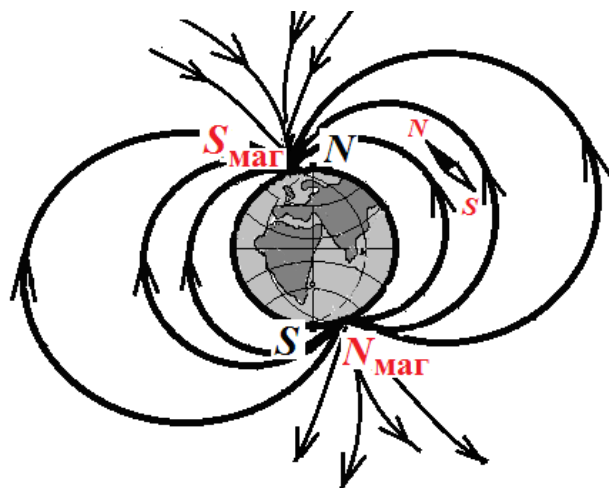


Рис. 1.

Елементи земного магнетизму

Земля є величезним природним магнітом кулястої форми, який створює навколо Землі **магнітне поле**.

Переконалися в існуванні магнітного поля в будь-якій точці Землі можна за допомогою **магнітної стрілки**.

Стрілка компаса – це маленький постійний магніт, який може вільно обертатися навколо вертикальної осі. Відповідно до правила магнетизму різноманітні магнітні полюси притягують-

ся один до одного. Той кінець стрілки компаса, який притягується до південного магнітного полюса Землі $S_{\text{маг}}$, найчастіше пофарбований у синій колір, а протилежний – у червоний колір.

Магнітні полюси Землі розташовані в порівнянні з географічними полюсами *навпаки* - поблизу північного географічного полюса N (North – англ. *північ*) знаходиться південний магнітний полюс $S_{\text{маг}}$ (South – англ. *південь*), поруч з південним географічним полюсом S розташований північний магнітний полюс $N_{\text{маг}}$ (рис.1). Силкові лінії магнітного поля Землі, як і для будь-якого магніту, виходять з північного полюса магніту $N_{\text{маг}}$ і входять в південний полюс $S_{\text{маг}}$.

При точних вимірах було виявлено, що магнітне поле Землі безперервно змінюється з плином часу. В даний час природа земного магнетизму не з'ясована. Вважається, що магнітне поле, в основному, обумовлене процесами, що протікають в рідкому металевому ядрі Землі.

Подібно до того, як на поверхні Земної кулі подумки проводять меридіанні лінії, утворені перетином поверхні площинами, що проходять через вісь обертання Землі, магнітні полюси теж з'єднують на земній поверхні **магнітними меридіанами**. Вертикальна площина, що проходить через меридіан і центр Землі називається площиною магнітного меридіану.

Стрілка компаса, яка може вільно обертатися, встановлюється в площині магнітного меридіану за дотичною до меридіану (див. рис. 1). Своім північним кінцем N стрілка притягується до південного магнітного полюса Землі $S_{\text{маг}}$, і таким чином *вказує напрям на географічну північ*.

Фундаментальною характеристикою магнітного поля є **вектор магнітної індукції B** . Він визначає силу дії магнітного поля на рухомі заряджені частинки

і струми, а також може бути безпосередньо вимірний (наприклад, тесламетр з перетворювачем Холла).

Вводиться також допоміжна величина - *напруженість магнітного поля H* . У вакуумі (наближено і в повітрі) напруженість магнітного поля (H) збігається з вектором магнітної індукції (B) з точністю до коефіцієнта: $B = \mu_0 H$.

Цінність напруженості H полягає в тому, що вона визначається так званими макрострумами, які проходять по дротах та які порівняно легко безпосередньо виміряти, а напруженість простіше розрахувати.

У даній роботі магнітне поле описується напруженістю H . У системі одиниць СІ одиницею напруженості магнітного поля є ампер-на-метр (А/м). Напруженість магнітного поля Землі в середньому дорівнює 40 А/м. Найбільшої величини магнітне поле досягає поблизу магнітних полюсів, а найменшої - у екватора.

Положення магнітної стрілки визначається напрямом дотичної до лінії магнітного меридіану. Як впливає з рис. 1, магнітне поле Землі на екваторі направлено горизонтально, а біля магнітних полюсів - вертикально. В інших точках земної поверхні магнітне поле Землі направлено під деяким кутом. У північній півкулі кінець стрілки, що вказує на північ, відхиляється вниз. Тому вектор напруженості магнітного поля Землі доцільно розкласти на 2 складових: горизонтальну H_H , з якою зазвичай і мають справу, і вертикальну H_V .

Чому визначають саме горизонтальну складову H_H напруженості? Тому що магнітна стрілка, яка може обертатися тільки навколо вертикальної осі, буде відхилятися в горизонтальній площині тільки під дією саме горизонтальної складової магнітного поля Землі H_H . У даній роботі горизонтальна складова напруженості магнітного поля Землі H_H визначається за допомогою так званого тангенс - гальванометра (рис. 2).



Він складається з замкнутого провідника, утвореного з n прилеглих щільно один до одного витків. Провідник має форму кругової рамки. У центрі рамки укріплений компас, стрілка якого може вільно обертатися навколо вертикальної осі.

Рис. 2.

Під дією тільки магнітного поля Землі H_{Γ} стрілка зайняла б положення в площині магнітного меридіану уздовж H_{Γ} (рис. 3).

Якщо ж в цій же площині розмістити рамку тангенс - гальванометра і включити струм, що протікає через витки, то з'явиться магнітне поле струму H_C . Напрямок напруженості H_C поля струму буде перпендикулярним до площини витків і напрямку вектора H_{Γ} .

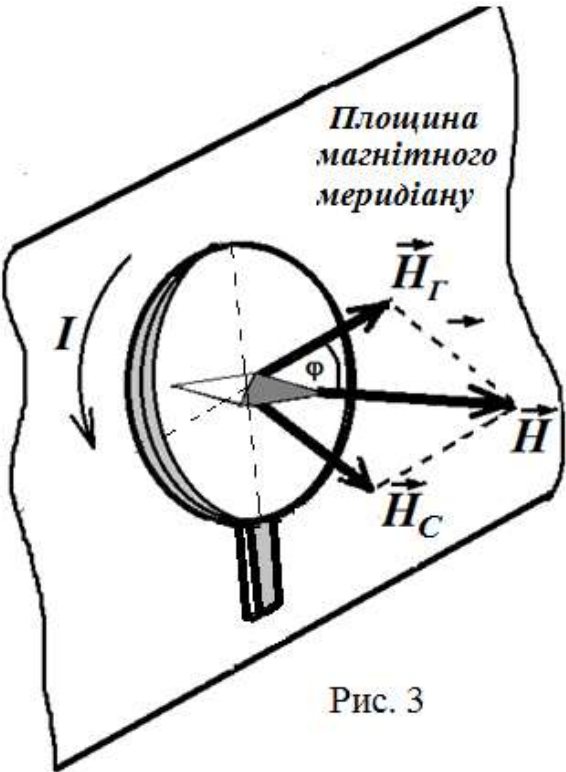


Рис. 3

Відповідно до принципу суперпозиції (накладання полів) напруженість повного магнітного поля дорівнює:

$$H = H_{\Gamma} + H_C.$$

Магнітна стрілка займе нове положення рівноваги, в якому її напрям збігається з напрямом рівнодіючої H .

Кут повороту φ магнітної стрілки (рис.3) визначимо з прямокутного трикутника:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{H_C}{H_{\Gamma}}. \quad (1)$$

Напруженість магнітного поля струму H_C в центрі кругової котушки з струмом, що містить n витків, знаходиться на підставі закону Біо-Савара-Лапласа і чисельно дорівнює:

$$H_C = \frac{In}{2R}, \quad (2)$$

де I - сила струму в котушці; R - радіус витка.

Тоді з (1) і (2) горизонтальна складова напруженості (модуль її) земного магнітного поля для даного місця Землі виразиться формулою:

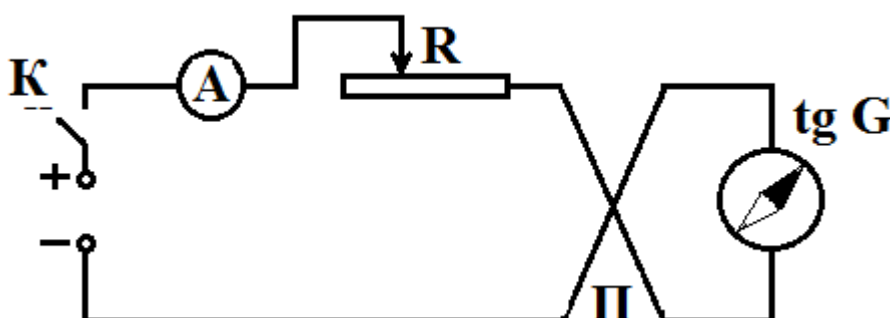
$$H_{\Gamma} = \frac{In}{2R \operatorname{tg} \varphi}. \quad (3)$$

Знаючи число n витків котушки, їх радіус R , вимірюючи амперметром величину струму I і за допомогою тангенс-гальванометра кут φ , користуючись робочою формулою (3), можна знайти H_{Γ} .

Можна поставити питання інакше. З формули (3) для величини струму отримаємо

$$I = \frac{2H_{\Gamma}R}{n} \operatorname{tg} \varphi. \quad (4)$$

Якщо відомі H_{Γ} , R і n , то, вимірюючи кут φ відхилення стрілки приладу, можна визначити величину струму. Тому прилад на початку розвитку фізики викорис-



товували для вимірювання сили струму, і він був названий *тангенс-гальванометром*.

Порядок виконання роботи.

Рис. 4.

1. Складіть електричне коло, з'єднавши послідовно тангенс - гальванометр, амперметр, реостат, джерело струму і перемикач (рис. 4). Розмістіть тангенс - гальванометр так, щоб площина витків його котушки збігалася з напрямком стрілки компаса, тобто з площиною магнітного меридіану. Магнітна стрілка вказує при цьому на Північ *N* і Південь *S* (на рис.5. стрілка компаса у відсутності струму в витках котушки зображена пунктиром).

2. Увімкніть випрямляч змінного струму ТВП тумблером ВКЛ. Поставте перемикач П в ліве або праве положення. Реостатом встановіть по амперметру

струм в колі 0,1 А. Відрахуйте кути φ_1 і φ_2 по обох кінцях стрілки (див. рис. 5)

3. Не змінюючи силу струму, змініть напрям струму на протилежний за допомогою перемикача П і знову відрахуйте кути φ_3 і φ_4 відхилення стрілки (рис. 5).

Таким способом виключається похибка, що виникає за рахунок можливого неспівпадіння осі стрілки з центром витків котушки, і похибка за рахунок неточної установки площини витків котушки тангенс - гальванометра в площині магнітного меридіану.

4. Повторіть вимірювання кутів відхилення стрілки $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ при інших, але великих значеннях сили струму (0,2 А, 0,3 А, 0,4 А, ...), виконавши не менше 5-ти вимірювань. Всі отримані дані досліду занесіть в таблицю.

5. Знайдіть середнє значення кутів φ для кожного значення струму за формулою:

$$\varphi = \frac{\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4}{4}.$$

6. За формулою (3) для кожної сили струму обчисліть $H_{Г}$. Число витків n і радіус R котушки вказані на приладі.

7. Визначте середнє значення $\langle H_{Г} \rangle$. Проведіть статистичну обробку результатів вимірювань за стандартною методикою (див. Додаток). Результат вимірювань напруженості запишіть в стандартному вигляді.

$R = 213 \text{ мм}$ $n = 10$

Таблиця

№ за/п	I А	φ_1 град	φ_2 град	φ_3 град	φ_4 град	φ град	$\text{tg } \varphi$	$H_{Гi}$ А/м	$\langle H_{Г} \rangle$ А/м	$\Delta H_{Гi}$	$\Delta H_{Г}$	$E \%$
1.												
2.												
3.												

Контрольні питання

1. Що називається магнітним меридіаном? Яка площину називається площиною магнітного меридіану?

2. Як встановлюється магнітна стрілка в магнітному полі Землі?

3. Чому поряд з магнітною індукцією B використовується напруженість H - допоміжна характеристика магнітного поля? В яких одиницях вимірюється напруженість магнітного поля в системі СІ?
4. Чому дорівнює і як спрямована напруженість магнітного поля в центрі кругового струму?
5. Для чого в цій роботі необхідно встановлювати круговий провідник в площині магнітного меридіану?
6. Чому вимірювання проводять при двох різних напрямках струму?

Рекомендована література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. - К.: Техніка, 2001. - Т.2.
2. Курс фізики (під редакцією Лопатинського І.Є.). – Львів. – ”Бескід Біт”. – 2002.
3. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф.. Курс фізики. У 2 кн.: Кн.1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.:«Либідь», 2001. – 448с.
4. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навч посібник у 7 частинах. Ч.3. Електрика та магнетизм. Д. НТУ «ДП» , 2018

Лабораторна робота 27.2

Вивчення електричних властивостей сегнетоелектриків

Мета роботи: використання отриманої на екрані осцилографа максимальної петлі гістерезиса сегнетоелектрика та окремих циклів для визначення: 1) залежності діелектричної проникності сегнетоелектрика від напруженості електричного поля E ; 2) коерцитивної сили E_c ; 3) залишкової індукції D ; 4) тангенса кута діелектричних втрат.

Прилади й приналежності: 1) касета ФПЕ-02; 2) джерело живлення; 3) електронний осцилограф.

Опис приладу та теоретичні відомості

Для опису електричного поля в діелектриках, крім основної характеристики поля – вектора напруженості електричного поля \vec{E} , використовують вектор електричного зміщення (вектор електростатичної індукції) \vec{D} . Він не є чисто польовим вектором, оскільки враховує поляризованість середовища. Зв'язок між ними можна зобразити залежністю

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E},$$

де ε – діелектрична проникність середовища.

Сегнетоелектрики – це кристали, які у визначеному температурному інтервалі спонтанно (самочинно, тобто при відсутності зовнішнього електричного поля) електрично поляризовані. Таку назву вони отримали по першій дослідженій речовині – сегнетовій солі.

Сегнетоелектрики мають деякі своєрідні особливості.

1. Діелектрична проникність сегнетоелектриків надзвичайно велика ($\epsilon \sim 10^4$), тоді як у більшості звичайних діелектриків діелектрична проникність складає кілька одиниць.

2. Діелектрична проникність сегнетоелектриків залежить від напруженості електричного поля.

3. Через те, що ϵ залежить від E , то D нелінійно залежить від E . Сегнетоелектрикам властивий сегнетоелектричний гістерезис (відставання, запізнення), який виникає при переорієнтації напрямку зовнішнього поля. Як видно з рис.1, зі збільшенням напруженості E зовнішнього електричного поля зміщення D зростає і досягає насичення (у точці A). Якщо потім напруженість зовнішнього поля зменшувати і довести до нуля, D , зменшуючись, досягне значення $D_{зал}$ (залишкове зміщення). І тільки при накладенні певного поля зворотного напрямку ($-E_k$) зміщення зникає повністю. Величину E_k називають коерцитивною силою. При подальшому збільшенні від'ємного значення E знову досягається насичення (точка M). Наступній зміні E відповідає ділянка MFA . Залежність D від E при замкненому циклі переорієнтації зовнішнього поля називають петлею гістерезису (крива $ABCMFA$). Пунктиром на рисунку показаний окремий цикл, коли насичення не досягається. Окремих циклів може бути безліч, при цьому максимальні значення D завжди знаходяться на основній кривій OA .

4. При підвищенні температури вище за певне значення T_k , характерне для кожного сегнетоелектрика, його сегнетоелектричні властивості зникають і він перетворюється у звичайний полярний діелектрик. Точку фазового переходу із стану сегнетоелектрика в стан полярного діелектрика називають точкою Кюрі, а відповідну їй температуру – температурою Кюрі T_k .

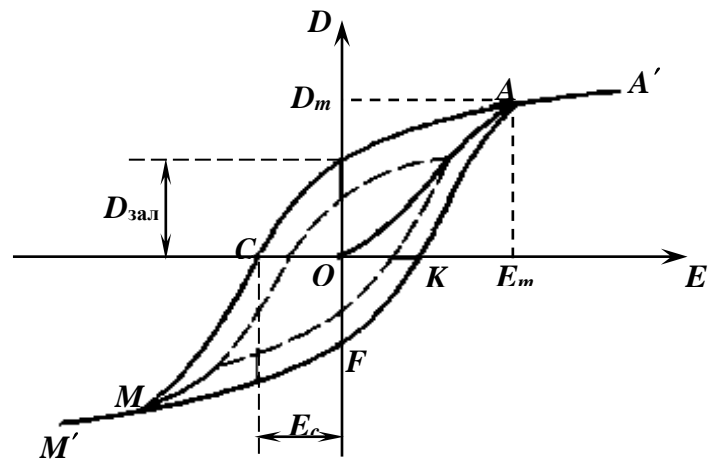


Рис. 1

Спонтанна поляризація є джерелом значних електричних полів. Тому, якщо макроскопічний об'єм сегнетоелектрика спонтанно є поляризованим у якомусь напрямку, то навколо цього об'єму виникає дуже значне електричне поле, з яким зв'язана велика енергія поля.

Такий стан - енергетично не вигідний. Система намагається перейти у такий стан, щоб з одного боку існувала спонтанна поляризація, а з іншого - енергія поля була б мінімальною. Це може здійснитися у результаті поділення об'єму сегнетоелектрика на малі області, у кожній з яких є спонтанна поляризація у деякому визначеному напрямку, неоднаковому для різних областей. Середня поляризованість об'єму, який складається з достатнього числа малих областей з різними напрямками спонтанної поляризації, дорівнює нулю, і тому напруженість зовнішнього електричного поля, яке створюється цим об'ємом, близька до нуля. Малі області зі спонтанною поляризацією називаються діелектричними доменами або просто доменами. Процес зміни поляризованості сегнетоелектрика у зовнішньому електричному полі полягає у переорієнта-

ції дипольних моментів окремих доменів, у зміні об'ємів і переміщенні границь між доменами.

Усі сегнетоелектрики, які знаходяться в електричному полі, що змінюється, мають діелектричні втрати. Такими втратами називають ту частину енергії змінного електричного поля, яка перетворюється в тепло. Діелектричні втрати в сегнетоелектриках зумовлені процесом переполяризації (переорієнтації доменів), тобто переходом кристала із стану, який характеризується точкою A (рис.1), в стан, який характеризується точкою M . Інакше кажучи, діелектричні втрати в сегнетоелектриках зумовлені гістерезисом. Втрати енергії змінного поля в сегнетоелектриках оцінюють тангенсом діелектричних втрат, тобто

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\omega_{\text{period}}}{\omega_{\text{max}}}, \quad (1)$$

де ω_{period} – втрати енергії змінного діелектричного поля на гістерезис в одиниці об'єму сегнетоелектрика за період;

ω_{max} – максимальна густина енергії електричного поля у кристалі сегнетоелектрика.

Об'ємна густина енергії електричного поля дорівнює:

$$\omega = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{ED}{2}. \quad (2)$$

При збільшенні напруженості поля на величину dE об'ємна густина енергії також зміниться на величину

$$d\omega = Ed(\varepsilon \varepsilon_0 E) = EdD. \quad (3)$$

За період зміни електричного поля втрата енергії складе

$$\omega = \oint EdD, \quad (4)$$

що чисельно збігається з площею петлі гістерезису в координатах X і Y .

Максимальна густина енергії електричного поля у кристалі

$$\omega_{\text{max}} = \frac{E_m D_m}{2}, \quad (5)$$

де E_m і D_m – максимальні значення напруженості електричного поля \vec{A} і вектора \vec{D} . З урахуванням формул (1), (4) і (5) для тангенса діелектричних втрат отримаємо такий вираз:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{2 \oint EdD}{E_m D_m} = 2 \frac{S_f}{x_m y_m}, \quad (6)$$

де S_f – площа петлі гістерезису в координатах X , Y ; x_m , y_m – координати вершин петлі гістерезису.

Щоб отримати петлю сегнетоелектричного гістерезису ($D = f(E)$) на екрані осцилографа, треба на вертикально відхиляючі пластини подати напругу U_y , пропорційну модулю вектора електричного зміщення (вектору індукції) \vec{D} ($U_y \sim D$), а на горизонтально відхиляючі – напругу U_x , пропорційну напруженості поля \vec{A} ($U_x \sim E$).

Принципова схема експериментальної установки наведена на рис.2.

