

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ЗАГАЛЬНА ФІЗИКА

ЕЛЕКТРИКА ТА МАГНЕТИЗМ.

Методичні вказівки до лабораторних робіт.

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за природничими і технічними спеціальностями*

Укладачі: А.М. Цюпа, Е.В. Лук'яненко, Ю.Б. Скирта.

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО
2024

УДК 537.8 (075.8)

Ц98

Укладачі: Цюпа Андрій Митрофанович, старший викладач
Лук'яненко Едуард Васильович, старший викладач
Скирта Юрій Борисович, асистент

Рецензент: О.В. Матвійчук, кандидат педагогічних наук, доцент кафедри загальної фізики та моделювання фізичних процесів КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор: Ю.І Гусева, доктор філософії, старший викладач кафедри загальної фізики КПІ ім. Ігоря Сікорського

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 8 від 20.06.2024 р.)
за поданням Вченої ради фізико-математичного факультету
(протокол № 7 від 22.05.2024 р.)*

Ц98 Загальна фізика. Електрика та магнетизм. Методичні вказівки до лабораторних робіт.
[Електронний ресурс] інструкції до лабораторних робіт : навч. посіб. для здобувачів
ступеня бакалавра за природничими і технічними спеціальностями / КПІ ім. Ігоря
Сікорського ; уклад.: А.М.Цюпа., Е.В.Лук'яненко, Ю.Б.Скирта – Електрон. текст. дані
(1файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 29с.

У навчальному посібнику викладено теоретичні відомості, опис лабораторних робіт з розділу «Електрика та магнетизм», наведено методичні вказівки до виконання цих робіт. Посібник призначений для студентів, які навчаються у закладах вищої освіти і вивчають нормативну навчальну дисципліну «Загальна фізика» з циклу математичної та природничо-наукової підготовки за спеціальністю «144. Теплоенергетика». Посібник може бути корисним для науково-педагогічних працівників, які викладають курс фізики, під час планування та підготовки завдань до лабораторних робіт та модульних контрольних робіт з курсу загальної фізики.

УДК 537.8 (075.8)

Реєстр. № 23/24 - 563. Обсяг 1.3 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056

<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024

Передмова.

Ці методичні вказівки містять опис чотирьох робіт лабораторного практикуму з електрики і магнетизму для лабораторних установок, виготовлених у різні роки на кафедрі загальної фізики НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Кожна лабораторна робота містить теоретичні відомості, опис експериментальної установки, вказівки щодо виконання роботи і обробки результатів вимірювань, контрольні запитання та рекомендовані літературні джерела, список яких наведений у кінці методичних вказівок. Описи робіт не претендують на те, щоб повністю ознайомити студентів з фізичними явищами, які розглядаються у цих роботах. Таке ознайомлення можливе у разі систематичної роботи над лекційним матеріалом та опрацюванні рекомендованих підручників. У описах надається лише той мінімум інформації, без якої неможливий послідовний виклад методики експерименту та свідоме виконання лабораторної роботи.

Основою видання є навчальний посібник «Фізика. Електрика і магнетизм. Лабораторні роботи», який був написаний колишнім завідувачем кафедри загальної та експериментальної фізики КПІ проф. В.П. Черкашиним та виданий у 1986 році видавництвом «Вища школа». Зміст посібника доповнено і перероблено з урахуванням змінених у діючому практикумі лабораторних установок та методики деяких експериментів.

Укладачі сподіваються, що це видання буде корисним для студентів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів під час виконання лабораторних робіт у практикумі з електромагнетизму.

Лабораторна робота № 2-2(1)

Визначення ЕРС методом компенсації

Мета роботи: ознайомитись з компенсаційним методом вимірювання електрорушійної сили джерела струму.

Теорія методу.

Як Ви знаєте, основною характеристикою джерела струму є його електрорушійна сила (ЕРС), що дорівнює відношенню роботи сторонніх сил A_c по переміщенню позитивного заряду q у замкненому колі до величини цього заряду :

$$\varepsilon = A_c/q; \quad [\varepsilon] = \text{В}. \quad (1)$$

ЕРС можна також визначити через напруженість поля сторонніх сил $E_{\text{ст}}$, які діють в електричному колі, користуючись такою формулою : $\varepsilon = \oint E_{\text{ст}} dl$.

Для вимірювання ЕРС джерела струму методом компенсації використовується експериментальна установка, схема якої зображена на рис. 1, де: $\mathcal{E}$, $\mathcal{E}_N$, $\mathcal{E}_x$ – стабілізоване, еталонне та досліджуване джерела струму, R – реохорд з рухомим контактом C , R_d – обмежувальний опір, Γ – гальванометр, Π – перемикач для почергового увімкнення в коло еталонного (нормального) елемента $\mathcal{E}_N$ та елемента з невідомою ЕРС $\mathcal{E}_x$. Особливість цього методу полягає у відсутності струму в колі джерела під час вимірювання. Основою методу є порівняння ЕРС досліджуваного елемента з відомим падінням напруги на ділянці кола.

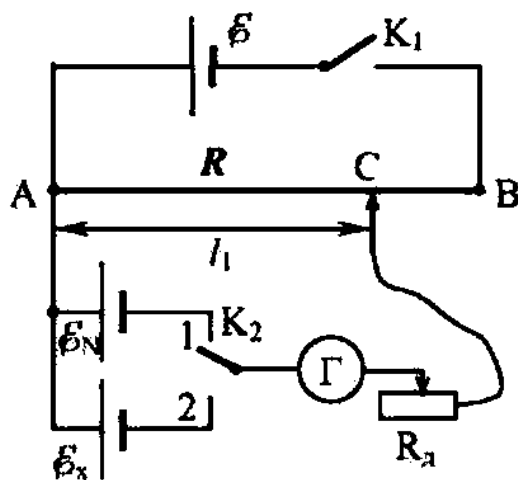


Рис.1.

Як видно зі схеми на рис. 1, усі джерела струму вмикаються у коло в точці А однойменними полюсами і, отже, джерела з ЕРС $\mathcal{E}$ та $\mathcal{E}_x$ (або $\mathcal{E}_N$) будуть увімкнені назустріч одне одному. Гальванометр Г показує силу струму, який протікає через нормальний елемент $\mathcal{E}_N$ або досліджуваний гальванічний елемент $\mathcal{E}_x$ в залежності від положення перемикача П. Враховуючи, що ЕРС елементів $\mathcal{E}_x$ та $\mathcal{E}_N$ має бути меншою, ніж падіння напруги на усій довжині реохорда АВ, можна знайти таке положення рухомого контакту C_1 на дротині реохорда, при якому сила струму через гальванометр буде рівною нулю.

За другим законом Кірхгофа для контуру $A\mathcal{E}_xR_dCA$ можна записати рівняння:

$$I_\Gamma(r_x + R_d + R_\Gamma) - IR_1 = -\mathcal{E}_x, \quad (2)$$

де r_x – внутрішній опір джерела $\mathcal{E}_x$, R_1 – опір ділянки реохорда, R_Γ – опір гальванометра. За умови $I_\Gamma = 0$, можна записати: $I \cdot R_1 = \mathcal{E}_x$.