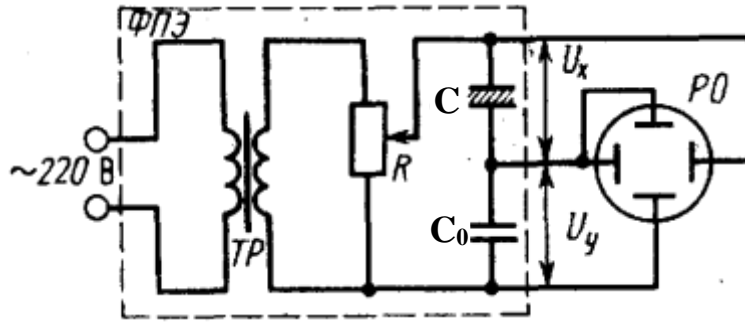


Рис.2

До двох послідовно з'єднаних конденсаторів C_0 і C приєднано джерело змінної напруги.

Між пластинами конденсатора C знаходиться досліджуваний сегнетоелектрик.

Індукція електростатичного поля (зміщення) D усередині сегнетоелектрика дорівнює поверхневій густині σ зарядів на пластинах конденсатора: $D = \sigma$.

Але $\sigma = \frac{q}{S}$, де S – площа пластин конденсатора C , q – заряд однієї з пластин

цього конденсатора. Тоді $D = \frac{q}{S}$. Оскільки конденсатори C і C_0 з'єднані послідовно,

то заряди їх однакові. Тому напруга на конденсаторі C_0

$$U_{C_0} = \frac{q}{C_0} = \frac{DS}{C_0}.$$

Напруга на конденсаторі C_0 , яка подається на вертикально відхиляючі пластини осцилографа, пропорційна вектору зміщення \vec{D} .

$$U_y = U_{C_0} = \frac{DS}{C_0}, \quad (7)$$

де $C_0 = 0,22 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$; $S = 1,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$.

Таким чином, напруга, яка подається на вхід «Y» осцилографа, пропорційна вектору електричного зміщення (вектору індукції) \vec{D} електричного поля.

Відхилення електронного променя по вертикалі пропорційне напрузі U_y , яка подається на вхід Y осцилографа.

$$y = \frac{U_y}{b_2}, \quad (8)$$

де b_2 – чутливість осцилографа по вертикальній осі.

Із співвідношення (7) і (8) отримаємо

$$D = \frac{C_0 b_2}{S} y. \quad (9)$$

Тепер переконаємося, що напруга, яка створюється конденсатором C , пропорційна напруженості поля E . У таких схемах вимірювань (рис.2) ємність конденсатора C значно менша ємності конденсатора C_0 . Через те що опір конденсатора змінному струму обернено пропорційний ємності ($R_c = \frac{1}{\omega \cdot C}$), то практично вся напруга, яка

знімається з дільника R , прикладена до конденсатора C з сегнетоелектриком. Ця напруга зв'язана з напруженістю поля E у сегнетоелектрику співвідношенням

$$U_x = E \cdot h, \quad (10)$$

де h – товщина сегнетоелектрика ($h = 3 \cdot 10^{-3}$ м).

Таким чином, на горизонтально відхиляючі пластини осцилографа подається напруга U_x , пропорційна напруженості зовнішнього електричного поля.

Якщо відома чутливість b_1 осцилографа по горизонтальній осі, то

$$U_x = b_1 x, \quad (11)$$

де x – відхилення електронного променя вздовж осі X ; $b_1 = 0,033$ В/см.

Із співвідношень (10) і (11) отримаємо

$$E = \frac{b_1}{h} x \quad (12)$$

Отже, у цій схемі на входи “X” і “Y” осцилографа одночасно подаються напруги $U_x \sim E$ і $U_y \sim D$. У результаті на екрані осцилографа спостерігається фігура Ліссажу, яка у даному разі і буде петлею гістерезису (рис.1).

Розглянемо основну криву поляризації – OA (рис.1), яка є геометричним місцем точок вершин кривих окремих циклів. Для кожної точки цієї кривої можна вважати, що величина зміщення $D = \varepsilon_0 \varepsilon E$. Тоді, визначивши величини D і E вершин окремих циклів, можна розрахувати відповідне значення діелектричної проникності сегнетоелектрика за формулою

$$\varepsilon = \frac{D}{\varepsilon_0 E} = \frac{h C_0 b_2 y}{\varepsilon_0 S b_1 x} \quad (13)$$

і отримати залежність $\varepsilon = f(E)$

Послідовність вимірювань

1. Складіть схему установки відповідно до маркування на касеті (рис. 3).
2. Приєднайте електронний осцилограф і джерело живлення до мережі.
3. Підготуйте електронний осцилограф до роботи у режимі спостереження фігур Ліссажу.
4. Подайте живлення на лабораторний стенд та прилади. Установіть світну точку в центр екрана осцилографа.

Завдання 1. Отримання кривої $\varepsilon = f(E)$

1. Переконайтеся, що при відсутності напруги на конденсаторах світна точка на екрані осцилографа знаходиться у центрі екрана.

2. Регулюючи потенціометром R на касеті напругу та підсилення сигналу по осі Y осцилографа, отримайте максимальну петлю гістерезису, яка буде відповідати максимальному стану насичення поляризації сегнетоелектрика. Розмір петлі гістерезису на екрані при цьому повинен у найбільшій мірі використовувувати площину екрану осцилографа.

3. Запишіть у таблицю координати x_m і y_m вершини петлі гістерезису (точка А).

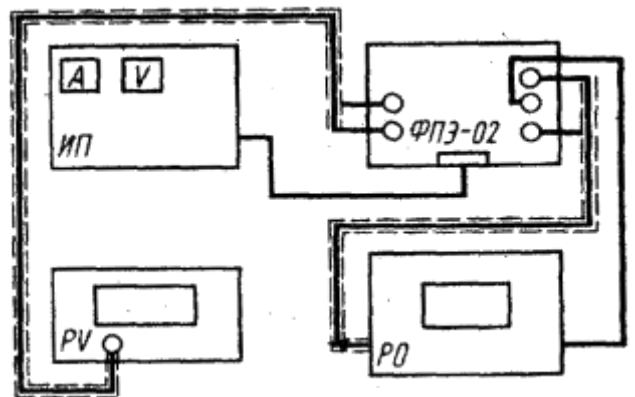


Рис. 3

4. Зменшуючи поворотом ручки потенціометра R на панелі касети напругу, отримайте ще 4 - 5 петель гістерезису. Занесіть у таблицю координати x і y їхніх вершин. У разі необхідності змініть чутливість осцилографа по вертикалі b_2 . При цьому треба врахувати, що величина b_2 прийме нове значення.

5. За формулами (12), (13) обчисліть значення ε і E та занесіть їх у таблицю.

№ петлі	x , см	y , см	b_2 , В/см	ε	E , В/м
1					
2					
3					
4					

Завдання 2. Визначення залишкової індукції $D_{зал}$ та коерцитивної сили E_c

1. Установіть на екрані максимальну петлю гістерезису.
2. Найдіть за допомогою координатної сітки екрана осцилографа координату $y_{зал}$, яка відповідає залишковій індукції, координату x_c , яка відповідає коерцитивній силі (з точністю до 0,1 поділки шкали екрана осцилографа).
3. За формулами (9) і (12) розрахуйте коерцитивну силу і залишкову індукцію.

Завдання 3. Визначення тангенса кута діелектричних втрат

1. Отримайте на екрані осцилографа максимальну петлю гістерезису.
2. Найдіть за допомогою координатної сітки екрана осцилографа координати x_m і y_m вершини цієї петлі.
3. Накресліть у координатах $y = f(x)$ петлю гістерезису, дотримуючись масштабу, визначте її площу.
4. Розрахуйте $tg\delta$ за формулою (6).

Контрольні питання

1. Що уявляє собою поляризація діелектриків?
2. Як пов'язана напруженість електричного поля в діелектрику з його діелектричною проникністю?
3. Які основні властивості сегнетоелектриків?
4. Що розуміють під діелектричними втратами?

Рекомендована література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Т.2. – К.: Техніка, 2001, - с. 92 – 98.

Лабораторна робота 27.3

Визначення питомого заряду електрона методом магнетрона

Мета роботи: 1) ознайомлення з методом створення взаємно перпендикулярних електричного і магнітного полів; 2) дослідження руху зарядженої частинки в схрещених електричному та магнітному полях; 3) експериментальне

визначення відношення заряду електрона до його маси (питомого заряду електрона).

Прилади й принадлежності: 1) касета ФПЕ-03; 2) джерело живлення; 3) міліамперметр.

Теоретичний вступ

Ідея досліду

Електрон – складова частина атомів, носій струму в металах, напівпровідниках, газах, фундаментальна частинка, носій найменшої маси і найменшого електричного заряду в природі. Заряд (e) і маса (m_e) електрона дорівнюють

$$e \approx -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}, m_e \approx 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}.$$

Задача досліду: визначити відношення e/m (питомий заряд електрона) та порівняти його з табличним.

Магнетрон називається електровакуумний прилад, який генерує електромагнітні хвилі у надвисокочастотному (НВЧ) діапазоні. У даній лабораторній роботі у магнетрона запозичений метод конфігурації схрещених магнітного та електричного полів.

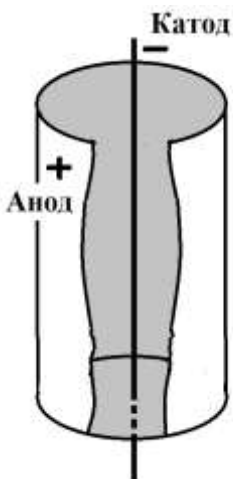


Рис. 1

Якщо в електронній лампі одному металевому електроду (наприклад, аноду, плюс «+») надати форму циліндра, а іншому електроду (катоду, мінус, «-») надати форму нитки, яка протягнута вздовж осі цього циліндра (рис.1), то можна створити радіальний потік електронів (рис.2).

Для цього металева нитка – катод - розжарюється допоміжним струмом, і з неї у вакуум починають вилітати електрони (явище так званої термоелектронної емісії). Другий електрод – анод – слугує для уловлювання електронів, що випускаються катодом. Анод, потенціал якого позитивний, притягує електрони тому, що їх заряд негативний (рис. 2, вид згори).

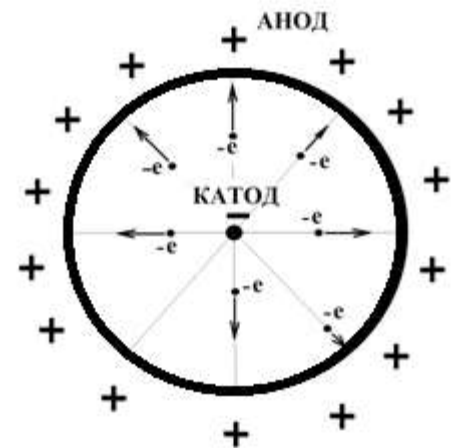


Рис.2.

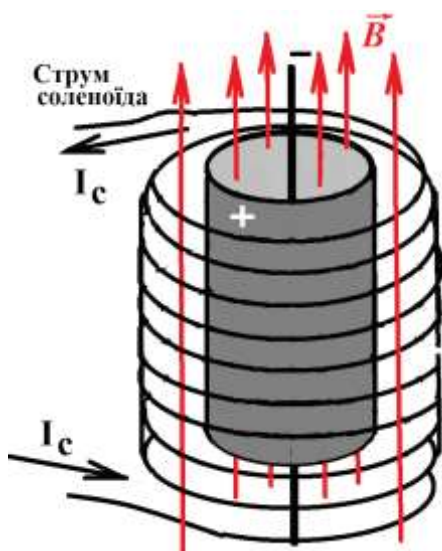


Рис. 3.

Далі в даному досліді додається ще одне поле – магнітне B .

Його спрямовують вздовж осі електронної лампи, наприклад, знизу догори (рис. 3). Таке магнітне поле можна отримати, якщо помістити електронну лампу всередині котушки зі струмом - соленоїда.

Таким чином здійснюється основна ідея магнетрона – магнітне і електричне поля взаємно перпендикулярні.

З боку магнітного поля на рухомі електрони починає діяти так звана магнітна сила $F_{\text{маг}}$,

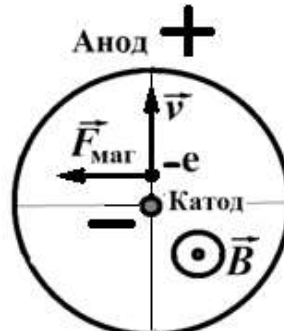
або сила Лоренца. Ця сила є перпендикулярною як до швидкості v електронів, так і до напрямку магнітного поля B (рис. 4).

На рис. 4 показаний переріз електронної лампи площиною, перпендикулярною до катода (вид згори). Кружечком з точкою в центрі позначене магнітне поле B , що напрямлене перпендикулярно від рисунку до нас.

Оскільки магнітна сила $F_{\text{магн}}$ є перпендикулярною до траєкторія електрона викривляється (рис. 5, б). Електрон попадає на електрод.

При деякому значенні магнітної індукції електрон пролітає біля внутрішньої торкаючись її, і повертається на катод.

Цей випадок називають критичним і його фіксують у досліді по зникненню струму від катода до анода. За допомогою відповідних розрахункових формул, в які входять критичні параметри, визначають відношення e/m .



швидкості електрона, еться анод по скривленій траєкторії магнітної індукції B електрон не досягає анода, майже

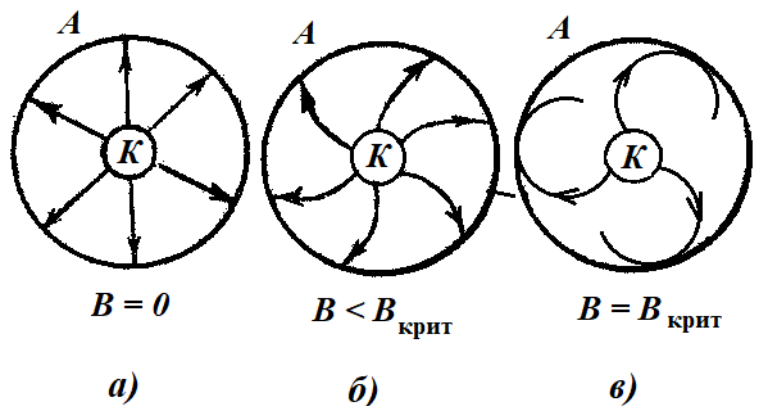


Рис.5.

Виведення робочої формули

Швидкість v емітованого з катода електрона можна визначити, дорівнюючи його кінетичну енергію роботі сил електричного поля, що діє в просторі між катодом і анодом

$$\frac{mv^2}{2} = eU \quad (1)$$

Тут m – маса електрона, e – заряд електрона, U_a – різниця потенціалів між анодом і катодом (анодна напруга).

Звідси швидкість, якої набувають електрони

$$v = \sqrt{\frac{2eU_a}{m}} \quad (2)$$

У відсутності магнітного поля електрони рухаються під дією електричного поля прямолінійно в радіальних напрямках (рис. 2). Потік електронів, що летять від катода до анода, називають анодним струмом I_a .

При вміщенні електронної лампи в магнітне поле B на рухомі електрони діє магнітна сила (її часто називають силою Лоренца), напрям якої є перпендикулярним до напрямку магнітної індукції B і напрямку швидкості електрона v (рис. 4), а значення якої визначається векторним добутком

$$F = e v \times B . \quad (3)$$

Ця перпендикулярна до швидкості сила надає електрону доцентрового прискорення.

$$a_{доц} = \frac{v^2}{r} .$$

За модулем магнітна сила у даному випадку становить

$$F = evB .$$

Згідно з другим законом Ньютона

$$evB = m(v^2/r) \quad (4)$$

Отже електрон буде рухатися в магнітному полі по колу, радіус якого з формули (4):

$$r = mv/(eB)$$

буде зменшуватися з ростом магнітної індукції B .

Виключаючи з рівнянь (2) і (4) швидкість v , отримаємо

$$\frac{e}{m} = \frac{2U_a}{B^2 r^2}$$

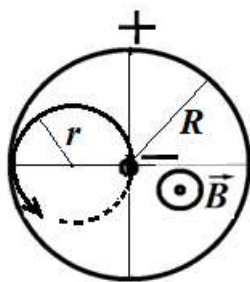
У критичному магнітному полі (рис. 6) електрон, як видно з рисунка, рухається по колу радіуса $r \approx R/2$, де R – радіус анода – циліндра (товщиною осьової нитки-катода можна нехтувати).

Тоді

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{крит}^2 R^2} .$$

Для соленоїда скінченної довжини магнітне поле розраховують за формулою

$$B = \frac{\mu_0 N I_{сол}}{\sqrt{D^2 + L^2}} ,$$



в)

$$B = B_{крит}$$

Рис. 6.

де $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала, N – кількість витків соленоїда, L – його довжина, D – діаметр, $I_{сол}$ –

струм в соленоїді.

Формула для розрахунку питомого заряду електрона набуває вигляду

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a (L^2 + D^2)}{R^2 \mu_0^2 I_{сол \cdot крит}^2 N^2} \quad (5)$$

або, для зручності,

$$\frac{e}{m} = k \frac{U_a}{I_{сол \cdot крит}^2} \quad (6)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, який визначається паспортними даними експериментальної установки. Для даної установки $k = 1,39 \cdot 10^{10}$ відповідних в системі СІ одиниць.

Отже, остаточно маємо робочу формулу

$$\frac{e}{m} = 1,39 \cdot 10^{10} \frac{U_a}{I_{\text{сол-крит}}^2} \quad (\text{Кл/кг}) \quad (7)$$

Тут анодну напругу U_a підставляють у вольтах, критичний струм соленоїда $I_{\text{сол-крит}}$ – в амперах.

Опис установки

Основна частина установки - електронна вакуумна лампа, яка розміщена всередині соленоїда, – тут називається модулем ФПЕ-03. Інші частини: джерело живлення і міліамперметр (цифровий мультиметр) (фото 1).

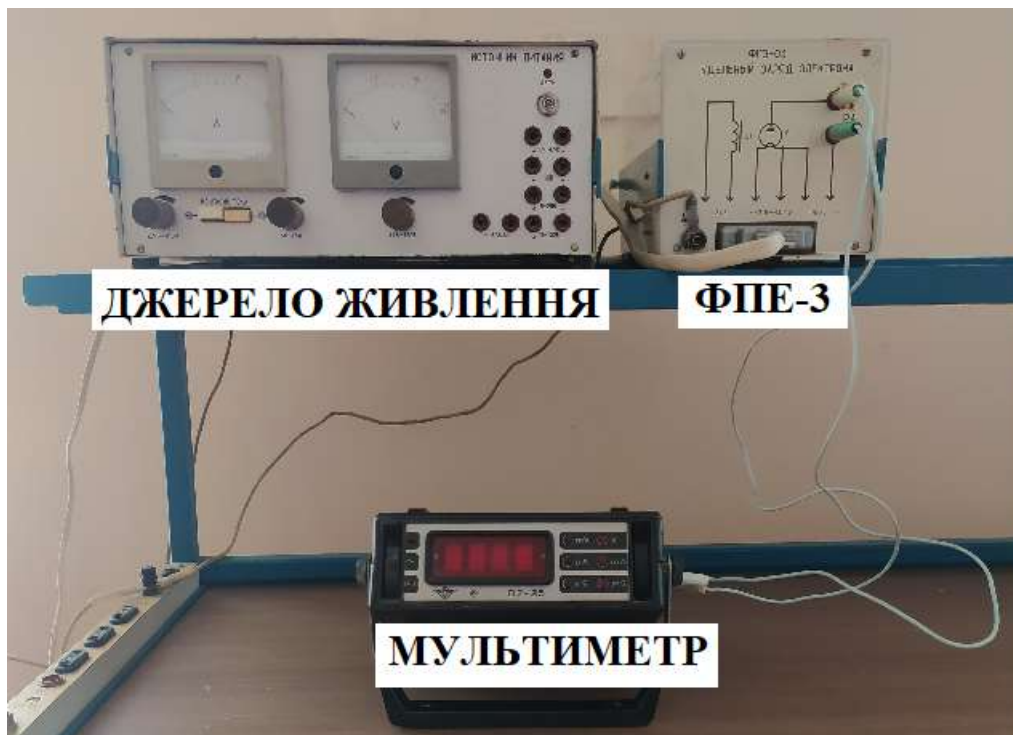


Фото 1.

Порядок виконання роботи

1. Зберіть установку, з'єднав гнізда на лицьовій панелі модуля ФП-03 з відповідними гніздами джерела живлення і міліамперметра (якщо установка вже не зібрана лаборантом).