Отже, падіння напруги, створене стабілізованим джерелом струму $\mathcal{E}$ на ділянці AC_1 , компенсує ЕРС досліджуваного елементу $\mathcal{E}_x$.

Замінивши досліджуваний елемент $\mathcal{E}_x$ на еталонний $\mathcal{E}_N$ та переміщуючи контакт С, можна визначити інше положення рухомого контакту C_0 , при якому сила струму через гальванометр знову буде дорівнювати нулю, і тоді: $I \cdot R_0 = \mathcal{E}_N$.

Оскільки в обох випадках струм у колі гальванометра відсутній, то сила струму на ділянці АВ реохорда буде однаковою. Тоді: $\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_N \cdot (R_1/R_0)$. Враховуючи, що опір дротини реохорда пропорціональний її довжині, остаточно отримаємо:

$$\mathcal{E}_x = \frac{l_1}{l_N} \mathcal{E}_N \quad (3)$$

де: l_1 та l_N - довжини ділянок AC_1 та AC_0 у розглянутих двох випадках.

У лабораторній установці дротина реохорду АВ натягнута на лінійку, по шкалі якої можна відраховувати довжини l_1 та l_N . У коло гальванометра вмикається також обмежувальний опір R_d , який оберігає прилад від

перевантаження унаслідок протікання великих струмів при відсутності компенсації.

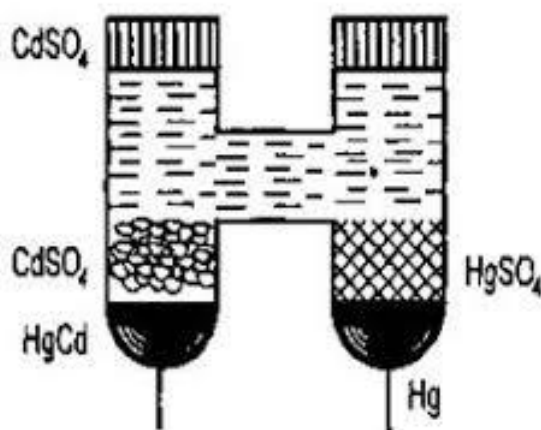


Рис.2

У якості еталона ЕРС у роботі використовується ртутно-кадмієвий нормальний елемент Вестона (рис. 2). Він складається з скляної посудини, що має форму літери Н, у нижній частині якої розміщені платинові електроди. Позитивним полюсом є ртуть, а негативним - 12,5% амальгама кадмію. Електролітом є водний розчин сульфату кадмію CdSO_4 , а деполаризатором сульфат закису ртуті Hg_2SO_4 . ЕРС такого елементу є сталою величиною, яка майже не змінюється у часі. При температурі $t_0 = 20^\circ \text{C}$ його ЕРС: $\mathcal{E}_N = 1,01836 \text{ В}$.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з експериментальною установкою для вимірювання ЕРС методом компенсації, зібраною за схемою, зображеною на рис. 1.
2. Поставити перемикач П у нейтральне положення і встановити рухомий контакт реохорда поблизу центра лінійки.
3. Встановити максимальне значення обмежувального опору $R_d = 50 \text{ кОм}$ і увімкнути вимикач В.
4. За допомогою перемикача П увімкнути еталонне джерело ЕРС (нормальний елемент) $\mathcal{E}_N$ та переміщенням рухомого контакту домогтись відсутності струму в колі гальванометра. Зменшуючи обмежувальний опір до

мінімального значення, точніше встановити положення рухомого контакту по лінійці реохорда ($AC = l_N$) при нульовому струмі гальванометра. Вимірювання повторити 3 - 5 разів, записуючи їх результати до табл. 2.

5. За допомогою перемикача П увімкнути досліджуваний гальванічний елемент $\mathcal{E}_x$ та повторити вимірювання, вказані у п. 4.

6. За формулою (3) визначити ЕРС досліджуваного елемента для кожного з дослідів, а також обчислити середнє значення ЕРС та похибку її вимірювання.

Табл.2.

п	l_1 , мм	l_N , мм	$\mathcal{E}_N$, В	$\mathcal{E}_x$, В
1.				
2.				
3.				

Контрольні запитання.

1. Що таке ЕРС джерела струму?
2. Що таке сторонні сили та де вони використовуються?
3. Які закони постійного струму Ви знаєте?
4. Які експериментальні методи вимірювання ЕРС Ви знаєте?
5. У чому полягає метод компенсації для вимірювання ЕРС?
6. Яка будова нормального елемента?
7. Яке призначення опору R_d у колі гальванометра?
8. Які переваги та недоліки методу компенсації в порівнянні з іншими методами вимірювання ЕРС?

Лабораторна робота № 2.10(1).

Визначення питомого заряду електрона методом Томсона

Мета роботи: Ознайомитись з методом визначення питомого заряду частинок на основі компенсації відхилень при одночасній дії на них взаємно перпендикулярних електричного та магнітного полів і виміряти питомий заряд електрона.

Теорія методу.

Питомим зарядом називають фізичну величину, яка дорівнює відношенню електричного заряду деякої частинки до її маси. Ця величина використовується в електродинаміці заряджених частинок, зокрема у електронній оптиці. У таких задачах найчастіше зустрічається питомий заряд електрона, для експериментального визначення якого існує багато методів, один з яких був запропонований відомим англійським фізиком Дж. Томсоном у 1897 році. У цьому методі використовується електронно-променева трубка, яка схематично представлена на рис.1, подібна до осцилографічної, у якій електронний пучок може відхилятися у вертикальному напрямі за допомогою вертикально напрямленого електричного поля або горизонтально напрямленого магнітного поля. Обидва поля діють на відстані l (рис. 2), що дорівнює довжині відхиляючих пластин електронно-променевої трубки, які знаходяться на відстані L від флуоресцентного екрану E . Електрони, що виходять з нагрітого катода K , прискорюються та фокусуються циліндричним анодом A завдяки прикладеній між катодом і анодом напрузі U_a , яка надає електронам початкову швидкість v_0 . Сфокусований потік електронів, пройшовши відхиляючу систему, потрапляє на флуоресцентний екран, викликаючи його свічення. Якщо на відхиляючі пластини, що мають форму плоского конденсатора, подати напругу, то слід пучка на екрані зміститься у вертикальному напрямі на деяку відстань h . Обчислимо це зміщення.

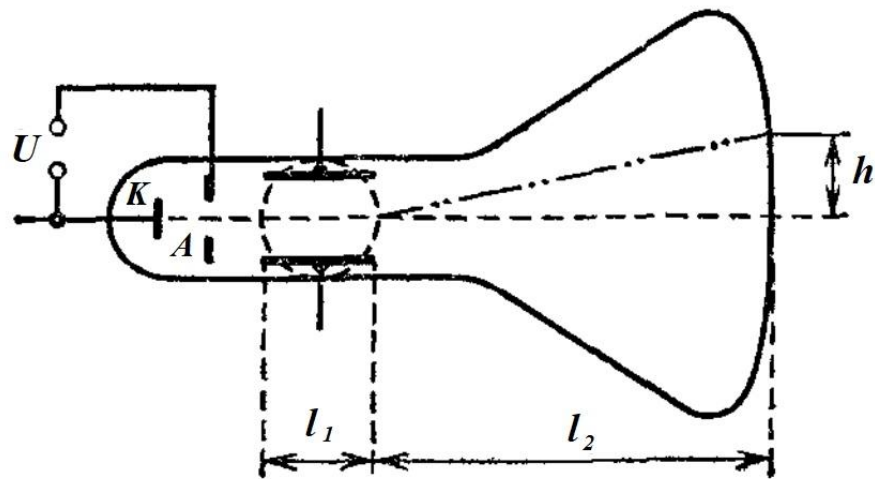


Рис.1.

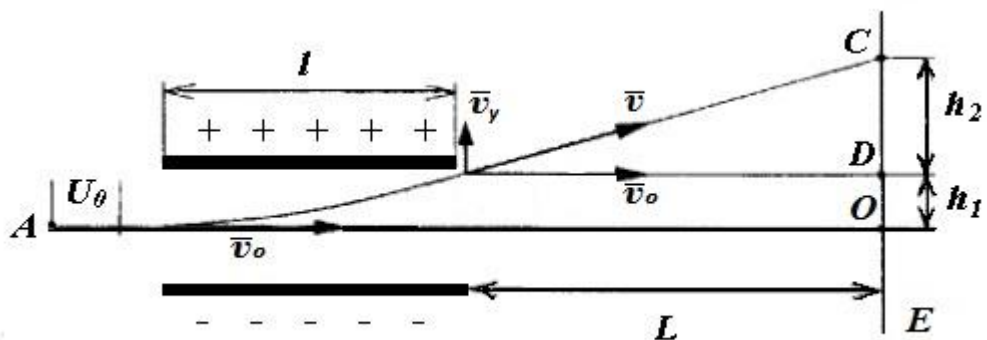


Рис.2.

Розглянемо вузький пучок електронів, який за відсутності відхиляючого поля потрапляє на екран у точку О. При подачі відхиляючої напруги на пластини створюється однорідне електричне поле, перпендикулярне до напрямку руху електронів, яке діє на відстані довжиною l . На кожний електрон у пучку в електричному полі діє сила $\vec{F}=e\vec{E}$, яка надає йому постійне за величиною та напрямом прискорення $a_y = \frac{e}{m} E$. Електрон рухається у електричному полі протягом часу $t = \frac{l}{v_0}$, за який він зміщується на відстань

$$h_1 = \frac{a_y t^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{e}{m} \left(\frac{l}{v_0}\right)^2 E$$

і отримує перпендикулярну до v_0 складову швидкості $v_y = \frac{e}{m} \frac{l}{v_0} E$.

Після проходження пластин електрон рухатиметься прямолінійно під деяким кутом α до напрямку швидкості v_0 . Тангенс цього кута : $\text{tg}(\alpha) = \frac{v_y}{v_0} = \frac{e}{m} \frac{l}{v_0^2} E$.

Тоді після проходження пластин електрон додатково зміщується на відстань :

$$h_2 = L \tan(\alpha) = \frac{v_y * L}{v_0} = \frac{e l * L}{m v_0^2} E$$

Отже, повне зміщення електронів під дією електричного поля дорівнює:

$$h = h_1 + h_2 = \frac{e}{m} \frac{l}{v_0^2} \left(\frac{l}{2} + L \right) E \quad (1)$$

Для визначення v_0 Томсон запропонував в області відхиляючих пластин електронно-променевої трубки, де діє електричне поле, створити одночасно і магнітне поле, перпендикулярне до електричного та до початкової швидкості електронів v_0 , яке відхилятиме електрони у тій самій площині, що і електричне. Напрямок магнітного поля обирається так, щоб пучок електронів відхилявся у бік, протилежний його відхиленню в електричному полі, а індукція магнітного поля B має бути такою, щоб вертикальна складова сили Лоренца, діючої на електрони у магнітному полі, дорівнювала електричній силі: $eE = ev_0B$. За цих умов пучок електронів у трубці не буде відхилятися, тобто потрапить у початкову точку O на екрані. З умови рівності електричної та магнітної сил можна записати:

$$v_0 = \frac{E}{B} = \frac{U}{\mu \mu_0 H d}$$

Враховуючи, що $\mu = 1$, а магнітне поле створюється соленоїдом, отже $H = nI$, отримаємо:

$$v_0 = \frac{U}{\mu_0 n I d} \quad (2)$$

де: I – сила струму у соленоїді, n – число витків соленоїду на одиницю його довжини, d – відстань між відхиляючими пластинами електронно-променевої трубки. Після підстановки виразу для v_0 у формулу (1) та враховуючи, що напруженість поля $E = \frac{U}{d}$, отримаємо :

$$\frac{e}{m} = \frac{v_0^2 h}{l(L + \frac{1}{2}l)E} = \frac{1}{\mu_0^2 n^2 l(L + \frac{1}{2}l)d} \frac{U}{I^2} h = k \frac{U}{I^2} h \quad (3)$$

де: $k = \frac{1}{\mu_0^2 n^2 l (L + \frac{1}{2}l) d}$ - стала приладу, що залежить від його параметрів, які вказані на передній панелі експериментальної установки. Отже, після вимірювання величин U , I та h , знаючи сталу приладу k , за формулою (3) можна обчислити питомий заряд електрона.

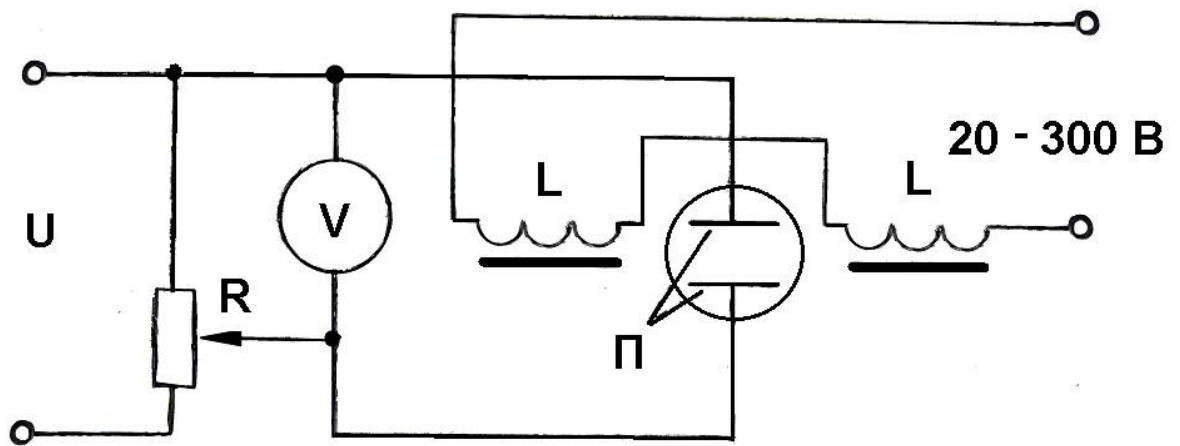


Рис.3.