Поверніть ручки регуляторів струму та напруги на панелі «ДжЖивл» до упору проти годинникової стрілки, увімкніть тумблер МЕРЕЖА.

Увімкніть тумблер МЕРЕЖА цифрового мультиметра, перемикачем «ВИД РОБОТИ» встановити режим вимірювання постійного струму "I =".

2. За допомогою вольтметра джерела живлення **установіть анодну напругу** $U_a = 50 \text{ В}$.

3. Обертанням ручки регулятора **струму соленоїда** джерела живлення **збільшуйте струм** $I_{\text{сол}}$, що проходить через соленоїд, від початкового 0,4 А до максимального значення 2,2 А через кожні 0,1 А.



Для кожного наступного значення струму соленоїда **зніміть показання** відповідної сили анодного струму **по цифровому мультиметру**. Результати вимірювань запишіть у Таблицю 1.

4. **Повторіть вимірювання** за пунктами 2 і 3 при значеннях $U_a = 40$ В і $U_a = 30$ В.

У кожній серії вимірювань анодна напруга залишається постійною,
 $U_a = \text{const}$.

Таблиця 1.

$U_a = 50$ В		$U_a = 40$ В		$U_a = 30$ В	
$I_{\text{сол}}$ (А)	I_a (мА)	$I_{\text{сол}}$ (А)	I_a (мА)	$I_{\text{сол}}$ (А)	I_a (мА)

5. Якщо вважати, що всі електрони покидають катод без початкової швидкості, то при $B < B_{\text{крит}}$ усі вони попадають на анод, а при $B > B_{\text{крит}}$ всі повертаються до катода, не досягнувши анода.

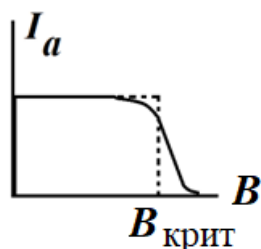


Рис. 7.

Це призводить до різкого зменшення анодного струму і його повного припинення при значеннях $B \geq B_{\text{крит}}$. Анодний струм змінювався б при цьому так, як вказано на рис. 7 штриховою лінією. Така залежність отримала назву «скидної».

В даному досліді графік залежності $I_a = f(B)$ анодного струму I_a від магнітної індукції B заміняється згідно з формулою (5) на залежність анодного струму I_a від сили струму через соленоїд $I_{\text{сол}}$:

$$I_a = f(I_{\text{сол}}).$$

Після того, як буде отримана залежність сили анодного струму I_a від сили струму $I_{\text{сол}}$ через соленоїд за даними таблиці 1 **побудуйте графіки залежності**

$$I_a = f(I_{\text{сол}}).$$

В реальності електрони випускаються розжареним катодом з різними початковими швидкостями. Тому для них критична умова настає при різних значеннях магнітної індукції B (в даному досліді при різних значеннях струму соленоїда $I_{\text{сол}}$). Отже, так звана «скидна» характеристика на відміну від ідеального випадку має менш круту падаючу частину (рис. 8).

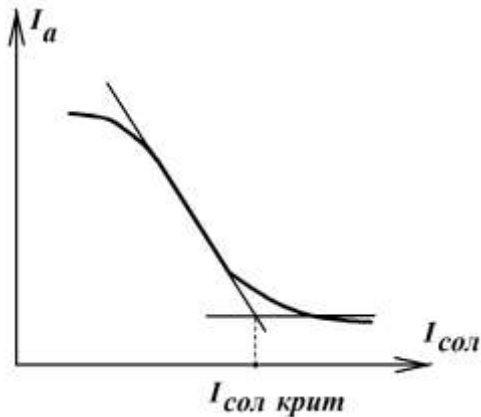


Рис. 8.

Один із способів визначення за цим графіком критичного струму соленоїда $I_{\text{сол крит}}$, який входить в розрахункову формулу (7), полягає в наступному.

Проводять дотичну до графіка на ділянці спаду і пряму лінію, яка співпадає з ділянкою мінімальних значень анодного струму (рис. 8) до їх взаємного перетину. Абсциса точки перетину визначає шукану $I_{\text{сол крит}}$.

За кожним з трьох побудованих графіків визначте критичний струм соленоїда та занесіть отримані значення $I_{\text{сол кр}}$ у таблицю 2.

Таблиця 2.

U_a (В)	$I_{\text{сол крит}}$ (А)	e/m
50		
40		
30		

6. Для кожної анодної напруги U_a та відповідного критичного значення струму $I_{\text{сол крит}}$, що протікає через соленоїд, за формулою (7) **розрахуйте питомий заряд електрона e/m** і занесіть його у Таблицю 2. .

7. Якщо дозволяє учбовий час, за стандартною процедурою (див. Додаток) проведіть **обробку результатів** вимірювання та визначте граничну похибку

$\Delta(e/m)$. Результат запишіть у вигляді

$$e/m = \langle e/m \rangle \pm \Delta(\langle e/m \rangle), \text{ (Кл/кг) при } \alpha =$$

Контрольні питання

1. У чому полягає метод магнетрона?
2. За яких умов виникає сила Лоренца? Яка величина і напрям сили Лоренца?
3. Чому при критичному значенні сили струму через соленоїд анодний струм припиняється?
4. Чому в залежності анодного струму від струму соленоїда відсутній різкий спад?
5. Однорідні електричне і магнітне поля напрямлені взаємно перпендикулярно. Напруженість електричного поля $E = 100$ кВ/м, магнітна індукція $B = 50$ мТл. Електрон влітає у схрещені поля і рухається прямолінійно. Якими мають бути напрям і модуль швидкості електрона?

Рекомендована література

1. Кучерук І. М., Горбачук І.Т.Луцик П.П. Загальний курс фізики. У 3 т. Т 2: Електрика і магнетизм. Навчальний посібник для студентів вищих технічних та педагогічних закладів освіти – К.; "Техніка", 2006, -452 с

2. Курс фізики (під редакцією Лопатинського І.Є).. – Львів. – "Бескід Біт". – 2002.

3. Бушок Г.Ф., Левандовський В.В., Півень Г.Ф.. Курс фізики. У 2 кн.: Кн.1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. – К.:«Либідь», 2001. – 448с

4. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 3. Електрика і магнетизм. [Електронне видання]: - Д. Національний гірничий університет, 2018. - 165 с. -

Лабораторна робота № 27.4

Дослідження магнітного поля соленоїда за допомогою датчика Холла

Мета роботи: ознайомитися з принципом роботи датчика Холла, дослідити розподіл магнітного поля всередині соленоїда

Прилади й принадлежності: касета ФПЕ – 04 з соленоїдом та датчиком Холла на штоку, джерело живлення, цифровий вольтметр.

Теоретичний вступ

Магнітне поле соленоїда. Соленоїд є ізольованим провідником, намотаним по гвинтовій лінії на циліндричний каркас. Слово «соленоїд» утворене поєднанням двох грецьких слів — solen (труба) та eidos (схожий). Тобто соленоїд - це котушка, що формою нагадує трубу (рис.1).

При подачі електричного струму через обмотку в порожнині соленоїда створюється магнітне поле.

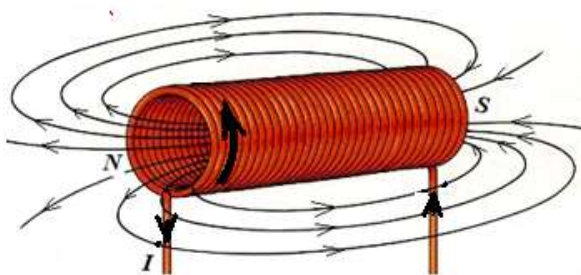


Рис.1

Лінії магнітного поля соленоїда показані на рис. 1 та рис. 2. У середині соленоїда напрямком ліній утворює з напрямком

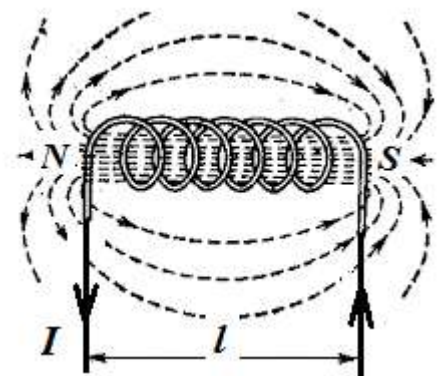


Рис. 2.

струму правогвинтову систему. Якщо довжина обмотки соленоїда значно більша за його діаметр, то соленоїд вважається нескінченно довгим. У середині нескінченного соленоїда магнітне поле однорідне, тобто. у всіх точках всередині соленоїда вектор \mathbf{B} індукції магнітного поля є постійним, спрямованим по осі соленоїда і має величину (див. [1], § 8.4)

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I = \mu_0 n I, \quad (1)$$

де N – число витків у соленоїді, l – довжина намотування соленоїда, n – число витків на одиницю довжини, I – сила струму у соленоїді, μ_0 – магнітна постійна, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Соленоїди **практично використовуються** в багатьох галузях діяльності людини. Наприклад, клапани двигунів, тягове реле стартера автомобіля, клапани гідравлічних систем, підйомні електромагніти, соленоїдні замки, детектори у Великому адронному колайдері в ЦЕРН, установки індукційного загартування та нагрівання та багато іншого.

Ефект Холла. Для знаходження магнітної індукції на осі соленоїда в установці використовується вимірювач магнітної індукції, принцип роботи якого заснований на ефекті Холла.

Ефект Холла полягає у наступному. Якщо пропускати струм I через прямокутну пластинку провідника або напівпровідника вздовж довжини пластинки, а перпендикулярно до площини пластинки прикласти магнітне поле \mathbf{B} , то на бокових сторонах пластинки виникає різниця потенціалів U_x (рис. 3).

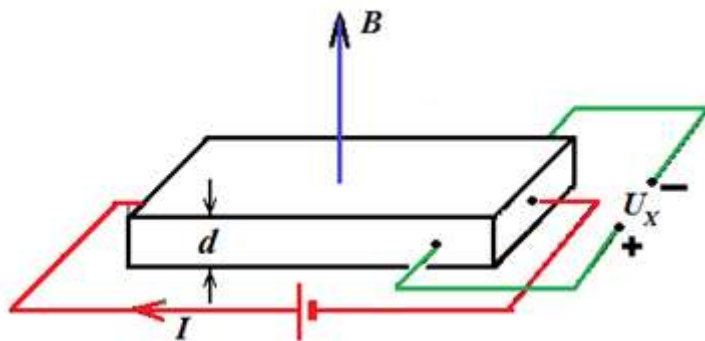


Рис. 3.

Перпендикулярно як вектору швидкості \mathbf{v} направлено руху, так і вектору магнітної індукції \mathbf{B} .

На рис. 4 показано напрям сили Лоренца, що діє на електрони провідності в напівпровіднику n -типу (з електронним типом провідності) або в металі, поміщеному в магнітне поле. Струм I вздовж пластинки проходить зліва направо, вектор магнітної індукції \mathbf{B} направлений вертикально вгору. Нагадаємо, що електрони, які мають негативний заряд, рухаються в бік протилежний струму. Скориставшись правилом векторного добутку і враховуючи негативний знак заряду електрона, з формули (2) визначаємо, що електрони відхиляються силою Лоренца на дальню грань пластинки. Внаслідок цього на ній виникає надлишок електронів, а на ближній – їх нестача. Дальня грань пластинки заряджається негативно, а ближня – позитивно, і поміж ними виникає електрична напруга U_x (названа також ЕРС Холла) (рис. 3).

Це явище пояснюється тим, що на рухомі носії струму с зарядом q (електрони провідності або дірки) в магнітному полі діє магнітна сила (сила Лоренца) F_L , величина і напрямок якої визначається векторним виразом

$$\mathbf{F}_L = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad (2)$$

Сила Лоренца відхиляє носії струму від початкового напрямку руху в напрямку, перпендикулярному як вектору швидкості \mathbf{v} направлено руху, так і вектору магнітної індукції \mathbf{B} .

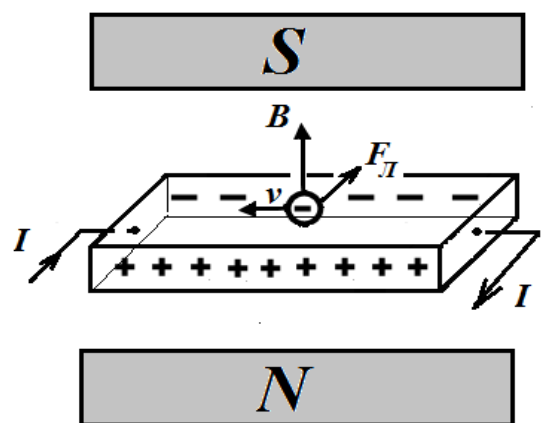


Рис. 4.

Можна показати (див., наприклад, [1, 2]), що ця холлівська напруга U_x розраховується за формулою

$$U_x = R_x \cdot \frac{I \cdot B}{d}. \quad (3)$$

Тут I – сила струму, B – модуль вектора магнітної індукції, d – товщина пластинки. Коефіцієнт пропорційності R_x називається **постійною Холла**. Вона має розмірність $[m^3/A \cdot c]$, залежить тільки від матеріалу провідника та є його характеристикою.

Класична теорія електропровідності дає такий вираз для постійної Холла.

$$R_x = \frac{1}{nq}, \quad (4)$$

(n – концентрація, тобто кількість носіїв струму в одиниці об'єму, q – їх заряд).

Для металів, у яких концентрація електронів $n \sim 10^{28} m^{-3}$, $R_x \sim 10^{-9} m^3/A \cdot c$, для напівпровідників $R_x \sim 10 m^3/A \cdot c$.

Вимірявши постійну Холла R_x , можна знайти концентрацію носіїв струму, а визначивши її знак можна судити про природу провідності даного напівпровідника або металу. Якщо виявиться, що $R_x < 0$, це означатиме, що провідність здійснюється електронами, якщо $R_x > 0$ – дірками.

На основі ефекту Холла працюють **датчики Холла – прилади**, що дозволяють прямо і точно **вимірювати магнітну індукцію поля**, а також виконують інші завдання автоматики.

Як же визначити постійну Холла R_x для речовини датчика, що використовується?

З формули (3) випливає, що

$$R_x = \frac{d}{B} \cdot \frac{U_x}{I} \quad (5)$$

У правій частині рівняння (5) стоять чотири величини. Змінюючи струм I (**за приладом**) в обмотці соленоїда, тобто, змінюючи цим величину магнітного поля, можна визначити (**за приладом**) відповідне значення холлівської напруги U_x . Товщина датчика d також **може бути вимірною** безпосередньо. А от недостатню **четверту величину B формулі (5) розраховують**, користуючись тим, що датчик поміщений в центр соленоїда, в якому значення магнітної індукції дорівнює $B = \mu_0 n I$.

Тоді формула для розрахунку R_x набуває вигляду

$$R_x = \frac{U_x d}{\mu_0 n I^2} \quad (5a)$$

Що дає знання знайденої постійної Холла R_x датчика?

Визначимо з формули (3) індукцію магнітного поля:

$$B = \frac{U_x d}{I R_x}. \quad (6)$$

Тепер можна, вимірявши датчиком у будь-якій точці магнітного поля напругу U_x при заданій силі струму в обмотці соленоїда I і відомій постійній R_x , визначити магнітну індукцію B цієї точці.

Методика експерименту та експериментальна установка

Таким чином, мета роботи - вивчення магнітного поля всередині соленоїда зі струмом - буде досягнута після виконання двох експериментів:

- визначення постійної Холла R_H для даного датчика (тарування датчика Холла);



Рис. 5.

- вимірювання за допомогою датчика Холла магнітної індукції у різних точках на осі соленоїда кінцевої довжини.

Досліджуваний соленоїд закріплений у пластмасовій коробці (рис. 5). Від джерела живлення (див. фото) на соленоїд подається струм, силу якого можна змінювати. Струм у соленоїді фіксується амперметром джерела живлення (див. фото). Вздовж осі соленоїда переміщується шток, на кінці якого міститься вимірювач магнітної індукції – датчик Холла. На штоку через 1 см нанесені поділки, за допомогою яких ведеться відлік переміщення датчика Холла вздовж осі соленоїда. У датчику виникає напруга U_H , яка пропорційна магнітній індукції поля і вимірюється цифровим вольтметром.

Параметри соленоїда: число витків $N = 2700$, довжина $l = 15$ см, число витків на одиницю довжини $n = 1,8 \cdot 10^4$ 1/м.

Товщина датчика $d=0,2$ мм.

Порядок виконання роботи.

Завдання 1. Визначення постійної Холла R_H .



Фото

1. Помістити датчик Холла у центр соленоїда. Для цього висунути шток з датчиком у положення «0» за шкалою штока.
2. Повернути ручки регуляторів струму та напруги на панелі «ДЖЖивл» до упору проти годинникової стрілки, увімкнути тумблер МЕРЕЖА.
3. Увімкнути тумблер МЕРЕЖА цифрового вольтметра, перемикачем «ВИД РОБОТИ» встановити режим вимірювання постійної напруги "U=".
4. Встановити за допомогою джерела живлення силу струму в соленоїді 0,5 А та виміряти ЕРС Холла у центрі соленоїда. Дані занести до табл. 1.
5. Збільшуючи силу струму в

соленоїді через 0,5 А до максимального, провести вимірювання U_H .

6. Обчислити за формулою $R_x = \frac{U_x d}{\mu_0 n I^2}$ постійну Холла для кожного виміру. Дані занести таблицю 1. Знайти середнє значення $\langle R_x \rangle$.

Таблиця 1.

N за/п	Струм соленоїда I, A	ЕРС датчика Холла, U_x, B	Постійна Холла $R_x, m^3/A \cdot c.$ за формулою (5a)	$\langle R_x \rangle$
1	0,5			
2	1,0			
3	1,5			
4	2,0			

Завдання 2. Дослідження залежності індукції магнітного поля соленоїда в різних точках на його осі від координати Z , що відраховується від середньої точки.

1. Встановити величину струму I в котушці соленоїда за вказівкою викладача.
2. Переміщуючи шток з датчиком Холла вздовж осі соленоїда з інтервалом 1 см, виміряти U_x у різних точках його осі. Отримані дані занести в таблицю 2.
3. Обчислити індукцію поля для кожного положення датчика Холла за формулою

$$B = \frac{U_x d}{I R_x}$$

При розрахунку використовувати значення $\langle R_x \rangle$, отримане в завданні 1. Отримані результати занести в таблицю 2.

Таблиця 2. Сила струму $I = XX A$ задається викладачем та залишається сталою.
 $\langle R_x \rangle =$ див. завдання 1.

Положення датчика Z, cm	ЕРС датчика Холла, U_x, B	Магнітна індукція $B,$ Тл
-10		
-9		
-8		
-7		
-6		
-5		
-4		
-3		
-2		
-1		
0		
+1		
+2		
+3		
+4		

4. За даними таблиці 2, побудувати графік залежності $B = f(Z)$
5. За наявності навчального часу повторити вимірювання та розрахунки для нового значення сили струму в соленоїді (за завданням викладача).

Контрольні питання

1. Чому індукція магнітного поля є силовою характеристикою магнітного поля? Написати вираз для магнітної сили, що діє на заряджену частинку.
2. Описати магнітне поле ідеального нескінченного соленоїда.
3. Описати магнітне поле кінцевого соленоїда. Описати відмінності магнітного поля кінцевого соленоїда від магнітного поля ідеального нескінченного соленоїда. У якій області простору магнітне поле кінцевого соленоїда найбільш близько до магнітного поля відповідного ідеального нескінченного соленоїда?
4. Що таке ефект Холла?
5. У яких речовинах – металах чи напівпровідниках – ЕРС Холла більше? Чому?
6. Як влаштований датчик Холла? На яких засадах ґрунтуються методи вимірювання індукції магнітного поля?

Рекомендована література

1. Кучерук І.М. та ін. Загальний курс фізики. У 3 т. 2-ге вид., випр.. – К.: Техніка, 2006. Т.2. Електрика і магнетизм.
2. Загальна фізика. Лабораторний практикум.:Навч. Посібник / В. М. Барановський, П. В. Бережний, І. Т. Горбачук та ін.:За заг. ред. І.Т. Горбачука. - К.: Вища шк. 1992 – 509 с.
3. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 3. Електрика і магнетизм. [Електронне видання]: - Д. Національний гірничий університет, 2018. - 165 с.