Експериментальна установка для вимірювання питомого заряду електрона методом Томсона зібрана на базі серійного осцилографа з електростатичним відхиленням променя. Постійна напруга U подається на відхиляючі пластини Π електронно-променевої трубки (рис.3) від внутрішнього блоку живлення осцилографа, а її величина регулюється потенціометром R і вимірюється вольтметром V , розміщеним на передній панелі установки. Магнітне поле створюється у тій самій області простору, що і електричне, за допомогою двох котушок L , розміщених зовні електронно-променевої трубки. Живлення котушок відбувається від окремого блоку, у якому передбачена можливість регулювання сили струму через котушки. Ручка регулятора сили струму та міліамперметр для його вимірювання також розміщені на передній панелі установки.

Порядок виконання роботи

1. Встановити ручки потенціометра і регулятора струму на мінімальні значення, увімкнути установку в мережу та дати їй прогрітись 5 – 10 хв., після чого встановити слід електронного пучка у центр екрану.
2. Обертаючи ручку потенціометра R, подати на пластини П напругу такої величини, щоб світлова точка на екрані осцилографічної трубки змістилась від центру на відстань 5 – 10 мм. Величину зміщення h і відповідну йому напругу U записати у табл. 1.
3. Обертаючи ручку регулятора сили струму, встановити такий струм у котушках L, щоб світлова точка на екрані повернулась до початкового положення у центрі цього екрану. Величину сили струму I записати у табл.1.
4. Повторити вимірювання, описані у пп. 2-3, 4 – 5 разів, змінюючи величину зміщення h сліду електронного променя на екрані.

Табл.1.

n	h , мм	U , В	I , А	U/I^2 , В/А ²	e/m , Кл/кг
1					
2					
3					
4					

Обробка результатів вимірювань

1. Обчислити сталу приладу k за формулою (3).
2. Користуючись даними табл. 1, визначити за формулою (3) питомий заряд електронів для кожного з дослідів.
3. За даними усіх дослідів визначити середнє значення питомого заряду електрона та похибку його вимірювання.
4. Користуючись формулою (2), визначити за даними одного з дослідів середню швидкість електронів у пучку.

Контрольні запитання

1. Що таке сила Лоренца?
2. Якою траєкторією рухатиметься заряджена частинка, що влітає в однорідне магнітне поле?
3. Як виводиться рівняння траєкторії руху зарядженої частинки в однорідному електричному полі якщо початкова швидкість частинки перпендикулярна до силових ліній поля?
4. Як обчислити зміщення зарядженої частинки при її русі в однорідному електричному полі?
5. Що таке питомий заряд та які методи його визначення Ви знаєте?
6. У чому полягає метод Томсона визначення питомого заряду електрона?
7. Як побудовано прилад для вимірювання питомого заряду електрона методом Томсона?
8. Яка будова та принцип дії електронно-променевої трубки?

Лабораторна робота № 2-12 (1)

Вимірювання індукції магнітного поля електромагніту

Мета роботи: Ознайомитись з балістичним методом визначення індукції магнітного поля та виміряти індукцію магнітного поля електромагніту і дослідити її залежність від сили намагнічуючого струму.

Теорія методу.

Як відомо з шкільного курсу фізики, при протіканні струму по провіднику навколо нього існує силове поле, яке називають магнітним. Його дія призводить до виникнення сил, що діють на інші провідники зі струмом (сила Ампера) або на рухомі заряджені частинки (сила Лоренца). Силовою характеристикою магнітного поля є вектор магнітної індукції B , величина якої залежить від сили струму у провіднику, його форми та розмірів, а також від відстані до точки спостереження. Для провідників простої геометричної форми, що не знаходяться у феромагнітному середовищі, індукцію цього поля у деякій точці можна обчислити, вимірявши силу струму. Наприклад, для довгого лінійного провідника, що знаходиться у повітрі, у точці на відстані r від нього індукція магнітного поля дорівнює:

$$B = \mu_0 I / 2\pi r,$$

де: I – сила струму у провіднику, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна стала.

Для достатньо довгого соленоїда: $B = \mu_0 n I$,

де: n – кількість витків на одиницю довжини соленоїда.

Зрозуміло, що для провідників складної форми або при наявності феромагнітного середовища простіше використовувати один з методів безпосереднього вимірювання індукції магнітного поля. У даній лабораторній роботі для підсилення магнітного поля, створеного електромагнітом, його котушки мають осердя з феромагнітного матеріалу, для якого магнітна проникність μ залежить від напруженості магнітного поля H , і, отже, від сили струму I , що протікає по обмоткам електромагніту.

Виміряти магнітну індукцію B у проміжку між полюсами електромагніту можна, використовуючи явище електромагнітної індукції, яке

полягає у виникненні ЕРС індукції у контурі при зміні магнітного потоку через цей контур.

Магнітний потік Φ , створений однорідним магнітним полем, дорівнює: $\Phi = B S \cos \beta$, де: S – площа контуру; β – кут між вектором B і перпендикуляром до площини контуру. Згідно з основним законом електромагнітної індукції, ЕРС індукції у контурі дорівнює швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, обмежену цим контуром, взятій з протилежним знаком: $\mathcal{E}_i = - d\Phi/dt$. У досліджуваному магнітному полі, створеному між полюсами електромагніту, розміщено невелику вимірювальну котушку, з'єднану з балістичним гальванометром. Цю котушку разом з приєднаним гальванометром називають флюксометром. Під час вимірювання котушку флюксометра орієнтують перпендикулярно до напрямку ліній магнітної індукції і тоді магнітний потік через котушку дорівнює: $\Phi = BSN$, де S – площа одного витка котушки; N – число її витків; B – індукція магнітного поля. Якщо вимірювальну котушку повернути на 90° або вимкнути магнітне поле, то магнітний потік через неї стане рівний нулю. Тоді при зміні магнітного потоку через котушку у ній виникає ЕРС індукції:

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt} = - NS \frac{dB}{dt}$$

Унаслідок цього через вимірювальну котушку буде протікати короткотривалий струм $I = - \frac{NS}{R} \frac{dB}{dt}$, де R – активний опір усього кола флюксометра. Отже, при вимкненні магнітного поля за час зміни індукції від B до 0 через гальванометр пройде кількість електрики:

$$q = - \frac{NS}{R} \int_B^0 dB = \frac{NS}{R} B$$
$$\text{або: } B = \frac{Rq}{NS} \quad (1)$$

Заряд q можна визначити за відомою балістичною сталою гальванометра b :

$$q = b \varphi_m = \frac{b}{2l} n_m$$

де: φ_m – кут максимального відхилення світлового штриха гальванометра,

n_m – його максимальне відхилення на шкалі, l – відстань від дзеркала гальванометра до шкали.

$$\text{Тоді: } B = \frac{Rb}{2NSl} n_m = \beta n_m \quad (2)$$

де: $\beta = \frac{Rb}{2NSl}$ – стала величина для даної експериментальної установки.

Числове значення β можна обчислити, знаючи технічні дані установки: R , b , N , S , l , які вказані безпосередньо на самій установці.

Опис експериментальної установки

Електрична схема установки для вимірювання індукції магнітного поля між полюсами електромагніту зображена на рис. 1. Живлення обмоток досліджуваного електромагніту здійснюється від випрямляча ВСА – 111, який дозволяє отримувати струм силою до 10 А при напрузі до 60 В. Вихідну напругу джерела струму, а отже і силу струму навантаження, можна плавно регулювати в межах двох діапазонів («І ст.» або «ІІ ст.»), які обираються за допомогою перемикача «Режим роботи». Встановлений на корпусі випрямляча амперметр дозволяє вимірювати струм, що протікає через обмотки електромагніту.

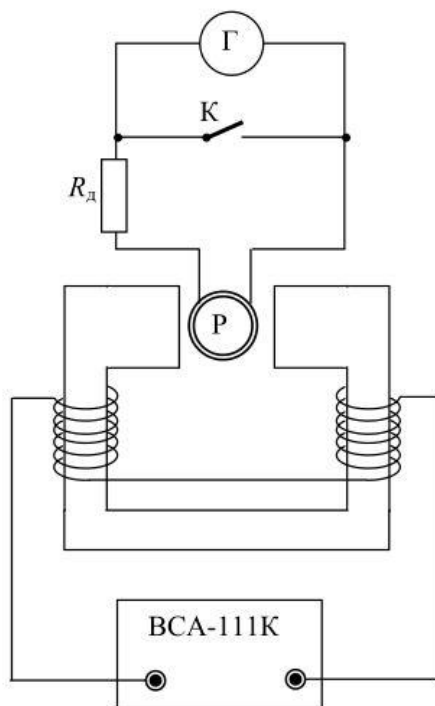


Рис.1.

Електромагніт являє собою феромагнітний магнітопровід з повітряним проміжком, на якому розміщені намагнічуючі котушки L . У щілині електромагніту на немагнітному кронштейні встановлена рамка флюксметра P та змонтований додатковий опір R_d , який забезпечує необхідний режим роботи гальванометра. Ключ K використовується для гасіння коливань рухомої частини балістичного гальванометра G . Нагадаємо, що балістичний гальванометр – це дзеркальний прилад магнітоелектричної системи з штучно збільшеним моментом інерції рухомої частини, завдяки чому він може вимірювати заряд, що протікає через рамку приладу в короткочасному імпульсі струму, який виникає при зміні магнітного потоку через котушку флюксметра. Ця зміна здійснюється вимиканням струму, що живить обмотки електромагніту, за допомогою перемикача «Режим роботи» випрямляча ВСА – 111.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути балістичний гальванометр і встановити світловий штрих у центр шкали.
2. Встановити перемикач «РЕЖИМ РОБОТИ» у положення «ВІДКЛ.» (середня позиція), а ручку плавного регулювання вихідної напруги на мінімальне значення. Увімкнути випрямляч у мережу та дати йому прогрітись 5 хв.
3. Увімкнути перемикач у положення « I ст. » і з допомогою плавного регулятора напруги встановити силу струму в обмотках електромагніту рівною 1 А.
4. Вимкнути випрямляч, повернувши перемикач у положення «ВІДКЛ.», одночасно зафіксувавши величину n_m максимального відхилення світлового штриха на шкалі гальванометра. Повторити дослід з визначенням n_m 3 – 5 разів для того самого значення намагнічуючого струму $I = 1$ А, обчислити середнє значення $\langle n_m \rangle$ та записати отримані результати у табл. 1.
5. Повторити вимірювання, описані у пп. 3 – 4, для 8 – 10 різних значень намагнічуючого струму через інтервал в 1 А та записати результати у табл.1.

Табл.1.

I, A										
n_m										
$\langle n \rangle$										
$B, Tл$										

Обробка результатів вимірювань

1. За формулою : $\beta = \frac{Rb}{2NSl}$ обчислити коефіцієнт β .
2. Використовуючи середні значення величин $\langle n_m \rangle$ з табл. 1, визначити індукцію B магнітного поля у щілині електромагніту для різних значень намагнічуючого струму I та записати отримані результати у цю таблицю.
3. Побудувати графік залежності $B = f(I)$.

Контрольні запитання

1. Що таке магнітне поле? Які величини називають напруженістю та індукцією магнітного поля і як вони зв'язані між собою?
2. Як відбувається намагнічування магнетиків? Який фізичний зміст має вектор намагнічування?
3. Як сформулювати теорему про циркуляцію вектора індукції магнітного поля? Які властивості магнітних полів?
4. Які існують види магнетиків? Що таке магнітна сприйнятливість і магнітна проникність магнетиків?
5. Що таке феромагнетики і які їх властивості Ви знаєте? Як пояснюється природа феромагнетизму?
6. У чому полягає явище електромагнітної індукції? Як виводиться закон Фарадея для ЕРС індукції?
7. Які фізичні основи методу визначення індукції магнітного поля у даній роботі?

8. Що таке балістичний гальванометр і чим він відрізняється від звичайного гальванометра? Що таке балістична стала?
9. Як виводиться формула для визначення індукції B за відхиленням рамки гальванометра?
10. Поясніть фізичні основи дії ключа K , увімкненого паралельно гальванометру.

Лабораторна робота № 2.13 (1)

Дослідження вільних згасаючих коливань у контурі

Мета роботи: ознайомитись з роботою генератора релаксаційних коливань та дослідити основні характеристики згасаючих коливань у коливальному контурі.

Теорія методу.

Як відомо з шкільного курсу фізики, електромагнітні коливання можуть відбуватись у системі, що називається коливальним контуром, яка складається з послідовно з'єднаних конденсатора C , котушки індуктивності L та резистора R (рис. 1). Якщо у такому контурі від зовнішнього джерела $\mathcal{E}$ зарядити конденсатор C , то цей конденсатор почне розряджатись через котушку індуктивності L . При цьому у котушці виникатиме ЕРС самоіндукції, унаслідок чого конденсатор C після повного розряду почне перезаряджатись і далі процес буде повторюватись. В результаті у контурі виникнуть електромагнітні коливання, період яких при нехтовно малому опорі R можна визначити за формулою Томсона: $T = 2\pi \sqrt{LC}$.

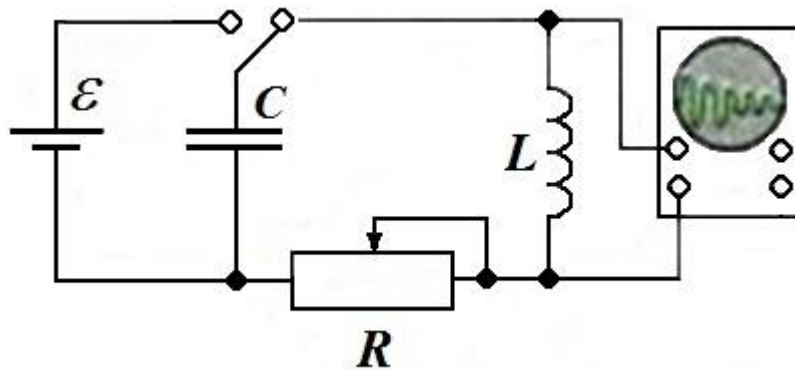


Рис. 1.