Правила техніки безпеки. При включеному джерелі струму змінювати схему не можна. Джерело струму включаються в останню чергу після складання схеми і відключаються перед її розбиранням. До включення джерела та перед його вимиканням регулятори величини вихідного струму повинні бути встановлені на нуль (**вщент проти годинникової стрілки**).

Лабораторна робота 27.5

Дослідження явища взаємної індукції

Мета роботи: вимірювання взаємної індуктивності двох співвісних катушок на різних відстанях між їх центрами при різних частотах та напругах джерела живлення.

Прилади й принадлежности: 1) касета ФПЕ-05; 2) генератор електромагнітних коливань звукової частоти; 3) електронний осцилограф.

Опис приладу та теоретичні відомості

Якщо потік магнітної індукції через контур змінюється за часом, то відповідно до закону електромагнітної індукції Фарадея у контурі виникає ЕРС індукції

$$\varepsilon = -\frac{\partial \Phi}{\partial t}, \quad (1)$$

де

$$\Phi = \int_s \vec{B} d\vec{S}. \quad (2)$$

Знак “-” у формулі (1) означає: індукційний струм завжди має такий напрямок, при якому він перешкоджає причині, що його викликає (правило Ленца).

Розглянемо два контури 1 і 2, які розташовані на деякій відстані один від одного (рис. 1).

Якщо по контуру 1 пропустити струм I_1 , то він створить потік магнітної індукції через контур 2:

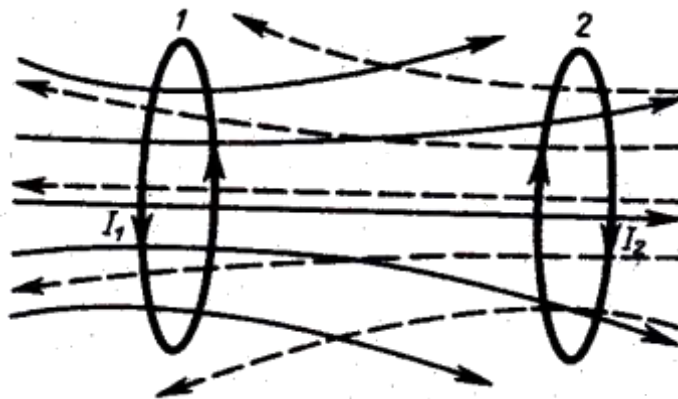
$$\Phi_{21} = M_{21} I_1. \quad (3)$$


Рис. 1

Коефіцієнт пропорційності M_{21} називають коефіцієнтом взаємної індукції контурів. Він залежить від форми та взаємного розміщення контурів 1 і 2, а також від магнітних властивостей оточуючого середовища.

При змінюванні сили струму у першому контурі магнітний потік, проходячи через другий контур, змінюється, отже, в ньому наводиться ЕРС взаємної індукції

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -M_{21} \frac{dI_1}{dt}. \quad (4)$$

У формулі (4) на відміну від виразу (1) стоїть повна похідна за часом, оскільки контури 1 і 2 закріплені жорстко і ε_2 залежить тільки від змінювання сили струму в контурі 1. Формула (4) справедлива у разі відсутності феромагнетиків.

Якщо поміняти місцями контури 1 і 2 та повторити попередні дії, то будемо мати

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -M_{21} \frac{dI_1}{dt}.$$

Можна показати, що коефіцієнти взаємної індукції однакові:

$$M_{21} = M_{12}. \quad (5)$$

У цій роботі визначають взаємну індукцію (взаємну індуктивність) двох котушок (довгої котушки L_1 і короткої котушки L_2 , яку надівають на котушку L_1 і яку можна переміщувати вздовж осі довгої котушки). Схема установки зображена на

рис. 2. Живлення однієї з котушок здійснюється від генератора звукової частота PQ, напруга

$$U = U_0 \cos \omega t, \quad (6)$$

з якого подається через резистор, що має опір R .

Вольтметр, розташований на панелі PQ, вимірює діючу напругу $U_d = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$.

Опір вибирають таким, щоб виконувалася нерівність

$$R \gg \sqrt{R_1^2 + L_1^2 \omega^2},$$

де L_1 – індуктивність котушки L_1 , R_1 – її активний опір. У цьому випадку силу струму, який тече через котушку L_1 , можна визначити за формулою

$$I_1 = \frac{U}{R} = \frac{U_0}{R} \cos \omega t = I_{01} \cos \omega t. \quad (7)$$

Змінний струм I_1 створює ЕРС індукції у котушці L_2

$$\varepsilon_2 = -M_{21} \frac{dI_1}{dt} = M_{21} \frac{U_0}{R} \omega \sin \omega t. \quad (8)$$

Для виміру ε_2 у роботі використовують осцилограф. Амплітуда ЕРС індукції

$$\varepsilon_{02} = M_{21} \frac{U_0}{R} \omega = M_{21} \frac{U_0}{R} 2\pi \nu, \quad (9)$$

де ν – частота звукового генератора.

З формули (9) маємо
$$M_{21} = \frac{\varepsilon_{02} R}{2\pi \nu U_0}. \quad (10)$$

Якщо поміняти місцями котушки L_1 і L_2 , то можна визначити

$$M_{12} = \frac{\varepsilon_{01} R}{2\pi \nu U_0}. \quad (11)$$

Замість перестановки котушок у макеті використано просту схему перемикачів: перемикачі Π_1 і Π_2 треба перевести у протилежне положення.

Послідовність вимірювання

Зберіть установку, яка складається із звукового генератора PQ, касети ФПЕ-05 з двома співвісно розташованими котушками L_1 і L_2 , штока та електронного осцилографа (рис. 2).

Підготуйте осцилограф і звуковий генератор до роботи, увімкніть їх в мережу.

Завдання 1. Вимірювання взаємних індуктивностей M_{21} і M_{12} та дослідження їхньої залежності від взаємного розміщення котушок

1. Напругу сигналу від звукового генератора PQ установіть в діапазоні 1 - 4 В, а частоту – в межах

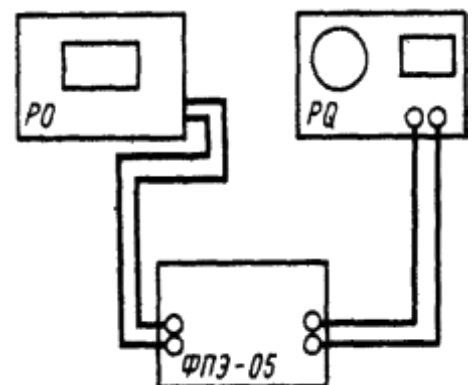


Рис.2

3 - 20 кГц.

2. За допомогою перемикачів P_1 і P_2 напругу подайте на котушку L_1 , а ЕРС з котушки L_2 на осцилограф.

3. Установіть пересувну котушку L_1 у крайнє положення. Переміщуючи її у протилежнє крайнє положення, через кожен сантиметр записуйте значення ЕРС магнітної індукції у колі котушки L_2 .

4. За формулою (10) розрахуйте величину M_{21} . Результати вимірювань і розрахунків занесіть у табл. 1.

Таблиця 1

Z, см	ε_{02} , В	M_{21} , Гн	Z, см	ε_{01} , В	M_{12} , Гн

$$U_{\text{д}} = \quad \nu = \quad R = 10^4 \text{ Ом}$$

5. Поміняйте місцями котушки L_1 і L_2 (за допомогою перемикачів P_1 і P_2) та повторіть вимірювання за п.п. 1 – 4.

6. Побудуйте графіки залежностей M_{21} і M_{12} як функції координати Z (Z – відстань між центрами котушок L_1 і L_2).

Завдання 2. Визначення величини M_{21} для різних напруг живлення

1 Установіть. котушку L_1 у середнє положення відносно котушки L_2 .

2. Установіть частоту звукового генератора за вказівкою викладача (наприклад, 10^4 Гц).

3. Змініть напругу $U_{\text{д}}$; у колі котушки L_1 зніміть залежність амплітуди ЕРС магнітної індукції від $U_{\text{д}}$: $\varepsilon_{02} = f(U_{\text{д}})$. Вимірювання виконуйте в інтервалі

0 – 5 В через 0,5 В.

4. За формулою (10) розрахуйте величину M_{21} . Дані вимірювань та обчислень занесіть у табл. 2.

Таблиця 2

$U_{\text{о}}$, В	
ε_{02} , В	
M_{21} , Гн	

$$\nu = \quad R = 10^4 \text{ Ом}$$

5. За даними табл. 2 знайдіть середнє значення M_{21} .

Завдання 3. Визначення величини M_{21} для різних частот генератора

1. Установіть котушку L_1 у середнє положення відносно котушки L_2 .

2. Установіть амплітуду напруги генератора за вказівкою викладача.

3. Змінюючи частоту генератора від 5 до 20 кГц (не менш 10 значень) зніміть залежність амплітуди ЕРС індукції ε_{02} від частоти напруги генератора.

4. За формулою (10) розрахуйте величину M_{21} . Дані вимірювань та обчислень запишіть у табл. 3.

Таблиця 3

ν , кГц	
ε_{02} , В	
M_{21} , Гн	

$$U_{д=} \quad R = 10^4 \text{ Ом}$$

5. За даними табл. 3 знайдіть середнє значення M_{21} .

Контрольні питання

1. Сформулюйте закон електромагнітної індукції і правило Ленца.
2. У чому полягає явище взаємної індукції? Від чого залежить взаємна індуктивність?
3. На замкнене залізне осердя, магнітна проникненість якого μ , намотані дві котушки, які мають число витків N_1 і N_2 . Вивести формулу для взаємної індуктивності, якщо довжина осердя ℓ , а площа перерізу S .

Рекомендована література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Т.2. – К.: Техніка, 2001, - с. 357 – 359.

Лабораторна робота № .27.6

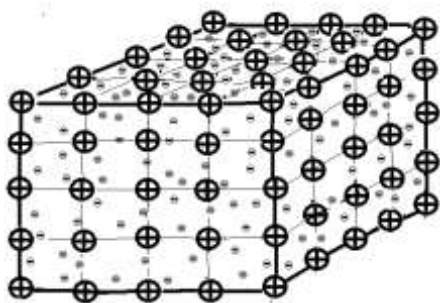
Вивчення явища термоелектронної емісії

Мета роботи: 1) дослідження явища термоелектронної емісії; 2) визначення роботи виходу електрона з вольфраму шляхом обробки вольт-амперних характеристик електронної лампи з вольфрамовим катодом.

Прилади й принадлежності: 1) касета ФПЕ-06; 2) джерело живлення; 3) цифровий міліамперметр; 4) вольтметр.

Теоретичний вступ

Метали в твердому стані мають кристалічну будову. При утворенні металевого кристалу частина валентних електронів відривається від своїх атомів. Електрони, як заведено говорити, узагальнюються, вони не належать тепер жодному конкретному іону металу і можуть вільно переміщатися під дією зовнішнього електричного поля, утворюючи електричний струм.



Метал можна уявити собі у вигляді остова з позитивних іонів, який занурений в «електронний газ» негативних електронів провідності (рис. 1). У кожному кубічному сантиметрі металу міститься приблизно 10^{22} вільних електронів.

Рис. 1.

Які сили перешкоджають виходу електронів з металу?.

1). За рахунок енергії теплового руху окремі електрони можуть відірватися від поверхні металу і віддалитися на малі відстані. Тому над поверхнею утворюється, як заведено говорити, тонка **електронна хмара**. Але вихід електронів з нейтрального металу призводить до того, що метал заряджається позитивно, і тоді з'являються сили, що притягують електрони у зворотному напрямі. Тоді, хмара буде перебувати в стані динамічної рівноваги, при якій одні електрони будуть виходити з металу, а інші повертаються назад.

В такому випадку метал і хмара в цілому утворюють ніби то заряджений конденсатор (точніше, у приповерхневій області утворюється подвійний електричний шар), в якому роль позитивно зарядженої пластини буде виконувати метал, а негативно зарядженої пластини – електронна хмара, між ними буде існувати поле. Таким чином, для видалення електрона з металу за межі подвійного шару необхідно виконати роботу з переміщення електрона в електростатичному полі.

2). Будь-який заряд, що перебуває поблизу поверхні незарядженого металу, індукує на цій поверхні заряд, який рівний за величиною, але протилежний за знаком (явище електростатичної індукції). Цей **індукований заряд** буде притягувати до себе заряд, що визвав індукцію. Тому при віддаленні електрона за межі металу необхідно враховувати також і роботу цих сил

Обидва ці фізичні процеси і визначають величину роботи виходу електрона з металу.

*Найменша енергія, потрібна для видалення електрона з твердого або рідкого тіла у вакуум, називається **роботою виходу**.*

Випускання електронів нагрітими твердими або рідкими тілами називається **термоелектронною емісією**.

При кімнатній температурі практично всі вільні електрони замкнуті в межах металевого зразка, є лише невелика кількість електронів, енергія яких достатня для того, щоб вийти з металу.

Однак, нагріваючи метал, можна надати електронам додаткову енергію, достатню для здійснення роботи виходу. При цьому електрони будуть покидати метал.

Для спостереження та вивчення термоелектронної емісії слугує двохелектродна вакуумна лампа — вакуумний діод (рис. 2).



Рис. 2.

У найпростішому вигляді вакуумний діод являє собою скляний балон, всередині якого поміщені анод і катод. Один з електродів (катод) являє собою дріт із тугоплавкого металу (вольфрам W, молібден Мо тощо), який розжарюється електричним струмом. Другий електрод – анод - найчастіше має форму циліндра, уздовж осі якого розміщено катод (рис. 3).

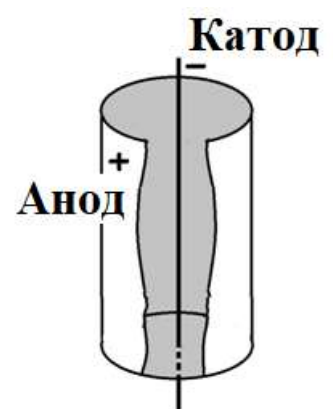


Рис. 3.

Якщо увімкнути діод в електричне коло при холод-

ному катоді (рис. 4), струму в колі анода не буде, тому що розріджений газ у середині діода (вакуум) не містить заряджених частинок.

У разі нагрівання катода до високої температури за допомогою додаткового джерела струму E_k (рис. 4) в колі анода виникає струм.

Відбувається напрямлений рух електронів від катода до анода, тобто електронний струм у вакуумі (рис.2).

Якщо збільшувати напругу між катодом і анодом при постійній температурі розжарювання катода, то сила термоелектронного струму спочатку також буде збільшуватись (рис. 5). Але при наступному збільшенні анодної напруги сила струму досягає деякого максимального значення, яка називається **струмом насичення**.

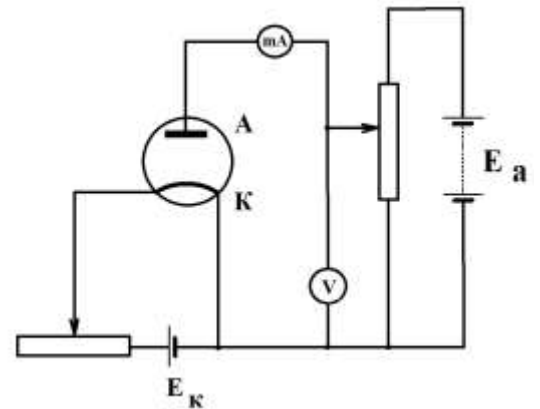


Рис. 4.

На рис. 5 зображені струми насичення вакуумного діода для різних температур розжарювання катода ($T_1 < T_2 < T_3$). При струмі насичення всі електрони, які вилітають за одиницю часу з катода, досягають анода і

Така залежність струму від напруги називається **вольт-амперною характеристикою** діода. Вона має нелінійний характер, тобто закон Ома для вакуумного діода не виконується.

О. Річардсон і С. Дешман вивели вираз для густини струму насичення у функції температури T :

$$j_n = BT^2 e^{-A/(kT)} \dots\dots\dots(1)$$

де A - робота виходу електрона з металу, k – стала Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, B – емісійна стала, різна для різних металів. Співвідношення (1) називають **формулою Річардсона – Дешмана**.

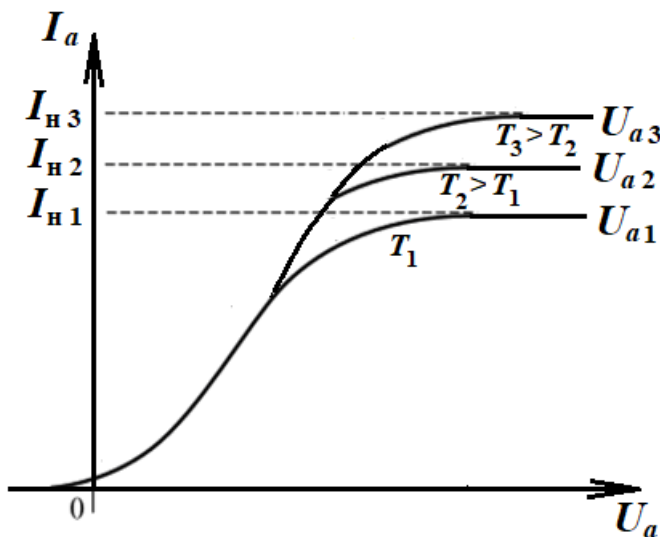


Рис. 5.

Оскільки у формулу (1) входять невідомі A і B (постійні для даного приладу), то для обчислення роботи виходу A можна виміряти струм насичення ($I_{нас} = j_{нас} \cdot S$, де S - площа катода) при двох різних температурах катода T_1 і T_2 .

$$I_{нас1} = BST_1^2 e^{-\frac{A}{kT_1}} \quad (2)$$

$$I_{нас2} = BST_2^2 e^{-\frac{A}{kT_2}} \quad (3)$$

З цієї системи двох рівнянь визначається робота виходу

$$A = \frac{kT_1T_2}{T_2 - T_1} \left(\ln \frac{I_{нас2}}{I_{нас1}} - 2 \ln \frac{T_2}{T_1} \right). \quad (4)$$

У **робочій формулі** (4) струми насичення $I_{нас1}$ та $I_{нас2}$ знаходяться на досліді, а відповідні температури катода T_1 і T_2 визначають таким чином.

Для вольфраму була експериментально визначена залежність температури T катода від потужності струму розжарення катода

$$P_{розж} = I_{розж} \cdot U_{розж},$$

яка припадає на одиницю площі S поверхні катода.

Такий експериментальний графік приведений в даній роботі. Потужність, що витрачається на розігрів катода, визначається за показами амперметра і вольтметра кола розжарення.

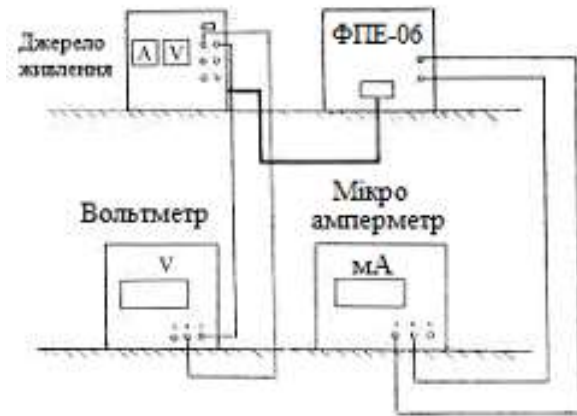
За наведеним експериментальним графіком (рис. 6) залежності температури катода від потужності струму розжарювання, яка припадає на одиницю площі катода, $P_{розж}/S$, визначають температуру катода для відповідного значення потужності нагріву. Площа поверхні катода S відома з паспортних даних установки.

Опис приладів

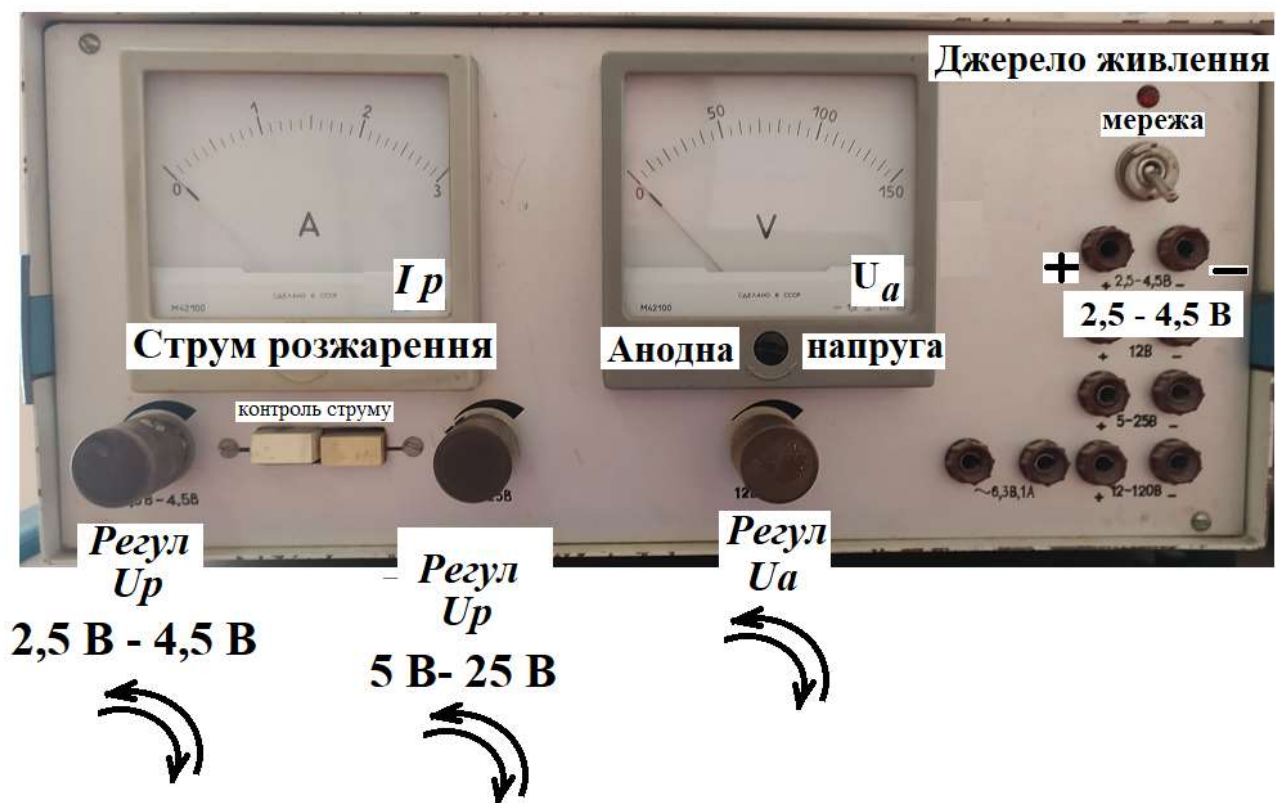
Загальний вигляд експериментальної установки показаний на рис. 7.



Рис. 7.



Докладніше прилади показані на окремих рисунках.



По-



рядок виконання роботи

1. З'єднати касету ФПЕ-06 з джерелом живлення під'єднувальним кабелем (рис. 7).

Коло розжарювання катода

Амперметр на панелі джерела живлення служить для контролю струму розжарювання I_p . Струм розжарювання не повинен бути більшим за певне значення, бо згорає катод. Максимальне значення струму розжарення не повинно перевищувати 2,2 А.

Регулювання напруги розжарення U_p здійснюється через лівий регулятор, що міститься під амперметром. Напруга розжарення U_p вимірюється **окремим вольтметром**, який під'єднується (див. рис. 7) до тих клем на панелі джерела живлення, на яких вказана напруга 2,5...4,5 В.

2. Натиснути ліву клавішу "контроль струму". Рукояткою «Регул U_p » 2,5 - 4,5В встановити по окремому вольтметру внизу дослідної установки напругу розжарення $U_p = 3,5$ В, одночасно при цьому треба дивитися на амперметр, щоб не спалити нитку розжарення (амперметр повинен показувати струм розжарення

I розж менше ніж 2,2 А.)

Анодне коло

Вольтметр на панелі джерела струму вимірює анодну напругу U_a , яка регулюється за допомогою ручки регулятора «Регул U_a », що знаходяться безпосередньо під вольтметром.

Для вимірювання сили анодного струму використовується мультиметр, який підімкнутий до клем mA касети ФПЕ-06. Перемикачем на мультиметрі встановлюють режим міліамперметра, вимірюючи струм до 20 мА.

Вимірювання вольт-амперної характеристики

3. Збільшуючи регулятором під вольтметром на джерелі живлення анодну напругу U_a в інтервалі 10-120 В з кроком 10 В, щоразу фіксують значення анодного струму I_a (по мультиметру), тобто знімають вольт-амперну характеристику (ВАХ) електронної лампи.

Вимірювання анодного струму і анодної напруги проводять доти, доки не буде досягнуто насичення струму, тобто коли анодний струм припинить практично рости. Значення анодного струму і анодної напруги заносять до Таблиці 1.

Таблиця 1.

N	$U_{розж}$, В	$I_{розж}$ А	U_a , В											
			10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
			I_a , мА											
1	3,5													
2	4													
3	4,5													

4. Зробити виміри вольт-амперної характеристики ще для двох значень напруги розжарення $U_{розж}$ 4 В і 4.5 В.

5. Для кожного значення напруги розжарення $U_{розж}$ побудувати ВАХ і визначити струм насичення $I_{нас}$. Дані вимірювання занести в Таблицю 2.

Вимірювання температури катода

6. Для всіх значень напруги $U_{розж}$ розжарення катода за даними дослідів у таблиці 2 розрахувати потужність розжарення $P_{розж}$, що виділяється на катоді

$$P_{розж} = I_{розж} \cdot U_{розж},$$

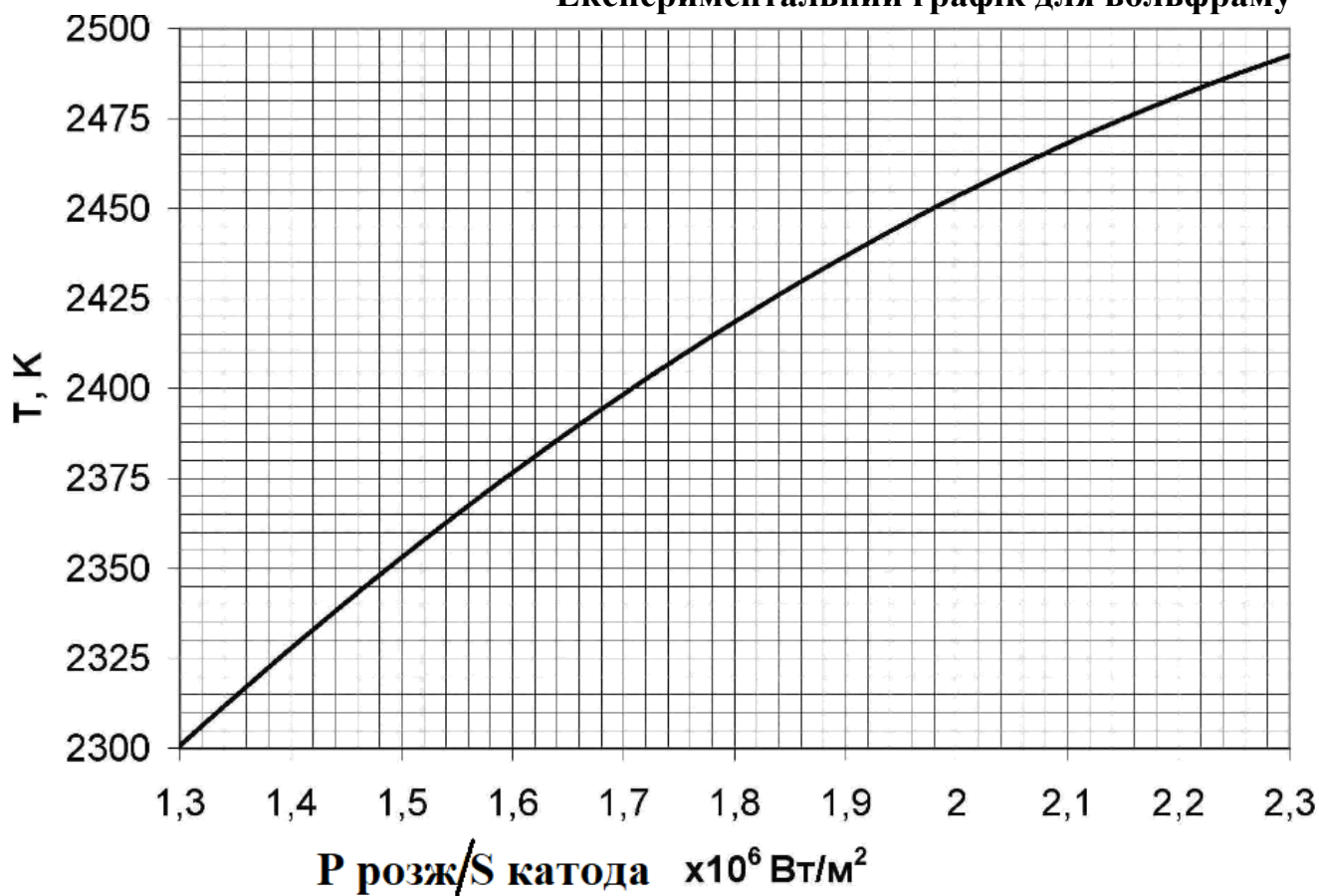
а також потужність у $\text{Вт}/\text{м}^2$, що приходить на одиницю площі катода $P_{\text{розж}}/S_{\text{кат}}$. Площа катода за паспортними даними $S_{\text{кат}} = 3,52 \text{ мм}^2$.

За експериментальним для вольфраму графіком залежності температури катода від $P_{\text{розж}}/S_{\text{кат}}$ визначити температури T_1 , T_2 , T_3 катода для кожної напруги розжарення. Дані занести в Таблицю 2.

Таблиця 2.

N	U розж, В	I розж, А	P розж. Вт	P/S $\times 10^6 \text{ Вт}/\text{м}^2$	T , К	$I_{\text{нас}}$, мА
1.	3,5					
2.	4					
3.	4,5					

Експериментальний графік для вольфраму



Розрахунок роботи виходу

7. Вибрати з таблиці 2 довільну пару значень температури катода і відповідних струмів насичення, наприклад, T_1 , T_2 та $I_{\text{нас}1}$, $I_{\text{нас}2}$. і, користуючись робочою формулою (4), розрахувати роботу виходу електрона з вольфраму.. Такий розрахунок повторити для інших пар – T_1 і T_3 та T_2 і T_3 .

Визначити середнє значення роботи виходу.

Контрольні питання

1. У чому полягає явище термоелектронної емісії? Що називається роботою виходу електрона?
2. Яке походження мають сили, які діють на електрон у подвійному електричному шарі?
3. Як пов'язаний струм насичення з термоелектронною емісією?
4. Які фізичні параметри визначаються експериментально у даній роботі?
5. Визначити силу струму насичення $I_{\text{нас}}$ в електронній лампі з вольфрамовим катодом завдовжки $l = 3$ см і діаметром $d = 0,1$ мм, якщо температура $T = 2700$ К. Емісійна стала для вольфраму $B = 60$ А/(см²К²), робота виходу електрона з вольфраму $A = 4,54$ еВ.

Рекомендована література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. – К.: Техніка, 2001. – Т.2, розд. 2.
2. Лопатинський І.Є., Зачек І.Р., Кравчук І.М., Романишин Б.М., Габа В.М., Гончар Ф.М. Курс фізики. Підручник. – Львів: Афіша, 2003. – 376 с.
3. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 3. Електрика і магнетизм. [Електронне видання]: - Д. Національний гірничий університет, 2018. - 165 с.

Лабораторна робота 27.7

Дослідження гістерезису феромагнітних матеріалів

Мета роботи – визначення: 1) кривої намагнічування; 2) коерцитивної сили; 3) залишкової намагніченості; 4) роботи перемагнічування за один цикл феромагнетика по петлі гістерезису при різних напругах живлення.

Прилади й принадлежности: 1) касета ФПЕ-07; 2) генератор електромагнітних коливань звукової частоти; 3) електронний осцилограф.

Опис приладу та теоретичні відомості

Феромагнетиками називають тверді тіла, які мають спонтанну намагніченість, тобто намагнічені вже у відсутності магнітного поля. У цьому відношенні вони аналогічні сегнетоелектрикам. Типовими представниками феромагнетиків є залізо, кобальт, нікель та багато їх сплавів.

Характерною особливістю феромагнетиків є нелінійна залежність $B = f(H)$ (рис. 1), їм властиво явище магнітного гістерезису. Залежність між B і H виявляється неоднозначною, а визначається попередньою історією намагнічування. Якщо спочатку ненамагнічений феромагнетик намагнічувати, збільшуючи H від нуля до значення, при якому настає насичення (точка А на рис.1), а потім зменшувати H від H_a до $-H_0$, то крива намагнічування $B(H)$ піде не по первісному шляху AO , а вище – по шляху ACD . Якщо далі змінювати H у зворотному напрямку від $-H_0$ до $+H_a$, то крива намагнічування пройде нижче – по шляху $A'C'A$.

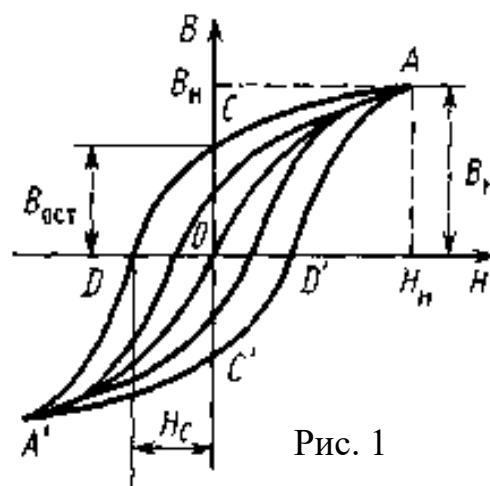


Рис. 1

Отриману замкнену криву називають петлею гістерезису. У тому випадку, коли в точках A і A' досягається насичення, петлю гістерезису називають максимальною. Якщо ж у крайніх точках насичення нема, то одержують петлі гістерезису меншого розміру, якби-то вписані у максимальну петлю.

З рисунка видно, що при $H = 0$ намагнічування не зникає (точка C) і характеризується величиною $B_{зал}$, яку називають залишковою індукцією. Для її зникнення треба прикласти поле $H = -H_k$. Величина H_k називається коерцитивною силою. Прийнято феромагнетик вважати жорстким, якщо $H_k \geq 100$ А/м. Якщо $H_k < 100$ А/м, то феромагнетик вважають м'яким. Жорсткі феромагнетики використовують для виготовлення постійних магнітів, м'які – як осердя трансформаторів змінного струму та для електричних машин.

Петлю гістерезису легко отримати на екрані електронно – променевої трубки осцилографа.

Принципова схема установки зображена на рис. 2.

На первинну обмотку трансформатора подається змінна напруга від звукового генератора. У коло первинної обмотки приєднаний резистор R_1 . В осерді трансформатора утворюється змінне магнітне поле, напруженість якого пропорційна силі струму, який протікає через резистор R_1 . Якщо з резистора R_1 напругу подати на вхід X

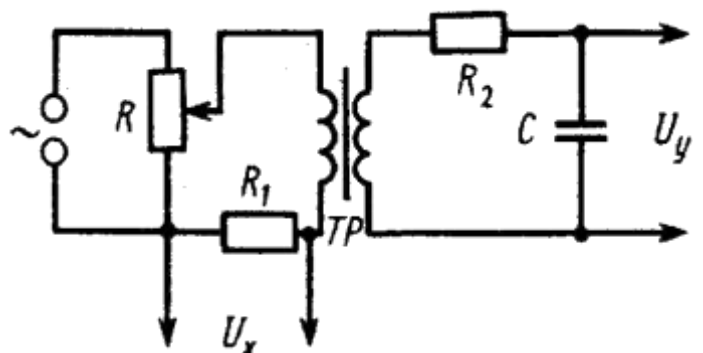


Рис. 2

осцилографа, то відхилення променю на екрані буде пропорційним напруженості H магнітного поля.

На вхід Y осцилографа подається напруга з конденсатора C , пропорційна заряду конденсатора, який, у свою чергу, пропорційний величині B . Таким чином, на горизонтальний і вертикальний входи осцилографа одночасно подають напруги, пропорційні відповідно напруженості H та індукції B магнітного поля. На екрані осцилографа можна спостерігати петлю гістерезису.

Досліджуваний зразок феромагнетику виконано у вигляді тороїду. Тому

$$H = \frac{N_1}{2\pi \cdot r_m} I_1,$$

де $r_m = \frac{r_1 + r_2}{2}$, r_1 і r_2 – внутрішній та зовнішній радіуси тороїду; I_1 – сила струму у первинній обмотці тороїду; N_1 – кількість витків первинної обмотки тороїду.

Спад напруги на резисторі R_1 визначається за формулою

$$U_x = I_1 R_1 = \frac{2\pi \cdot r_m}{N_1} R_1 H \quad (1)$$

і пропорційний відхиленню електронного променю по осі X

$$U_x = b_1 x, \quad (2)$$

де b_1 – чутливість осцилографа.

З урахуванням виразів (1) і (2) напруженість магнітного поля можна розрахувати так:

$$H = \frac{N_1}{2\pi r_m R_1} b_1 x = \alpha b_1 x, \quad (3)$$

де $\alpha = \frac{N_1}{2\pi r_m R_1}$.

За законом Фарадея – Ленца ЕРС індукції у вторинній обмотці

$$\varepsilon_i = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \frac{dB}{dt} S_2,$$

де Φ – потік магнітної індукції \vec{B} через один виток вторинної обмотки; $S_2 = (r_2 - r_1)d$ – площа перерізу тороїду (d – товщина тороїду).

За законом Ома для вторинної обмотки трансформатора

$$\varepsilon_{i2} = U_c + I_2 R_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt}, \quad (4)$$

де U_c – напруга на конденсаторі; I_2 – сила струму у вторинній обмотці; L_2 – індуктивність обмотки.

Якщо електроємність C і опір R_2 достатньо великі, то

$$I_2 R_2 \gg U_c = \frac{q}{C}, \quad I_2 R_2 \gg L_2 \frac{dI_2}{dt}, \quad (5)$$

де q – заряд конденсатора.

З урахуванням формули (5) вираз (4) виглядає так:

$$I_2 = -\frac{\varepsilon_i}{R_2} = -\frac{N_2 S_2}{R_2} \cdot \frac{dB}{dt}. \quad (6)$$

Напруга на конденсаторі U_c , яку подають на підсилювач вертикального відхилення променю осцилографа, дорівнює

$$U_c = U_y = \frac{q}{c} = \frac{0}{C} = -\frac{N_2 S_2}{R_2 C} \int_0^t I_2 dt = -\frac{N_2 S_2}{R_2 C} \cdot B. \quad (7)$$

Ця напруга пропорційна відхиленню електронного променю вздовж вертикальної осі, тобто

$$U_y = b_2 y. \quad (8)$$

Із виразів (7) та (8) отримаємо величину магнітної індукції

$$B = \beta \cdot b_2 \cdot y, \quad (9)$$

де $\beta = \frac{R_2 C}{N_2 S_2}$.

Змінюючи силу струму I у первинній обмотці тороїдального трансформатора, спостерігають за петлею гістерезису на екрані осцилографа.

По площі петлі гістерезису можна знайти роботу переманічування ферромагнетика, віднесена до одиниці об'єму зразка. Тоді об'ємна густина енергії магнітного поля

$$\omega_{\text{в}} = \frac{\mu_0 \mu H_2}{2} = \frac{BH}{2}.$$

Елементарна робота, яка виконується у циклі перемагнічування,
 $\delta A = d\omega_{\text{в}} = HdV.$

Робота за повний цикл перемагнічування

$$A = \oint HdV. \quad (10)$$

З урахуванням виразів (9) і (10) можна записати, що

$$A = \alpha\beta b_1 b_2 \oint x dy = \alpha\beta b_1 b_2 S_{\text{пет}}, \quad (11)$$

де $S_{\text{пет}}$ – площа петлі гістерезису на екрані осцилографа, виміряна в см^2 .

Послідовність вимірювання

Зберіть схему установки відповідно до маркування на касеті ФПЕ-07 (рис. 3).