Під час електромагнітних коливань у контурі енергія електричного поля зарядженого конденсатора переходить в енергію магнітного поля котушки зі струмом, а потім, при перезаряді конденсатора, енергія магнітного поля котушки переходить в енергію електричного поля конденсатора. Якщо припустити, що активний опір коливального контуру $R = 0$, то коливання

будуть незгасаючими і повна енергія цього контуру, яка складається з суми енергій електричного та магнітного полів, залишатиметься сталою:

$$W = \frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2} = \frac{1}{2} C(U_m)^2 = \frac{1}{2} L(I_m)^2$$

Однак у реальному контурі його активний опір не дорівнює нулю і тому завжди існують втрати електричної енергії на нагрівання провідників. У результаті в такому контурі амплітуда коливань буде поступово зменшуватись і, отже, у ньому відбуватимуться згасаючі коливання (рис. 2).

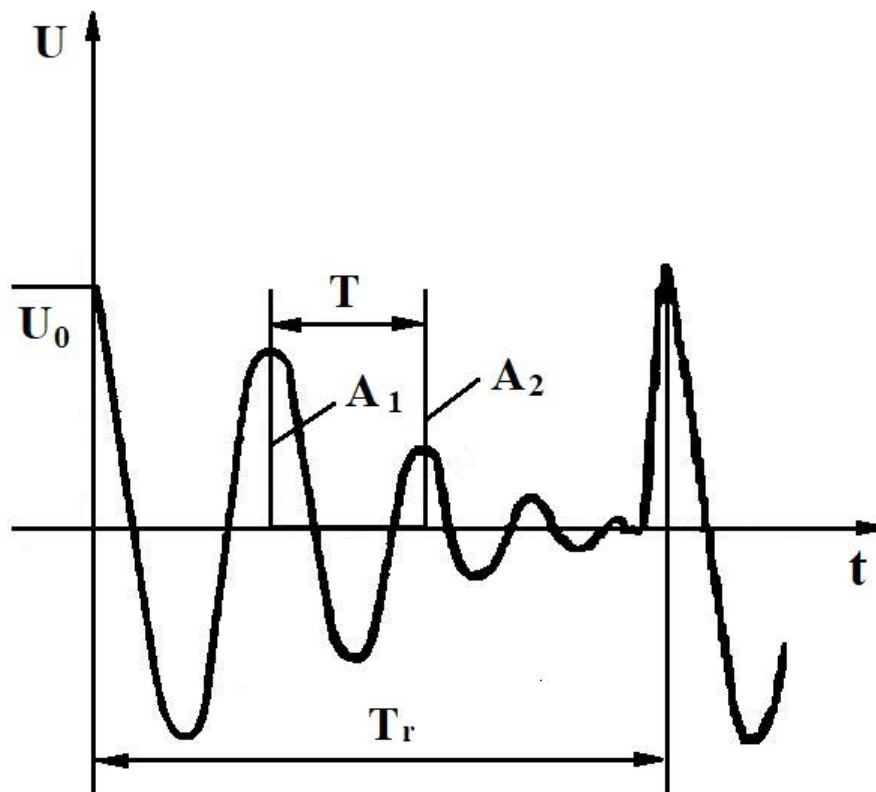


Рис.2.

Формально конденсатор у коливальному контурі еквівалентний джерелу струму, ЕРС якого у кожний момент часу дорівнює напрузі на обкладках цього конденсатора. Тому за другим законом Кірхгофа можна записати:

$$U + \mathcal{E}_L = iR \quad (1)$$

За основним законом електромагнітної індукції: $\mathcal{E}_L = -L \frac{di}{dt}$.

Беручи до уваги, що струм протікає у додатному напрямі при зменшенні заряду конденсатора, отримаємо: $i = -\frac{dq}{dt}$.

Ураховуючи, що $q=CU$ та використовуючи записані формули, маємо:

$$i = -C \frac{dU}{dt}$$
$$\varepsilon_L = LC \frac{d^2 U}{dt^2}.$$

Після підстановки цих співвідношень до рівняння (1), отримаємо:

$$LC \frac{d^2 U}{dt^2} + RC \frac{dU}{dt} + U = 0$$

або :

$$\frac{d^2 U}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dU}{dt} + \frac{U}{LC} = 0 \quad (2)$$

Нагадаємо, що величину $\beta = \frac{R}{2L}$ називають коефіцієнтом згасання, а

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – власною частотою коливань контура. Тоді:

$$\frac{d^2 U}{dt^2} + 2\beta \frac{dU}{dt} + \omega_0 U = 0 \quad (3)$$

Це рівняння згасаючих коливань у контурі, розв'язок якого за умови слабого згасання $\beta^2 < (\omega_0)^2$, має вигляд:

$$U = U_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha), \quad (4)$$

де: $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$ – циклічна частота згасаючих коливань.

Тоді період згасаючих коливань:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}} \quad (5)$$

Отже, у контурі можливі згасаючі коливання тільки у тому випадку, коли

$\frac{1}{LC} > \left(\frac{R}{2L}\right)^2$ або $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$. Якщо $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, то частота і період уявні, коливань немає та відбуватиметься аперіодичний розряд конденсатора.

Опір $R_k = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ називають критичним.

Для характеристики процесу згасання коливань, крім коефіцієнту згасання β , використовують також логарифмічний декремент згасання λ , який визначається через натуральний логарифм відношення значень напруг, розділених інтервалом часу, що дорівнює періоду коливань:

$$\lambda = \ln (A(t)/A(t+T)).$$

Враховуючи, що $A(t) = U_0 e^{-\beta t}$ та $A(t+T) = U_0 e^{-\beta(t+T)}$, отримаємо $\lambda = \beta T$, або:

$$\lambda = \frac{R}{2L} \cdot \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - (\frac{R}{2L})^2}} \quad (6)$$

Зі схеми експериментальної установки, зображеної на рис. 6, можна побачити, що повний опір коливального контуру R дорівнює сумі опорів котушки r_K та результуючого додаткового опору R_D : $R = r_K + R_D$, отже:

$$\lambda = ((r_K + R_D) / 2L) T. \quad (6 \text{ а})$$

Тому, якщо побудувати графік залежності логарифмічного декременту згасання λ від додаткового опору R_D та продовжити його до перетину з віссю абсцис, то використовуючи цю точку перетину, можна визначити величину опору котушки r_K (рис. 3).