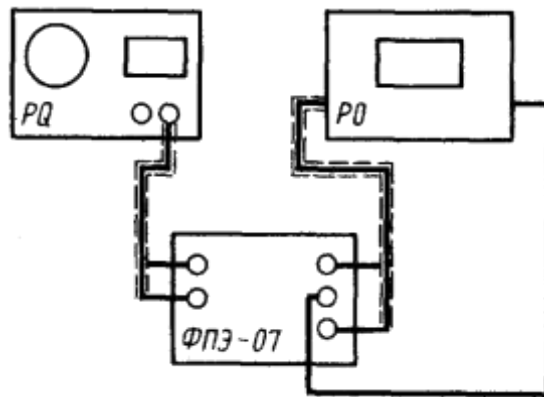


Рис. 3

Завдання 1. Знімання кривої намагнічування

1. Підготуйте осцилограф до роботи у режимі спостереження фігур Ліссажу.
2. На генераторі встановіть частоту 2 кГц.
3. Підключіть живлення до лабораторного столу та увімкніть прилади.
4. Регулюючи вихідну напругу генератора і підсилення по осі Y осцилографа, установіть максимальну петлю гістерезису, яка відповідає магнітному насиченню зразка. При цьому петля гістерезису повинна займати найбільшу площу екрана осцилографа.
5. Занесіть у таблицю координати x та y вершин максимальної петлі гістерезису.
6. Змініть за допомогою ручки “Рег. вих.” звукового генератора площу петлі гістерезису на екрані і знову занесіть у таблицю координати її вершин.
7. Повторіть вимірювання за п. 6 ще для чотирьох петель гістерезису. У разі необхідності (якщо розмір петлі малий) можна змінити чутливість осцилографа по вертикалі. При цьому величина b_2 приймає нове значення (обчислюють b_2 як добуток коефіцієнта підсилення по Y на множник). Результати вимірювань занесіть у таблицю.
8. Обчисліть H та B за формулами (3) і (8). Додаткові дані, необхідні для розрахунків: $r_1 = 10$ мм; $r_2 = 15$ мм; $N_1 = 200$ витків; $N_2 = 50$ витків; $R_1 = 100$ Ом; $R_2 = 24$ кОм; $b_1 = 0,032$ В/см; $C = 0,022$ мкФ; $d = 0,5$ см.
9. Побудуйте криву намагнічування $B = f(H)$.

Завдання 2. Визначення коерцитивної сили

1. Установіть максимальну петлю гістерезису.
2. Для цієї петлі знайдіть координату X_k , яка відповідає коерцитивній силі H_k , та координату $Y_{зал}$, яка відповідає величині $B_{зал}$. За формулами (3) : (9) обчисліть H_k і $B_{зал}$.
3. Визначте групу магнетика (твердий або м'який).

№ петлі	X , см	Y , см	H , А/м	B , Тл	A , Дж	H_k , А/м	Група феромагнетику

Завдання 3. Визначення роботи перемагнічування A за цикл

1. Максимальну за розміром петлю гістерезису перенесіть на міліметровий папір і обчисліть її площу S_{net} (см²).
2. За формулою (11) обчисліть роботу перемагнічування.

Контрольні питання

1. На які групи поділяють магнетики?
2. Які основні властивості феромагнетиків?
3. У чому полягає явище магнітного гістерезису?
4. Що називають коерцитивною силою?
5. Які феромагнетики відносять до твердих, а які до м'яких?
6. Що називають роботою перемагнічування?

Рекомендована література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Т.2. – К.: Техніка, 2001, - с. 324 – 331.

Лабораторна робота 40

Визначення ємності конденсатора містком Соті

Мета роботи: визначення ємності конденсатора містком Соті.

Прилади й принадлежності: набори конденсаторів з невідомою і відомою ємностями; магазин опорів; електронний індикатор нуля (ЕІН).

Теоретичний вступ

Ємність (електроємність) – фізична величина, що чисельно дорівнює заряду, який необхідно надати провіднику, щоб його потенціал був підвищений на одиницю.

Для отримання великих ємностей використовуються конденсатори, що представляють собою два стрічкових провідники, розділених тонким шаром діелектрика. Практично ємність конденсатора можна визначити методом містка, аналогічного містку для визначення опору, замінивши в схемі відомий і невідомий опори відповідно відомою ємністю C_0 і вимірюваною C_x ємностями (рис. 1).

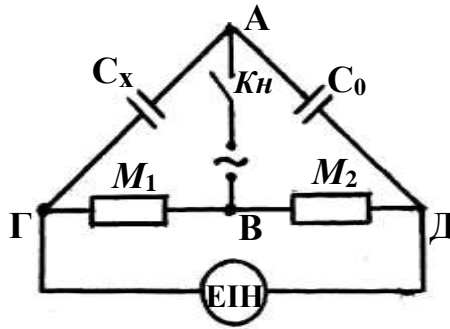


Рис. 1

До точок A і B підводиться змінна напруга (6,3 В), а до точок Γ і Δ підключається електронний індикатор нуля (осцилограф). При зміні опорів R_1 і R_2 в магазинах опорів M_1 і M_2 напруга на ділянці $\Gamma\Delta$ змінюється і може бути доведена до мінімуму. Індикатор нуля дозволяє безпосередньо визначати появу мінімуму напруги на ділянці $\Gamma\Delta$.

При увімкненні включенні установки змінний струм буде проходити по ділянках кіл AGB і ADB .

Потрібно підібрати опори R_1 і R_2 такими, щоб різниця потенціалів на вході індикатора стала мінімальною. Це значить, що потенціали точок Γ і Δ майже однакові:

$$\varphi_{\Gamma} \approx \varphi_{\Delta}. \quad (1)$$

При цій умові величини струмів на ділянках AG і GB , а також на ділянках AD і DB повинні бути однаковими, тобто

$$I_{c_x} = I_1 \quad \text{і} \quad I_{c_0} = I_2. \quad (2)$$

Застосовуючи закон Ома для змінного струму на ділянках кола тільки з омичним або тільки з ємнісним опором $\left(R_c = \frac{1}{\omega C}\right)$ і приймаючи до уваги рівняння (2), запишемо:

$$\frac{\varphi_A - \varphi_B}{\frac{1}{\omega C_x}} = \frac{\varphi_B - \varphi_{\Gamma}}{R_1}; \quad (3)$$

$$\frac{\varphi_A - \varphi_{\Delta}}{\frac{1}{\omega C_0}} = \frac{\varphi_B - \varphi_{\Delta}}{R_2}, \quad (4)$$

де $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_{\Gamma}$ і φ_{Δ} – потенціали точок A, B, Γ і Δ ;

ω – циклічна частота змінного струму.

З рівнянь (3), (4) і (1) одержимо

$$C_x = C_0 \frac{R_2}{R_1}. \quad (5)$$

Порядок виконання роботи.

1. Підключити установку до мережі.
2. Установити відомі ємність C_0 і опір R_1 і підібрати в магазині опорів M_2 такий опір R_2 , щоб амплітуда сигналу на екрані осцилографа була мінімальною.

3. Змінюючи R_1 , повторити дослід ще двічі. За формулою (5) обчислити ємність невідомого конденсатора C_x .
4. Зазначені вище вимірювання повторити з іншим конденсатором.
5. Виміряти ємність батареї конденсаторів (при паралельному і послідовному з'єднанні конденсаторів).
6. Результати вимірів і обчислень занести в таблицю.
7. Остаточний результат записати у вигляді:

$$C_1 = (\langle C_1 \rangle \pm \Delta C) \text{ мкФ при } \alpha = \quad ;$$

$$C_2 = (\langle C_2 \rangle \pm \Delta C) \text{ мкФ при } \alpha = \quad .$$

8. За середніми значеннями $\langle C_1 \rangle$ і $\langle C_2 \rangle$ розрахувати $C_{\text{послід}}$ і $C_{\text{парал}}$:

$$C_{\text{парал}}^{\text{теор}} = \langle C_1 \rangle + \langle C_2 \rangle; \quad C_{\text{посл}}^{\text{теор}} = \frac{\langle C_1 \rangle \cdot \langle C_2 \rangle}{\langle C_1 \rangle + \langle C_2 \rangle} \quad (6)$$

і порівняти їх з вимірними.

Таблиця

№ виміру	Дослідж. конд.	C_0 , мкФ	R_1 , Ом	R_2 , Ом	C_{x_i} , мкФ	$\langle C \rangle$, мкФ	ΔC_{x_i} , мкФ	$\Delta C_{x_i}^2$, (мкФ) ²	$S\langle C \rangle$, мкФ	$\Delta\langle C \rangle$, мкФ	E , %
1 2 3	1										
1 2 3	2										
1 2 3	Послідовне з'єднання										
1 2 3	Паралельне з'єднання										

Контрольні питання

1. Чому для вимірювання ємності методом містка Соті використовується перемінна напруга?
2. Від чого залежить ємнісний опір?
3. Чому дорівнює ємність батареї конденсаторів, з'єднаних послідовно?
4. Чому дорівнює ємність батареї конденсаторів, з'єднаних паралельно?

Рекомендована література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. – К.: Техніка, 2001. – Т.2, розд. 2.
2. Лопатинський І.Є., Зачек І.Р., Кравчук І.М., Романишин Б.М., Габа В.М., Гончар Ф.М. Курс фізики. Підручник. – Львів: Афіша, 2003. – 376 с.

3. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 3. Електрика і магнетизм. [Електронне видання]: - Д. Національний гірничий університет, 2018. - 165 с.

Лабораторна робота 41

Визначення індуктивності котушок

Мета роботи: 1) вивчення явища самоіндукції; 2) визначення індуктивності котушки з осердям та без осердя.

Прилади й принадлежности: амперметр; вольтметр; реостат; котушка індуктивності; двохполюсний рубильник.

Теоретичний вступ

Навколо замкненого провідного контуру зі струмом завжди виникає магнітне поле, яке створює певний магнітний потік крізь контур. Цей потік залежить від зміни величини струму в контурі, форми контуру і магнітної проникності середовища, в яке занурено контур.

Виникнення електрорушійної сили в контурі внаслідок зміни магнітного потоку, створюваного електричним струмом цього контуру, називається явищем *самоіндукції*.

Зчеплений магнітний потік, що пронизує площу, обмежену контуром струму, пропорційний величині струму, тобто

$$\psi = LI, \quad (1)$$

де L – індуктивність контуру.

Величину, що чисельно дорівнює магнітному потоку крізь площу контуру, при величині струму контуру, який дорівнює одиниці, називають індуктивністю контуру.

Якщо форма, розміри контуру не змінюються, поблизу контуру немає ферромагнетиків, а змінюється лише величина струму в контурі, то ЕРС самоіндукції пропорційна швидкості зміни величини струму, тобто

$$\varepsilon_c = -L \frac{dI}{dt}. \quad (2)$$

Знак „мінус” указує, що ЕРС самоіндукції протидіє зміні сили струму в контурі. З індуктивністю контуру також зв'язаний додатковий опір змінному струму. Цей опір залежить від індуктивності контуру, частоти змінного струму і називається індуктивним опором $R_L = L\omega$, де $\omega = 2\pi\nu$ – циклічна частота змінного струму).

У роботі для визначення індуктивності L котушки застосовується метод, побудований на вимірі повного опору (імпедансу) Z котушки, включеної в коло змінного струму. Повний опір котушки виражається через омичний і індуктивний опори, а саме:

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2}, \quad (3)$$

де R - омичний опір котушки.

Тоді згідно з формулою (3)

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - R^2} . \quad (4)$$

У роботі використовується струм промислової частоти.

Повний опір Z вимірюється за допомогою вольтметра й амперметра (рис.1).

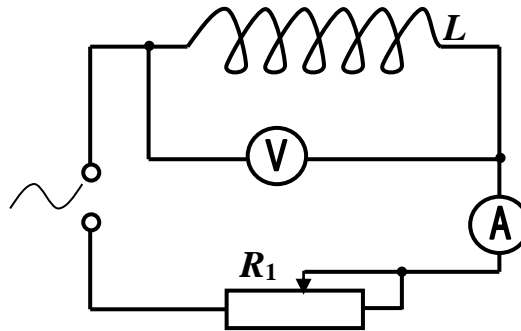


Рис. 1

Реостатом R_1 регулюється сила струму, яка вимірюється амперметром, а падіння напруги на котушці - вольтметром. Використовуючи закон Ома для ділянки кола, запишемо

$$Z = \frac{U}{I}, \quad (5)$$

де Z – шуканий повний опір котушки.

Порядок виконання роботи.

1. Скласти електричне коло за схемою рис. 1. Підключити схему до мережі і, змінюючи опір реостата, установити задану викладачем напругу або струм, зняти показання амперметра і вольтметра. За формулою (5) обчислити повний опір котушки. Дослід повторити три рази при різних значеннях напруги або сили струму. Рубильник вмикати на час, необхідний для відліку показань приладів при одному вимірі, щоб не нагрівалася котушка.
2. Вставити феромагнітне осердя у котушку (тим самим збільшити магнітну проникність середовища) і повторити виміри, зазначені в пункті 1.
3. Обчислити за формулою (4) індуктивності котушки без осердя і з осердям. Результати вимірів і обчислень занести в таблицю.

Таблиця

№ виміру	Котушка	I , А	U , В	Z_i , Ом	R , Ом	L_i , Гн	$\langle L_i \rangle$, Гн	ΔL_i , Гн	α	$t_{\alpha, n}$	$\frac{\Delta L}{L}$	E %
1 2 3	Без осердя											
1 2 3	З осердям											

Остаточний результат записати у вигляді:

$$L_1 = (\langle L_1 \rangle \pm \Delta L) \text{ Гн при } \alpha = \quad ;$$

$$L_2 = (\langle L_2 \rangle \pm \Delta L) \text{ Гн при } \alpha = \quad .$$

Контрольні питання

1. Чим відрізняються явища самоіндукції і електромагнітної індукції?
2. Від чого залежить індуктивність котушки?
3. Що називають імпедансом котушки і від чого він залежить?
4. Як впливає на показання вимірювальних приладів розміщення у котушці осердя з феромагнетика?

Рекомендована література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. – К.:Техніка, 2001. – Т.2, розд.2.
2. Лопатинський І.Є., Зачек І.Р., Кравчук І.М., Романишин Б.М., Габа В.М., Гончар Ф.М. Курс фізики. Підручник. – Львів: Афіша, 2003. – 376 с.
3. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 3. Електрика і магнетизм. [Електронне видання]: - Д. Національний гірничий університет, 2018. - 165 с.

Лабораторна робота 43

Вивчення роботи двохелектродної лампи

Мета роботи: 1) зняття температурної характеристики діода; 2) зняття анодної характеристики діода.

Прилади й принадлежности: макет лабораторної установки.

Теоретичний вступ

Явище термоелектронної емісії полягає у випромінюванні електронів розжареними металами. У процесі хаотичного руху всередині металу деякі електрони одержують кінетичну енергію більшу ніж робота виходу електронів з металу.

Такі електрони емітують з металу та утворюють навколо нього електронну хмарку. Емісія електронів зростає з підвищенням температури металу.

Якщо розжарений метал зробити катодом вакуумної трубки (це означає, що на нього подають негативний потенціал), а на анод подати позитивний потенціал, то в трубці буде протікати термоелектронний струм. Така двохелектродна вакуумна трубка має назву діод (рис.1). Електричне поле між катодом K та анодом A відтягує електрони до A , електронна хмарка розсіюється й утворюються умови для подальшої емісії електронів з металу.

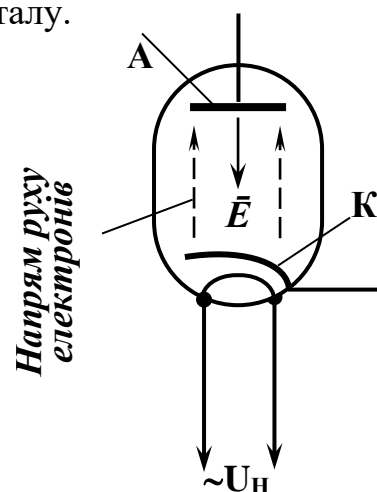
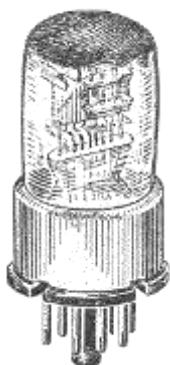
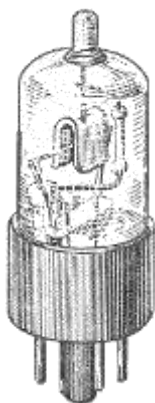


Рис.1

Якщо між катодом і анодом створити електричне поле так, щоб позитивний полюс батареї був з'єднаний з анодом, а негативний (з катодом) та міліамперметр, увімкнений послідовно з діодом, покаже струм (рис. 2). Якщо катод холодний, то з подачею напруги на анод струму в колі не буде. Це пояснюється тим, що досить розряджений газ усередині діода (вакуум) не містить заряджених частинок. При такій умові електропровідність діода дорівнює нулю.

Залежність сили струму від напруги (анодна або вольт-амперна характеристика діода) має нелінійний характер, тобто закон Ома для вакуумного діода не виконується. При збільшенні анодної напруги сила струму (при $T_{\text{катода}} = \text{const}$) досягає максимуму, який називають струмом насичення.

Найбільшу зацікавленість становить та область позитивних значень напруги на діоді, для яких просторовий заряд (електронна хмара) суттєво впливає на розподіл електричного поля між анодом і катодом. В цій області струм діода менше від струму емісії катода, тому що електричне поле просторового заряду перешкоджає руху електронів, що були випромінені катодом, і їх частка вертається на катод. У цьому випадку величина струму пропорційна напрузі на аноді у ступені трьох других

$$I_a = BU^{3/2} \quad (1)$$

Коефіцієнт пропорційності B залежить від форми, розмірів електродів, їх взаємного розташування та головне – залежить від питомого заряду електрону (питомий заряд – це відношення заряду частинки до її маси). Закон трьох других виконується для будь-яких, а не тільки при циліндричній геометрії електродів і при не дуже великих струмах.

Величина B визначається співвідношенням

$$B = \frac{8\sqrt{2}\pi\epsilon_0 l}{9r_a} \sqrt{\frac{e}{m}} \frac{1}{\beta^2}, \quad (2)$$

де ϵ_0 - електрична стала ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); l – висота центральної частини катода, що вкрита оксидним шаром; r_a – радіус анода; e – заряд електрона ($e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл); m – маса електрона ($m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ кг); β^2 - функція, що дорівнює відношенню радіуса анода до радіуса катода, що може бути задана графіком залежності $\beta^2 = f\left(\frac{r_a}{r_k}\right)$. З ураху-

ванням вище наведених значень сила струму дорівнює

$$I_a = 2,99 \cdot 10^{-10} \sqrt{\frac{e}{m}} U^{3/2} \quad (3)$$

Для діода, який використовується в даній роботі, $\left(\frac{r_a}{r_k}\right) \approx 4$; $\beta^2 \approx 0,7$; $\left(\frac{l}{r_a}\right) \approx 6$.

Залежність сили струму від напруги (анодна або вольт-амперна характеристика діода) має нелінійний характер, тобто закон Ома для вакуумного діода

не виконується. При збільшенні анодної напруги сила струму (при $T_{\text{катода}} = \text{const}$) досягає максимуму, який називають струмом насичення.

Порядок виконання роботи.

I. Зняття температурної характеристики діода

Температура катода зростає зі збільшенням напруги розжарювання U_H , тому будемо досліджувати залежність сили анодного струму I_a від напруги на нитці розжарювання катода U_H .

$$I_a = f(U_H).$$

1. Зібрати схему згідно з рис. 2.

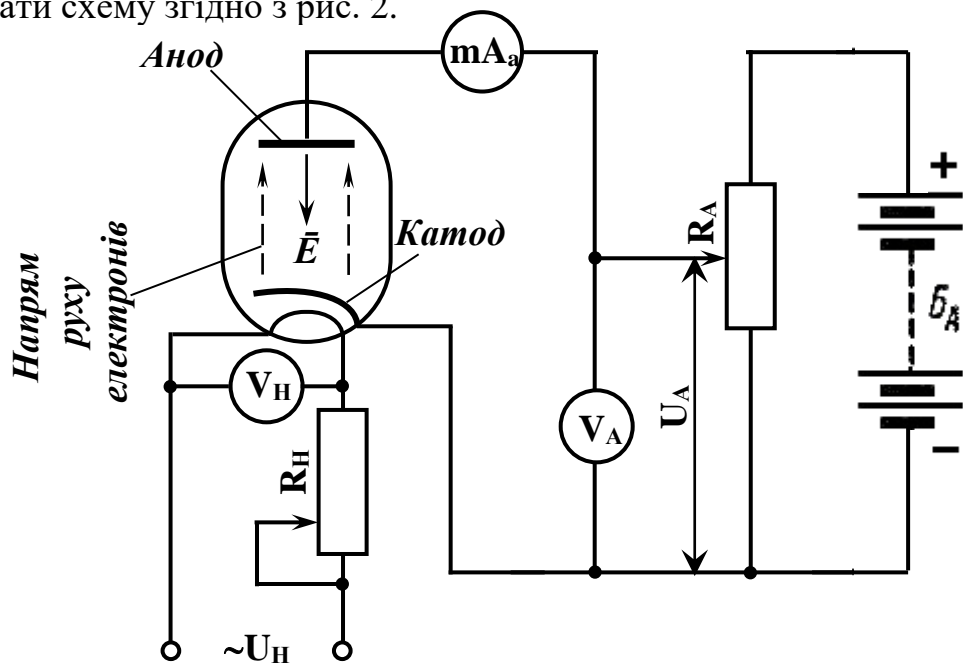


Рис. 2

2. Потенціометром установити анодну напругу 20 В.
3. За допомогою реостата розжарювання R_{ζ} змінювати напругу U_H через 0.2 В, кожний раз визначаючи сталі значення струму I_a .
4. Результати вимірів занести в табл.1 $I_a = f(U_H)$, (табл. 1).
5. Повторити пп. 3, 4 для $U_a = 30$ В.
6. За даними таблиці побудувати залежність $I_a = f(U_H)$, при $U_a = 30$ В та 20В.

Обидві криві будуються в одній системі координат (рис. 3).

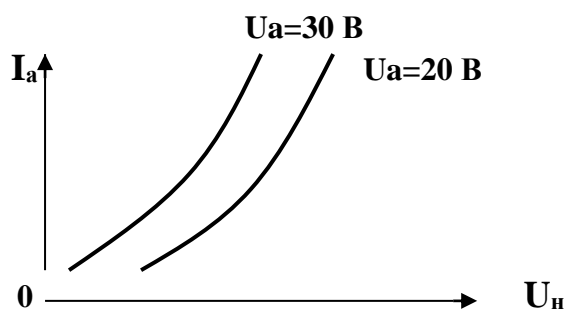


Рис. 3

II. Зняття анодної характеристики

1. Для зняття анодної характеристики необхідно скористатися попередньою схемою (рис. 2).

2. Установити напругу розжарювання U_{H1} .

3. Підвищуючи щоразу анодну напругу U_a на 5 В, вимірювати анодний струм I_a .

4. Результати вимірів записати в табл.2.

5. Повторити пп. 3, 4 для U_{H2} .

6. За даними таблиці побудувати залежність

$$I_a = f(U_a) \text{ при } U_{H1} \text{ та } U_{H2}$$

Обидві криві будуються в одній системі координат (рис. 4).

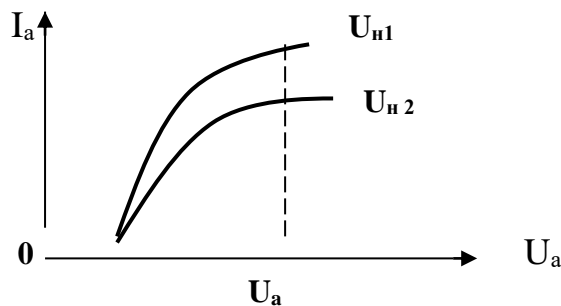


Рис. 4

Таблиця 1

№ виміру	$U_a = 20 \text{ В}$		$U_a = 30 \text{ В}$	
	U_H	I_a	U_H	I_a
1				
...				
...				
10				

Таблиця 2

№ виміру	$U_H =$		$U_H =$	
	U_a	I_a	U_a	I_a
1				
...				
...				
10				

Контрольні питання

1. Від чого залежить сила струму насичення?
2. Чому для роботи електронних ламп необхідний високий вакуум?

Рекомендована література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. – К.: Техніка, 2001. – Т.2, розд. 2.
2. Лопатинський І.Є., Зачек І.Р., Кравчук І.М., Романишин Б.М., Габа В.М., Гончар Ф.М. Курс фізики. Підручник. – Львів: Афіша, 2003. – 376 с.

3. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 3. Електрика і магнетизм. [Електронне видання]: - Д. Національний гірничий університет, 2018. - 165 с.

Лабораторна робота № 48

Визначення відношення заряду електрона до його маси методом відхилення пучка електронів у магнітному полі Землі

Мета роботи: 1) вивчення руху заряджених частинок у магнітному полі; 2) визначення відношення заряду електрона до його маси (питомого заряду) методом відхилення пучка електронів у магнітному полі Землі.

Прилади та принадлежності: електронно-променева трубка; блок живлення.

Теоретичний вступ

Однією з важливих характеристик електрона є його питомий заряд, який дорівнює відношенню заряду електрона e до його маси m . Експериментальне визначення e/m належить до класичних дослідів фізики. Існує кілька методів визначення e/m . Усі вони базуються на дії електричного і магнітного полів на рухомий електрон.

У цій роботі метод визначення питомого заряду електрона базується на використанні електронно-променевої трубки, в якій немає екранного захисту від магнітного поля Землі.

Сила, що діє з боку електромагнітного поля на частинку із зарядом e , визначається формулою Лоренца

$$\mathbf{F} = e\mathbf{E} + e[\mathbf{v}\mathbf{B}]. \quad (1)$$

Перший доданок – сила, що діє на заряд e з боку електричного поля, другий – сила, що діє на заряд e з боку магнітного поля.

Розглянемо випадок, коли електрон рухається в поперечному магнітному полі, а електричне поле відсутнє, тобто $\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$, а $\mathbf{E} = 0$. Модуль сили Лоренца в цьому випадку

$$F = evB. \quad (2)$$

Відповідно основному закону динаміки $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$. Оскільки в даному випадку на заряд e діє магнітна складова сили Лоренца і саме вона викривляє траєкторію руху, а значить надає заряду нормальне прискорення $a_n = v^2/R$, то основний закон динаміки має вигляд:

$$evB = mv^2/R, \quad (3)$$

де R – радіус кривизни траєкторії електрона.

Звідси випливає $e/m = v/(RB)$. Знаючи v , R і B , можна знайти відношення заряду електрона до його маси.

Для визначення швидкості електрона необхідно скористатися співвідношенням

$$m v^2/2 = eU, \quad (4)$$

де $m v^2/2$ – кінетична енергія електрона, яку одержує електрон після проходження різниці потенціалів U .

Порівнюючи вирази (3) і (4), одержимо

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{(RB)^2} \quad (5)$$

З прямокутного трикутника ABC (рис. 1)

$$R^2 = a^2 + (R-Z)^2 \quad (6)$$

або

$$R = \frac{a^2 + Z^2}{2Z}, \quad (7)$$

де a – відстань від керуючої сітки трубки до екрана; Z – відхилення пучка електронів від прямолінійного напрямку, відліченого вздовж екрана;

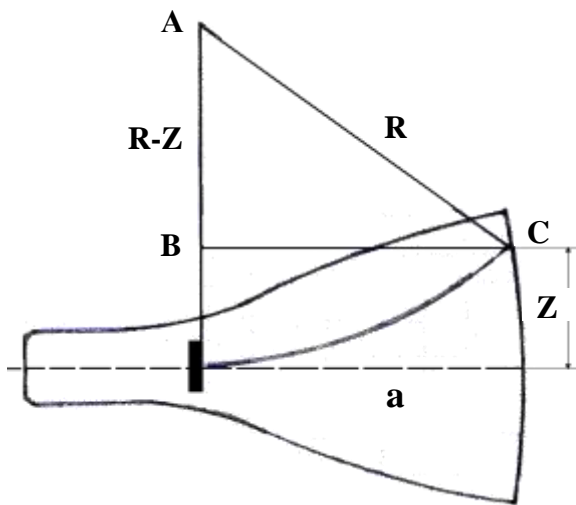


Рис. 1

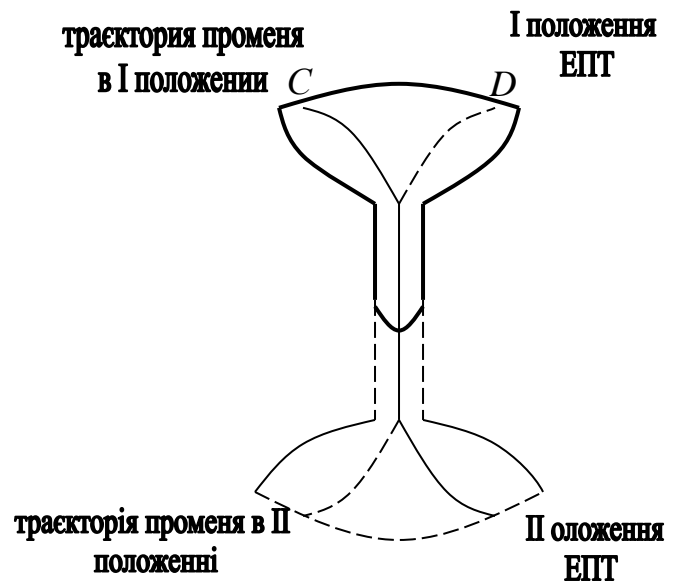


Рис. 2

Z – визначається як половина відстані між двома точками на екрані, що відповідають двом протилежним відхиленням пучка (рис. 2).

Порядок виконання роботи.

1. Установити вісь трубки горизонтально в площині магнітного меридіана (екраном на північ).

2. Ручкою «Фокус II» на блоці живлення установити прискорювальну різницю потенціалів ($U=800-1000$ В).

3. Ручкою «Фокус I» на блоці живлення сфокусувати світлу пляму на екрані трубки. По сітці визначити положення світної точки С.

4. Повернути трубку на 180° (екраном на південь) і відзначити нове положення точки D. Очевидно, $Z = \frac{1}{2} CD$.

5. Знайти величину R за формулою (7). Для даної трубки, $a = 23$ см. Вертикальна складова магнітної індукції B магнітного поля Землі, для даної географічної широти, дорівнює $0,5 \cdot 10^{-4}$ Тл.

6. Визначити $\frac{e}{m}$ за формулою (5).

7. Дослід повторити при різних значеннях U .

Дані вимірів занести в таблицю

<i>N</i> _{виміру}	<i>U</i> , <i>B</i>	<i>R</i> , <i>м</i>	<i>B</i> , <i>Тл</i>	<i>Z</i> , <i>м</i>	$\left(\frac{e}{m}\right)i$, <i>Кл/кг</i>	$\left\langle\left(\frac{e}{m}\right)\right\rangle$, <i>Кл/кг</i>	$\Delta\frac{e}{m}$, <i>Кл/кг</i>	<i>E</i> , <i>%</i>
1								
2								
3								
4								

Остаточний результат записати у вигляді

$$\left\langle\left(\frac{e}{m}\right)\right\rangle \pm \Delta\frac{e}{m} \quad \frac{\text{Кл}}{\text{кг}} \quad \text{при } \alpha = \quad .$$

Контрольні питання

1. Яка величина називається питомим зарядом?
2. Як визначити напрямок дії сили Лоренца?
3. Чи обмінюються енергією з магнітним полем заряджені частинки, що рухаються в ньому?
4. Від чого залежить радіус кривизни траєкторії заряду, який рухається у магнітному полі?
5. Яка траєкторія руху електронів в електронно-променевої трубки?

Рекомендована література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. – К.:Техніка, 2001. – Т.2, розд.2.
2. Лопатинський І.Є., Зачек І.Р., Кравчук І.М., Романишин Б.М., Габа В.М., Гончар Ф.М. Курс фізики. Підручник. – Львів: Афіша, 2003. – 376 с.
3. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 3. Електрика і магнетизм. [Електронне видання]: - Д. Національний гірничий університет, 2018. - 165 с.

Лабораторна робота 49

Вивчення магнітного поля соленоїда

Мета роботи: 1) дослідження магнітного поля соленоїда; 2) визначення залежності магнітної індукції поля соленоїда від сили струму; 3) визначення залежності магнітної індукції поля соленоїда в різних точках осі соленоїда скінченної довжини.

Прилади та принадлежності: соленоїд; реостат; мілівеберметр; амперметр; вимірювальна котушка; перемикачі; джерело струму.

Теоретичний вступ

Соленоїд представляє собою пристрій з провідника, який щільно намотаний на циліндричний каркас (рис. 1).

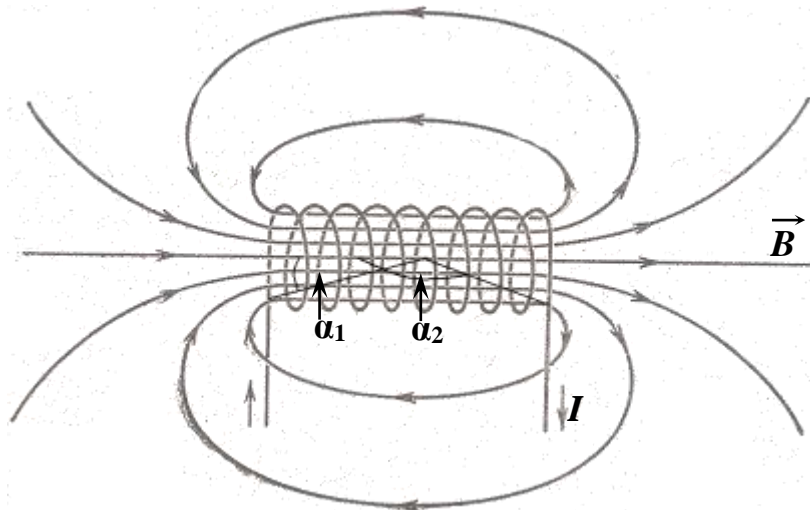


Рис. 1

При протіканні електричного струму через соленоїд в його середній частині магнітне поле спрямоване паралельно осі. Значення індукції B магнітного поля в будь-якій точці A осі соленоїда

$$B = \frac{\mu \cdot \mu_0}{2} nI (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \quad (1)$$

де α_1 і α_2 – кути, утворені з віссю соленоїда прямими, проведеними з точки A до країв соленоїда (рис. 1);

μ – магнітна проникність магнетика, що заповнює об'єм соленоїда; n – число витків, що приходяться на одиницю довжини соленоїда.

Індукцію магнітного поля довгого соленоїда приблизно можна обчислити за формулою:

$$B = \mu \cdot \mu_0 nI. \quad (2)$$

При цьому результат буде тим точніший, чим більша довжина соленоїда від його діаметра і чим ближче до середини соленоїда вибрана точка A . При наближенні до краю соленоїда один із кутів α_1 або α_2 прагне до $\frac{\pi}{2}$ й індукція магнітного поля зменшується.

Магнітне поле поза соленоїдом подібно полю смугового магніту (рис.1).

Соленоїд з феромагнітним осердям у внутрішній порожнині представляє собою електромагніт.

Принципова електрична схема для виміру магнітного поля всередині соленоїда представлена на рис. 2. Для вивчення магнітного поля соленоїда 1 розташуємо на його осі вимірювальну котушку 2. Діаметр вимірювальної котушки – d_2 , число витків – ω_2 , площа одного витка – S_2 .

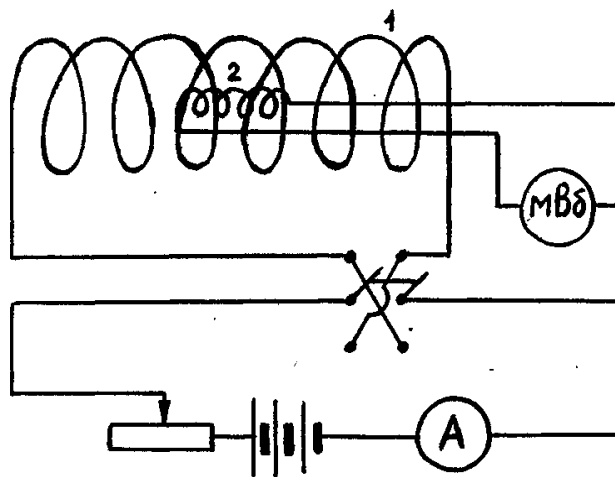


Рис. 2

Вимірювальну котушку 2 з'єднаємо з мілівеберметром. При зміні магнітного потоку, у вимірювальній котушці виникає електрорушійна сила індукції і через мілівеберметр проходить електричний струм.

Заряд, що пройшов через мілівеберметр, визначається за формулою

$$q = \frac{\omega_2 \Delta \Phi}{Z}, \quad (3)$$

де $\Delta \Phi$ – зміна магнітного потоку через поперечний переріз вимірювальної котушки 2; Z – повний опір вимірювального ланцюга.

За показниками мілівеберметра можна безпосередньо визначити зміну повного магнітного потоку, зчепленого з усіма витками вимірювальної котушки:

$$\Delta \Psi = \omega_2 \Delta \Phi = K_{\Phi} \Delta N, \quad (4)$$

де K_{Φ} – ціна поділки мілівеберметра; ΔN – кількість поділок, на яке відхиляється стрілка мілівеберметра.

Якщо замкнути коло живлення і пропустити через соленоїд постійний струм I , то протягом перехідного процесу струм зростає від нуля до I і магнітний потік, зчеплений з кожним витком вимірювальної котушки, зміниться на величину

$$\Delta \Phi = BS_2. \quad (5)$$

З формул (4) і (5) одержуємо величину магнітної індукції на осі соленоїда в області розташування вимірювальної котушки:

$$B = \frac{K_{\Phi} \cdot \Delta N}{\omega_2 S_2}. \quad (6)$$

За допомогою вимірів індукції магнітного поля соленоїда в різних точках на його осі і при різних струмах можна встановити залежності магнітної індукції від координати точки на осі соленоїда і магнітної індукції поля соленоїда від величини струму.

Порядок виконання роботи.

1. Попередньо, вимкнувши всі перемикачі на панелі, підключити джерело живлення.

2. Замкнути перемикач на панелі та встановити величину струму за указівкою викладача (у межах $0,5 - 0,9 A$), після чого цей перемикач розімкнути.

3. Перемикач мілівеберметра встановити в положення «КОРЕКТОР» і за допомогою ручки «КОРЕКТОР» стрілку приладу вивести на середину шкали (на цифру 5), а перемикач приладу перевести в положення «ВИМІР».

4. Вимірювальну котушку за допомогою маховичка встановити на середину соленоїда.

5. Записати максимальне середнє відхилення ΔN (у поділках) стрілки мілівеберметра від цифри 5 на шкалі для двох протилежних напрямів того самого струму.

6. Переміщуючи вимірювальну котушку вліво з кроком 4 см до кінця соленоїда, робити після кожного переміщення вимір відповідно до п.5 і записувати положення вимірювальної котушки щодо середини соленоїда. Поблизу краю соленоїда крок зменшити до 1 см.

7. Обчислити індукцію B магнітного поля соленоїда за формулою (6) для кожного виміру згідно з п.6. Результати вимірів і обчислень занести в табл. 1.

8. Установити вимірювальну котушку на середину шкали соленоїда або на будь-який інший поділ за вказівкою викладача.

9. Перемикач на приладі поставити в положення «ВИМІР». Реостатом установити величину струму $I = 0,2 \text{ A}$, перемикач на панелі перевести в середнє положення.

10. Провести виміри за п.5 і повторити їх для величин струму $0,3 - 0,6 \text{ A}$, струму, змінюючи його щораз на $0,1 \text{ A}$.

11. Обчислити індукцію B магнітного поля соленоїда для кожного виміру пункту 10 за формулою (6), результати вимірів і обчислень занести в табл. 2.

12. Побудувати графік залежності магнітної індукції поля соленоїда на осі $B = f(\ell)$ для даного значення величини струму і графік залежності магнітної індукції поля соленоїда від величини струму в ньому $B = f(I)$ для даного значення ℓ .

Таблиця 1

№ виміру	$I, \text{ A}$	$\ell, \text{ м}$	ΔN	$B, \text{ Тл}$
1				
...				
...				
8				

Таблиця 2

№ виміру	$I, \text{ A}$	$\ell, \text{ м}$	ΔN	$B, \text{ Тл}$
1				
...				
...				
8				

Контрольні питання

1. У чому принципове розходження в розрахунках індукції магнітного поля на осі соленоїда за формулами (1) і (6)?
2. Яка фізична величина називається магнітною індукцією?
3. У чому полягає явище електромагнітної індукції?

Рекомендована література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. – К.: Техніка, 2001. – Т.2, розд. 2.
2. Лопатинський І.Є., Зачек І.Р., Кравчук І.М., Романишин Б.М., Габа В.М., Гончар Ф.М. Курс фізики. Підручник. – Львів: Афіша, 2003. – 376 с.
3. Гаркуша І.П., Курінний В.П. Фізика. Навчальний посібник у 7 частинах. Ч. 3. Електрика і магнетизм. [Електронне видання]: - Д. Національний гірничий університет, 2018. - 165 с.

Математична обробка результатів вимірювання.

У всіх лабораторних роботах студенти вимірюють ті або інші фізичні величини. **Вимірюванням будь-якої фізичної величини називається операція порівняння цієї величини з відповідною величиною, що прийнята за одиницю.**

Прийнято розрізнявати два види вимірювання: прямі та непрямі.