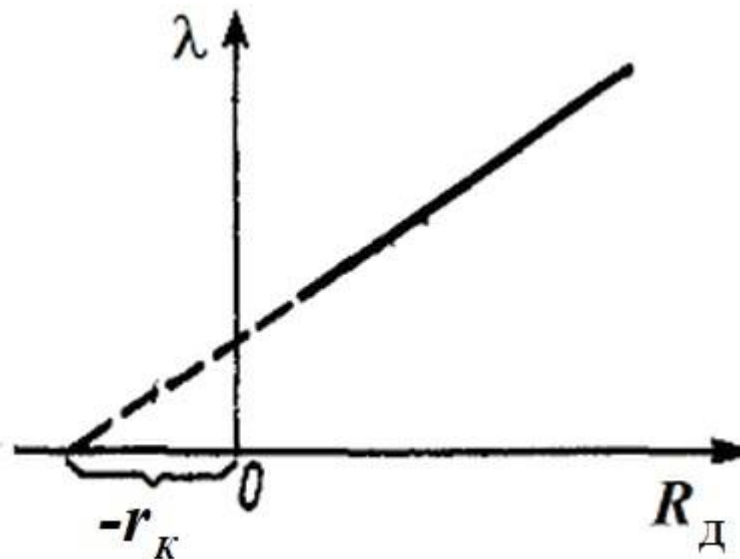


Рис.3.

У даній роботі для підтримування у контурі згасаючих коливань використовується генератор релаксаційних коливань, зібраний на газорозрядній неоновій лампі, найпростіша схема якого зображена на рис.4.

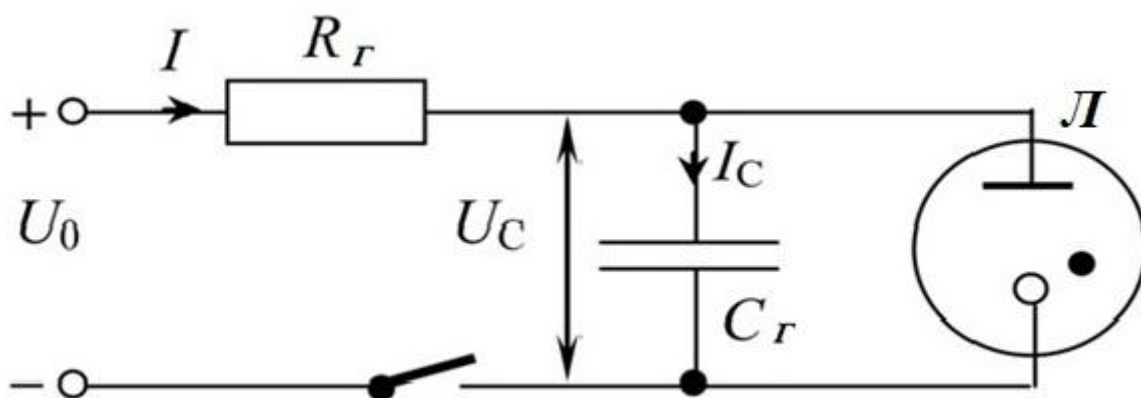


Рис. 4.

До складу цього генератора входить резистор R_r та конденсатор C_r , увімкнений паралельно з неоновією лампою L . Газорозрядна лампа має властивість «запалюватись», проводячи при цьому електричний струм, тільки за деякої достатньо великої напруги U_3 , яку називають «напругою запалювання», та гасне за меншої напруги U_r , яку називають «напругою гасіння» ($U_r < U_3$). Після увімкнення генератора до блоку живлення з напругою U_0 конденсатор C_r починає заряджатись через резистор R_r до моменту, коли напруга на ньому не стане рівною напрузі запалювання лампи U_3 , лампа «запалюється» і конденсатор C_r майже миттєво розряджається через неї до напруги гасіння U_r , лампа гасне, після чого конденсатор C_r почне заряджатись до напруги U_3 і процес буде повторюватись. Таким чином у генераторі виникнуть релаксаційні коливання, графік яких зображений на рис. 5. Період коливань генератора T_r приблизно дорівнює часу зарядки конденсатора C_r від напруги U_r до напруги U_3 . Для обчислення періоду T_r можна використати другий закон Кірхгофа для кола генератора при згасній газорозрядній лампі ($I = I_c$):

$$U_0 = I R_r + U_c = R \frac{dq}{dt} + U_c, \text{ де } U_0 - \text{напруга джерела живлення.}$$

Враховуючи що заряд $q = C_r U_c$, цей вираз можна записати так :

$$U_0 - U_c = R_r C_r \frac{dU_c}{dt} \text{ або } dt = R_r C_r \frac{dU_c}{U_0 - U_c}.$$

Проінтегруємо одержану формулу від U_r до U_3 :

$$\int_0^{T_r} dt = R_{\Gamma} C_{\Gamma} \int_{U_{\Gamma}}^{U_3} \frac{dU_c}{U_0 - U_c}, \quad \text{звідки:} \quad T_{\Gamma} = R_{\Gamma} C_{\Gamma} \ln \frac{U_0 - U_{\Gamma}}{U_0 - U_c} \quad (7)$$

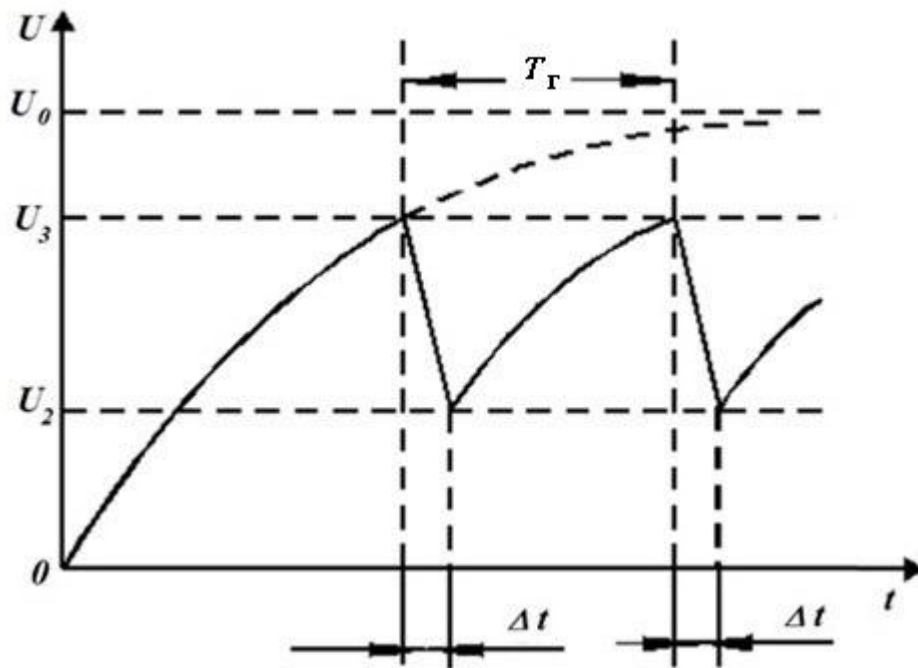


Рис. 5

Період релаксаційних коливань T_{Γ} можна експериментально визначити безпосередньо з екрану осцилографа у режимі вимірювання тривалості сигналів.

Опис експериментальної установки

Електрична схема установки для збудження та дослідження вільних згасаючих електромагнітних коливань зображена на рис. 6, де: K_0 – вимикач живлення релаксаційного генератора; K_1 – K_5 – вимикачі додаткових опорів, K_6 і K_7 – вимикачі додаткових індуктивності та ємності коливального контуру; Π_1 – спарений перемикач, що дозволяє у положенні 1 подати на вхід осцилографа напругу з котушок індуктивності L_1 та L_2 коливального контуру, при інших вимірюваннях цей перемикач має знаходитись у положенні 2; Π_2 – перемикач, з допомогою якого можна подати на вхід осцилографа напругу або з конденсатора C релаксаційного генератора (положення 1), або з конденсаторів C_1 та C_2 контуру (положення 2), причому у другому випадку перемикач Π_1 має знаходитись у положенні 2.

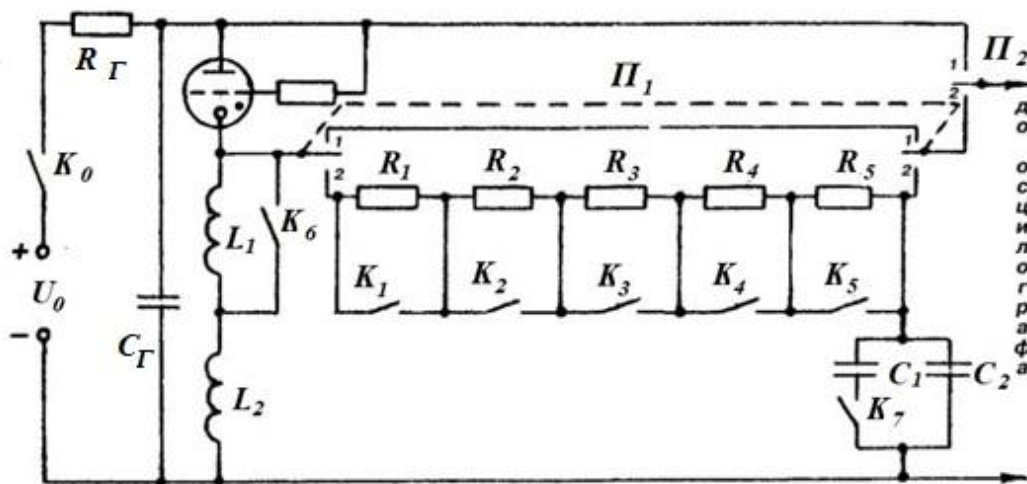


Рис. 6.

Напруга U_0 від джерела живлення УІП – 2 подається на вхід релаксаційного генератора, у якому газорозрядною лампою є тиратрон МТХ – 90 з напругою запалювання близько 150 В. Коливальний контур, у якому виникають вільні згасаючі коливання, увімкнений як навантаження генератора релаксаційних коливань. За час Δt (рис. 4) горіння лампи коливальний контур отримує деякий запас енергії, причому параметри цього контуру підібрані так, щоб час згасання коливань у ньому був меншим за період релаксаційних коливань T_{Γ} . Отже, якщо період релаксаційних коливань T_{Γ} набагато перевищує період власних коливань контуру T ($T \ll T_{\Gamma}$), то на екрані осцилографа можна спостерігати процес згасання цих коливань протягом часу між імпульсами, що надходять від релаксаційного генератора (рис. 2).

Порядок виконання роботи

1. Встановити регулятор напруги джерела живлення на мінімальне значення, увімкнути осцилограф і УІП у мережу та дати прогрітись 5 -7 хв.
2. Увімкнути живлення релаксаційного генератора та подати на нього напругу, потрібну для запалювання тиратрона.
3. Поставити перемикач Π_2 у положення 1 та підібрати підсилення каналу Y осцилографа таким, щоб амплітуда вертикального зміщення променя була

меншою від висоти екрану. За цих умов на екрані повинна спостерігатись картина релаксаційних коливань.

4. Перемалювати графік залежності напруги на конденсаторі від часу з екрану осцилографа на міліметровий папір та, враховуючи ціну поділки сітки екрану, визначити напруги запалювання та гасіння газорозрядної лампи.

5. Поставити перемикачі Π_1 та Π_2 у положення 2 і встановити напругу живлення $U_0 = 200$ В. На екрані повинні спостерігатись згасаючі коливання. Підібрати підсилення та швидкість розгортки такими, щоб зображення зайняло більшу частину екрану.

6. Увімкнути вимикачами $K_1 - K_5$ один з опорів $R_1 - R_5$ і визначити величину деякого максимуму A_i та одного з наступних максимумів, наприклад A_{i+k} . Результати записати у табл. 2. Дослід повторити для 4 -5 значень опору R .

Табл.1.

$U_0, \text{В}$										
$T, \text{мс}$										

Табл.2.

	$R, \text{Ом}$	i	A_i	k	A_{i+k}	A_i/A_{i+k}	λ	Q
1								
2								
3								
4								
5								

Обробка результатів вимірювань

1. За формулою (7) обчислити період релаксаційних коливань для різних значень напруги живлення U_0 на виході УИП у межах 160 – 300 В та записати результати у табл. 1.

2. За даними табл. 1 побудувати графік залежності періоду релаксаційних коливань T від напруги живлення генератора U_0 : $T = f(U_0)$.

3. За даними табл. 2 обчислити логарифмічний декремент згасання λ для кожного значення опору R_d за формулою $\lambda = (1/k) \cdot \ln (A_i/A_{i+k})$ та записати результати обчислень у табл. 2.
4. За даними табл. 2 побудувати графік залежності логарифмічного декременту згасання λ від додаткового опору контуру R_d : $\lambda = f(R_d)$. За побудованим графіком визначити величину опору котушки r_k .
5. Обчислити добротність контуру Q для кожного значення опору R за формулою $Q = \frac{\pi}{\lambda}$ та побудувати графік залежності добротності контуру Q від його опору R : $Q = f(R)$.

Контрольні запитання

1. Як виникають коливання у коливальному контурі?
2. Як виводиться рівняння коливань у контурі, який містить R , L , C ?
3. Який вигляд мають розв'язки рівняння коливань у контурі? Поясніть їх фізичний зміст.
4. Які величини характеризують згасання коливань у контурі? Як визначаються ці величини?
5. Що таке логарифмічний декремент згасання та як він залежить від омичного опору коливального контуру?
6. Що таке добротність коливального контуру та який її фізичний зміст?
7. Який принцип дії газорозрядної лампи? Які властивості має така лампа та де вона використовується?
8. Який принцип роботи генератора релаксаційних коливань? Як залежить напруга на конденсаторі C_T від часу?
9. Як виводиться формула періоду релаксаційних коливань?
10. Як можна виміряти період коливань з допомогою осцилографа?
11. Як відбуваються вимушені коливання у коливальному контурі та яким рівнянням вони описуються? Що таке резонанс?

Література

1. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики, Т.2. Електрика і магнетизм. – К.: Техніка, 1999.
2. Барановський В.М., Бережний П.В., Горбачук І.Т., Дущенко В.П., Шут М.І. Загальна фізика. Лабораторний практикум. – К.: Вища школа, 1992.
3. Черкашин В.П. Фізика. Електрика і магнетизм. Лабораторні роботи. – К.: Вища школа, 1986.