Прямими називаються такі виміри, результат яких може бути отриманий безпосередньо з дослідних даних кількох вимірювань однієї й тієї ж величини. Значення вимірюваної величини визначається при цьому по шкалі приладу.

Прикладами таких вимірювань є: вимірювання довжини лінійкою, штангенциркулем, мікрометром, лазерним далекоміром; вимірювання проміжків часу за допомогою годинників, секундомірів, осцилографів; вимірювання сили струму на ділянці кола за допомогою амперметра.

У більшості випадків вимірюють безпосередньо не бажану величину, а деякі інші величини, які пов'язані з нею визначеною функціональною залежністю (рівнянням, формулою).

Наприклад, прискорення вільного падіння визначається на основі формули Гюйгенса, що пов'язує період коливань математичного маятника, його довжину та шукану величину.

У результаті вимірювань завжди отримують потрібну величину з деякою похибкою.

У задачу вимірювань входить не лише знаходження значень величини, але також й оцінка припущеної при вимірюванні похибки.

Похибки вимірювання прийнято підрозділяти на систематичні, випадкові та промахи.

Систематичні похибки викликаються факторами, що діють однакою чиною при багатократному повторенні одних і тих самих вимірювань. Їх величина однакою в усіх вимірюваннях, що проводяться одним і тим самим методом за допомоги одних і тих самих вимірювальних приладів.

Випадкові похибки відрізняються одна від одної в окремих вимірюваннях, що виконуються однакою чиною, і ці відмінності мають випадкову, невідому нам величину. Правила визначення таких випадкових похибок вивчаються у теорії похибок математичної дисципліни, що заснована на законах теорії ймовірностей.

Промахи – це грубі похибки, джерелом яких є нестача уваги експериментатора. При всякому досліді промахи мають бути виключені та основний спосіб їх усунення – уважність та ретельність під час роботи.

Однією з основоположних задач, рішення якої необхідно вирішити при постановці експерименту, є врахування та виключення систематичних похибок, які в ряді випадків можуть бути великі, що в свою чергу значно викривляє результати вимірювань.

Систематичні похибки бувають чотирьох типів.

1. Систематичні похибки, **природа яких відома, а величина може бути достатньо точно визначена**, називаються поправками та можуть бути враховані, або ними можна в цілому ряді випадків знехтувати, так як вони, як правило, дуже малі.

При зважуванні тіла на аналітичних терезах не враховується дія на вимірювальне тіло сили Архімеда, величину якої, у випадку необхідності, можна розрахувати та внести в результат виміру **поправку**, позбавившись таким чином від систематичної похибки першого типу.

2. Систематичні похибки, **природа яких відома, але невідома величина**, пов'язані з похибкою вимірювальних приладів, що в свою чергу пов'язано з класом точності приладу.

Похибки цього типу, тобто приладні похибки, не можуть бути виключені, але можуть бути зменшені при використанні приладів більш високого класу точності, а також можуть бути враховані, так як для похибок цього типу відомі межі, за які вони не виходять. Слід додати, що вимірювальні прилади необхідно обирати таким чином, щоб вимірювана величина знаходилась поблизу середини шкали приладу, що використовується. В цьому випадку похибка приладу мінімальна.

3. Систематичні похибки, для яких *не відома ні величина, ні природа їх виникнення*, але які можуть досягати достатньо великих значень та значно викривляти результати вимірювань, відносяться до систематичних похибок третього типу та вони обов'язково мають бути знайдені, й ліквідовані. Для цього величину, що нас цікавить, можна спробувати отримати іншим методом чи при інших умовах.

Якщо нічого не відомо про цілісність та однорідність тіла, густину речовини якого визначають в результаті непрямого вимірювання, як відношення його маси до об'єму, то вимірювана таким чином густина може бути обтяжена значною за величиною систематичною похибкою третього типу, що пов'язана з можливою наявністю в тілі включень порожнин та пусток.

4. Систематичні похибки, *що обумовлені властивостями вимірюваного об'єкта* та не залежать від того, яким чином виконуються виміри, відносяться до систематичних похибок четвертого типу та їх можна зменшити, виконавши виміри кілька разів, перевіривши тим самим систематичну похибку в випадкову.

При визначенні, наприклад, питомого опору провідника необхідно враховувати, що промисловість не гарантує абсолютно однакового діаметру вздовж всієї довжини провідника, а також відсутності в провіднику особливостей, які можуть вплинути на результат непрямого вимірювання величини, що нас цікавить (питомий опір). Так як відокремлюють провідник від мотка випадково місце, де вимірюють діаметр обирають випадково, то отримані при цьому результати будуть відрізнятися. Саме тому вимірювання необхідно проводити декілька разів.

Між величиною систематичної похибки, випадкової похибки та числом вимірів існує зв'язок. Якщо систематична похибка завідомо більша випадкової, тобто є визначною, то достатньо виконати вимір один раз. Якщо випадкова похибка є визначною, то вимірювання слід виконувати декілька разів.

При вимірюванні фізичних величин, у тих випадках, коли основну роль при цьому відіграють випадкові похибки, всі оцінки точності вимірювань можна зробити лише з деякою вірогідністю.

За найбільш вірогідне значення вимірюваної величини слід прийняти її середнє арифметичне значення, що розраховується з всього ряду вимірених значень по формулі (1)

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Для оцінки величини випадкової похибки виміру існує декілька способів.

Різниця між середнім значенням вимірюваної величини $\langle x \rangle$ та виміреними значеннями цієї величини x_i називається абсолютною похибкою отриманого вимірювання

$$\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle \quad (2)$$

Різниця Δx_i (**абсолютна похибка**) може бути як додатною, так і від'ємною величиною. Тому для підрахунку середньої арифметичної похибки r_n необхідно додавати абсолютні значення величини $|\langle x \rangle - x_i|$

$$r_n = \frac{|x_1 - \langle x \rangle| + |x_2 - \langle x \rangle| + \dots + |x_n - \langle x \rangle|}{n} = \frac{\sum_i |x_i - \langle x \rangle|}{n} \quad (3)$$

Частіше за все для оцінки випадкової похибки застосовують **середню квадратичну похибку**, що обчислюється за формулою (2)

$$S_n = \sqrt{\frac{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 + \dots}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{(n-1)}} \quad (4)$$

Границя, до якої прагне S_n при великому числі спостережень

$$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} S_n \quad (5)$$

власне кажучи й називається середньою квадратичною похибкою.

Квадрат цієї величини σ^2 називається **дисперсією вимірювань**.

Якщо істинне значення вимірюваної величини x , її середнє арифметичне значення, отримане в результаті вимірювань $\langle x \rangle$, а похибка вимірювань цієї величини Δx , то **вірогідність того, що істинне значення вимірюваної величини відрізняється від результату вимірювань не більше, ніж на величину Δx**

$$P((\langle x \rangle - \Delta x) < x < (\langle x \rangle + \Delta x)) = \alpha \quad (6)$$

називається **довірчою вірогідністю або надійністю**, а інтервал $\langle x \rangle - \Delta x$, $\langle x \rangle + \Delta x$, називається **довірчим інтервалом**.

Для характеристики величини випадкової похибки необхідно знати:

- 1) величину самої похибки (або довірчого інтервалу);
- 2) величину довірчої надійності.

Ці величини невідривно пов'язані між собою, а при заданому значенні α , величина довірчого інтервалу пов'язана також з числом вимірювань.

Очевидно, що чим більше довірчий інтервал, тим більша вірогідність того, що істинне значення вимірюваної величини потрапить до цього інтервалу, тобто тим більша довірча вірогідність. Задача експериментатора полягає в тому, щоб досягти одночасного зменшення величини довірчого інтервалу та збільшення довірчої вірогідності. Ця задача може бути розв'язана багатократними вимірами. Причому бажання при незмінному значенні довірчої вірогідності зменшити величину довірчого інтервалу в 2 рази, призведе до збільшення числа вимірювань в 4 рази. Відповідно, зменшення інтервалу в 3 рази призведе до збільшення числа вимірювань в 9 разів.

При непрямому вимірюванні величини, що являє собою суму або різницю двох або більше величин, результати вимірювань яких незалежні, середня квадратична похибка суми (або різниці) двох (або декількох) незалежних величин рівна кореню квадратичному з суми квадратів середніх квадратичних похибок окремих складових.

$$S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \quad (7)$$

Тобто при знаходженні сумарної похибки необхідно складати не самі похибки, а їх квадрати. А значить, роль окремих похибок дуже швидко падає по мірі їх зменшення. Тому необхідно прагнути зменшувати похибку, що має найбільшу величину. При цьому середнє арифметичне з ряду вимірювань має меншу похибку, ніж результат кожного окремого вимірювання.

У випадку обмеженого числа вимірювань для оцінки величини випадкової похибки використовують **виборчу середньоквадратичну похибку середнього арифметичного $S_{\langle x \rangle}$** .

$$S_{\langle x \rangle} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{\sum_i (\langle x \rangle - x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_i (\langle x \rangle - x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (8)$$

рівна середній квадратичній похибці окремого результату, поділеного на корінь квадратний з числа вимірювань.

S_n - середня квадратична похибка характеризує точність метода вимірювання, за допомогою якого визначається деяка фізична величина.

Середня квадратична похибка середнього арифметичного $S_{\langle x \rangle}$ використовується у всіх випадках, коли необхідно оцінити похибку величини, отриманої в результаті усіх проведених цим способом вимірювань.

Коефіцієнт варіації середнього арифметичного (відносна величина середньої квадратичної похибки середнього арифметичного)

$$\omega = \frac{S_{\langle x \rangle}}{\langle x \rangle} \cdot 100\% \quad (9)$$

характеризує точність кінцевого результату всієї виборчої сукупності вимірювань.

Для зменшення випадкової похибки результату можуть бути використані два шляхи:

- 1) Поліпшення точності вимірювань, тобто зменшення середньоквадратичної похибки;
- 2) Збільшення числа вимірювань.

Якщо усі можливості вдосконалення вимірювальних приладів вичерпані та систематична похибка вимірювань, що визначається класом точності приладів та іншими обставинами відома й дорівнює δ , то випадкову похибку доцільно зменшувати до тих пір, поки загальна похибка вимірювань не буде повністю визначатися систематичною похибкою. При цьому ширина довірчого інтервалу

$$\Delta x \leq \delta \quad (10)$$

Якщо нема необхідності визначати загальну похибку з точністю 10 %, то умову

$$\Delta x \leq \frac{\delta}{10} \quad (11)$$

можна вважати виконаною.

Слід відмітити, що збільшенням числа вимірювань можна усунути вплив випадкової похибки на результат лише в тому випадку, якщо середня квадратична похибка не більш, ніж в декілька разів перевищує систематичну похибку.

Випадкову похибку Δx можна виразити в долях $S_{\langle x \rangle}$ за допомогою коефіцієнта Стьюдента $t_{\alpha, n}$

$$\Delta x = S_{\langle x \rangle} t_{\alpha, n} \quad (12)$$

Значення $t_{\alpha, n}$ можна отримати з таблиці, що пов'язує число вимірювань n , довірчу вірогідність α та коефіцієнт Стьюдента $t_{\alpha, n}$.

$n \backslash \alpha$	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,8	3,08	1,89	1,64	1,53	1,48	1,44	1,42	1,40	1,38
0,9	6,31	2,92	2,35	2,13	2,02	1,94	1,89	1,86	1,83
0,95	12,7	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,36	2,31	2,26
0,98	31,8	6,96	4,54	3,75	3,36	3,14	3,00	2,90	2,82
0,99	63,7	9,92	5,84	4,60	4,03	3,71	3,50	3,36	3,25

Таким чином, для визначення випадкової похибки Δx виборчої сукупності вимірювань обчислюють виборчу середньоквадратичну похибку середнього арифметичного $S_{\langle x \rangle}$, задаються довірчою вірогідністю α , по таблиці для вибраних n та α знаходять коефіцієнт Стьюдента $t_{\alpha, n}$, а потім обчислюють Δx .

Значення довірчої вірогідності обирають з таким розрахунком, щоб в більш відповідальних випадках мати більшу гарантію того, що похибка не вийде за межі довірчого інтервалу, а в менш відповідальних випадках можна вибрати меншу вірогідність. Відома невизначеність у виборі α не дуже суттєво позначається на величині випадкової похибки, так як, починаючи з деякого значення α , величина Δx змінюється порівняно повільно.

У додатку 1 приведена схема розрахунку випадкових похибок при безпосередніх вимірюваннях.

Для обчислення випадкових похибок при непрямих вимірюваннях можуть виконуватися два основних випадки:

- 1) величина, що цікавить нас, залежить від однієї вимірюваної величини;
- 2) величина, що цікавить нас, залежить від декількох вимірюваних величин.

Загальні правила обчислення похибок для обох випадків можуть бути виведені лише за допомогою диференціальних обчислень.

Якщо вимірювана величина y є функцією декількох змінних x_1, x_2, \dots, x_n , то вираз для випадкової похибки в загальному виді буде мати вигляд

$$\Delta y = \sqrt{\sum_1^n \left(\frac{\partial y_i}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} \quad (13)$$

Якщо $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ та вимірювання дають ряд значень y , то для обчислення середньоарифметичного значення y можна діяти двояким чином.

1. Обчислити $\langle x_i \rangle = \frac{\sum x_i}{n}$, та підставивши це значення до рівняння $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

отримаємо

$$\langle y \rangle = f(\langle x_1 \rangle, \langle x_2 \rangle, \dots, \langle x_n \rangle) \quad (14)$$

2. Для кожного зі значень x_i обчислимо y_i , а з тим визначимо $\langle y \rangle = \frac{\sum y_i}{n}$ (15)

Відповідно двома способами можна визначити й похибку величини y , або, визначивши похибки величин $\langle x_i \rangle$, скористатися співвідношенням (13); або, обчислюючи ряд значень y_i визначити похибку величини y звичайним шляхом, використовуючи схему розрахунку Δy , аналогічну, наведеній у додатку 1 для безпосередніх вимірювань.

Відносно похибку в другому випадку легко отримати, скориставшись співвідношенням

$$E = \frac{\Delta y}{\langle y \rangle} 100\% \quad (16)$$

В першому випадку вираз для відносної похибки E можна отримати, звівши до квадрата величину $\frac{\Delta y}{\langle y \rangle}$

$$\left(\frac{\Delta y}{\langle y \rangle} \right)^2 = \sum_1^n \left(\frac{1}{f(\langle x_1 \rangle, \langle x_2 \rangle, \dots, \langle x_n \rangle)} \cdot \frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2 \quad (17)$$

Так як $\frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial \ln f}{\partial x_i}$, то для відносної похибки отримаємо

$$E = \frac{\Delta y}{\langle y \rangle} = \sqrt{\sum_1^n \left(\frac{\partial \ln f(x_s)}{\partial x_i} \Delta x \right)^2} \quad (18)$$

Таким чином, в першому випадку

$$\Delta y = \langle y \rangle \sqrt{\sum_1^n \left(\frac{\partial f(x)}{\partial x_i} \right)^2} \quad (19)$$

Необхідно відмітити, що при малих у порівнянні з вимірюваною величиною похибках, обидва способи розрахунку похибок дають дуже близькі результати. (див. додаток 2, де наведені розрахунки похибок як для прямих вимірювань (період гармонічних коливань математичного маятника визначається секундоміром), так й похибок непрямих вимірювань (прискорення вільного падіння розраховується за допомогою формули Гюйгенса, що пов'язує довжину маятника L ; прискорення вільного падіння g , період коливань T), що проведені двома способами.

Додаток 1.

Схема розрахунку випадкових похибок при безпосередніх вимірюваннях.

1. Визначити середнє арифметичне значення

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

де n - число вимірювань.

2. Обчислити абсолютні похибки окремих вимірювань Δx_i та їх квадрати $(\Delta x_i)^2$

$$\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle$$

3. Визначити вибірку середньоквадратичну похибку середнього арифметичного

$$S_{\langle x \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 + \dots}{n(n-1)}}$$

4. Обрати довірчу вірогідність α в межах 0,8-0,95

5. По обраному значенню α та для заданого в даній роботі числа вимірювань n з таблиці коефіцієнтів Стюдента визначити $t_{\alpha,n}$

6. Обчислити величину випадкової похибки

$$\Delta \langle x \rangle = t_{\alpha,n} S_{\langle x \rangle}$$

7. Обчислити відносну похибку вимірювань E

$$E = \frac{\Delta \langle x \rangle}{\langle x \rangle} \cdot 100\%$$

8. Кінцевий результат записати в вигляді

$$x = (\langle x \rangle \pm \Delta \langle x \rangle) \text{ одиниці вимірювання, при } \alpha = \dots$$

Додаток 2.

Схема розрахунку випадкових похибок при опосередкованих вимірюваннях

(наведена схема розрахунку справедлива лише для першого способу обчислення випадкових похибок).

1. Обчислити середнє арифметичне значення величини $\langle y \rangle$

$$\langle y \rangle = f(\langle x_1 \rangle, \langle x_2 \rangle, \dots, \langle x_n \rangle)$$

знайшовши попередньо середнє арифметичне значення всіх вимірюваних змінних $\langle x_i \rangle$.

2. Обчислити випадкову похибку

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y_i}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}$$

для чого провести розрахунок Δx для всіх змінних, попередньо задавши α та визначивши з таблиці коефіцієнт Стюдента $t_{\alpha,n}$

$$\Delta x = t_{\alpha,n} S_{\langle x \rangle} = t_{\alpha,n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)}}$$

3. Знайти відносну похибку по формулі

$$E = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \ln f(x_s)}{\partial x_i} \Delta x \right)^2} \cdot 100\%$$

4. Записати остаточний результат у кінцевому вигляді

$$y_{\text{ист}} = \langle y \rangle \pm \Delta y \quad \text{при } \alpha = \dots$$

Приклад розрахунку похибок при прямих вимірюваннях періоду коливань математичного маятника (таблиця 2) та непрямих вимірюваннях прискорення вільного падіння g (таблиця 3) двома способами наведені нижче.

Таблиця 2.

	T	$\langle T \rangle$	ΔT_i	ΔT_i^2	$S_{\langle T \rangle}$	α	$t_{\alpha,n}$	ΔT	E
1	3,43	3,44	$-1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,26 \cdot 10^{-2}$	0,9	1,94	$2,44 \cdot 10^{-2}$	2
2	3,41		$-3 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-4}$					
3	3,5		$6 \cdot 10^{-2}$	$36 \cdot 10^{-4}$					
4	3,4		$-4 \cdot 10^{-2}$	$16 \cdot 10^{-4}$					
5	3,45		$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-4}$					
6	3,44		0	0					
7	3,42		$-2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-4}$					

$l=2,95$ м

Таблиця 3.

	g	$\langle g \rangle$	Δg_i	Δg_i^2	$S_{\langle g \rangle}$	α	$t_{\alpha,n}$	Δg	E
1	9,88	9,86	$2 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$7,02 \cdot 10^{-2}$	0,9	1,94	$13,61 \cdot 10^{-2}$	1,38
2	10,0		$14 \cdot 10^{-2}$	$196 \cdot 10^{-4}$					
3	9,5		$36 \cdot 10^{-2}$	$1296 \cdot 10^{-4}$					
4	10,06		$20 \cdot 10^{-2}$	$400 \cdot 10^{-4}$					
5	9,77		$9 \cdot 10^{-2}$	$81 \cdot 10^{-4}$					
6	9,83		$3 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-4}$					
7	9,95		$9 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-4}$					

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \rightarrow g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$$

Так як $l=2,95$ м, то $g=116,34/T^2$.

$$\Delta T = \sqrt{\frac{\sum \Delta T_i^2}{n(n-1)}} \cdot t_{\alpha,n} = 2,44 \cdot 10^{-2} \text{ (с)}$$

$$\Delta g = \frac{116,34 \cdot 2 \cdot \Delta T}{\langle T \rangle^3} = 0,138; \quad E=1,41\%$$

$$g_{\text{вст}} = \langle g \rangle \pm \Delta g = (9,86 \pm 0,14) \text{ м/с}^2 \quad \text{при } \alpha=0,9$$

Гаркуша Ігор Павлович
Барташевська Людмила Іванівна
Зайцев Анатолій Семенович
Мандрікевич Василь Миколайович

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ФІЗИКИ
(ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ)

Літературний редактор:

Подп. до друку _____ Формат А5 Папір печат.
Усл. печат. лист. _____ Усл. изд. лист. _____ Тираж _____
Замовлення № _____

РІО НГУ Цех оперативної печатки

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
49005, м Дніпро, просп. Яворницького, 19