

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет електронних технологій, транспорту та машинобудування

ЕЛЕКТРИКА

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ФІЗИКИ

Частина 2

для здобувачів освітнього ступеня “бакалавр”
з технічних спеціальностей

Черкаси 2024

УДК 535
ББК

*Затверджено вченою радою ФЕТАМ,
протокол №__ від __.04.2024 р.
згідно з рішенням кафедри
фундаментальних дисциплін та
прикладного матеріалознавства,
протокол №__ від _____ 2024 р.*

Упорядники:

Ващенко В.А., д.т.н., професор
Колінько С.О., к.ф.-м.н., доцент
Бутенко Т.І., к.т.н., доцент

Рецензент:

Яценко І.В., д.т.н., професор

Електрика: лабораторний практикум з фізики для здобувачів освітнього ступеня “бакалавр” з технічних спеціальностей (Частина 2). [Електронний ресурс] / [упоряд. : В.А. Ващенко, С.О. Колінько Т.І. Бутенко; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси : ЧДТУ, 2024. – 43 с.

Лабораторний практикум містить теоретичні матеріали та методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни “ Фізика”, розділ «Електрика», які можуть бути використані для підготовки та виконання лабораторних робіт при вивченні навчальної дисципліни студентами.

Для студентів та викладачів вищих технічних навчальних закладів.

Навчальне електронне видання
**Електрика: лабораторний практикум
з фізики (Частина 2):**
для здобувачів освітнього ступеня “бакалавр”
з технічних спеціальностей

Упорядники:

Ващенко Вячеслав Андрійович,
Колінько Сергій Олександрович,
Бутенко Тетяна Іванівна

В авторській редакції.

© В.А. Ващенко, С.О.Колінько, Т.І.Бутенко упорядкування, 2024

ЗМІСТ

Лабораторна робота № 209	4
ВИВЧЕННЯ РЕЗОНАНСУ НАПРУГ	
Лабораторна робота № 210	9
ЗАГАСАЮЧІ КОЛИВАННЯ В КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ	
Лабораторна робота № 211	14
ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ ПОЛЯ СОЛЕНОЇДА	
Лабораторна робота № 212	20
ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА	
Лабораторна робота № 213	23
ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ ЗА МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ (СИСТЕМА ЛЕХЕРА)	
Лабораторна робота № 214	31
ВИВЧЕННЯ РОБОТИ ОСЦИЛОГРАФА І ДОСЛІДЖЕННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК (ВАХ) ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ	
Лабораторна робота № 216	39
ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА ДО МАСИ МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА	

Лабораторна робота № 209

ВИВЧЕННЯ РЕЗОНАНСУ НАПРУГ

Мета роботи - ознайомитися з основними властивостями і характеристиками змінного струму в послідовному колі, яке містить активний опір, індуктивність і ємність.

Прилади і матеріали: звуковий генератор; котушка індуктивності; конденсатор, амперметр, реостат, з'єднувальні провідники.

Теоретичні відомості

Розглянемо коло, яке складається із послідовно з'єднаних активного опору R , індуктивності L і ємності C (рис. 209.1).

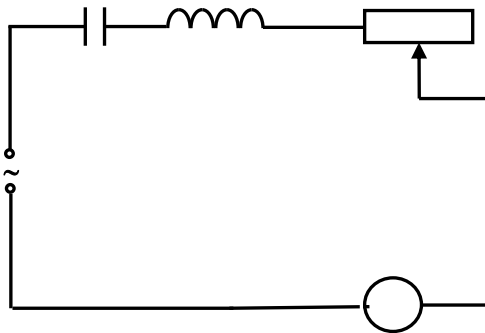


Рисунок 209.1

Ввімкнемо в коло синусоїдну змінну напругу

$$U = U_0 \sin \omega t, \quad (209.1)$$

де U_0 – амплітуда змінної напруги; $\omega = 2\pi\nu$ – циклічна частота.

В колі виникає змінний струм тієї самої частоти, амплітуда і фаза якого визначається параметрами кола R , L і C . Амплітудне (максимальне) значення сили змінного струму визначається із закону Ома:

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad \text{або} \quad I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \quad (209.2)$$

Струм виявляється зсунутим за фазою на кут φ відносно напруги, тобто

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi), \quad (209.3)$$

де φ визначається за формулою

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (209.4)$$

Величина

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (209.5)$$

називається повним опором кола; величина

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} \quad (209.6)$$

називається реактивним опором.

Якщо $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, тобто $X_L = X_C$, струм і напруга змінюються синфазно ($\varphi=0$). Якщо частота відповідає умові

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (209.7)$$

то повний опір кола Z має найменше значення, можливе за даних R , L і C і дорівнює R .

Відповідно амплітуда сили струму досягає найбільшого значення

$$I_0 = \frac{U_0}{R}. \quad (209.8)$$

При цьому спад напруги на активному опорі дорівнює зовнішній напрузі, яка прикладена до кола, а спади напруги на індуктивності L і ємності C – однакові за амплітудою і протилежні за фазою. Це явище називається резонансом напруг, а частота $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – резонансною частотою. Спад

напруги на омичному опорі

$$U_R = IR \sin(\omega t - \varphi); \quad (209.9)$$

на індуктивному опорі

$$U_L = L \frac{dI}{dt} = I_0 \omega L \cos(\omega t - \varphi); \quad (209.10)$$

на ємнісному опорі $U_C = \frac{I_0}{\omega C} = \cos(\omega t - \varphi + \pi)$.

$$(209.11)$$

Із зіставлення (209.10) і (209.11) випливає, що U_C зсунуто на π відносно U_L , тобто, напруги на ємності і індуктивності мають протилежні фази. Тому сумарна напруга дорівнює різниці абсолютних величин $|U_L| - |U_C|$. Із (209.10) і (209.11) випливає, що амплітудне значення напруг на індуктивності L і ємності C

$$U_{L0} = \omega L I_0 = U_L; \quad (209.12)$$

$$U_{C0} = \frac{1}{\omega C} I_0 = U_C. \quad (209.13)$$

У випадку резонансу $I_0 = \frac{U_0}{R}$ рівняння (209.12) і (209.13) матимуть вигляд

$$U_L = \frac{\omega L}{R} U_0; \quad (209.14)$$

$$U_C = \frac{1}{\omega C R} U_0. \quad (209.15)$$

Оскільки умовою резонансу є рівність $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, то $U_L = U_C$, тобто напруги на індуктивності і ємності однакові за значенням, але протилежні за фазою, тому сумарна напруга $U_L + U_C = 0$. Якщо крім умови резонансу є співвідношення $\omega L = \frac{1}{\omega C} > R$, то, як випливає із (209.14) і (209.15), напруга на ємності і індуктивності більша за напругу, яка подається від зовнішнього джерела. В колі, яке складається із індуктивності, ємності і активного опору, умови резонансу $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ можна досягнути змінами частоти змінного струму, ємності C , індуктивності L .

У даній лабораторній роботі резонанс напруг вивчається в колі, схему якого показано на рис. 209.2. Умова резонансу напруг досягається в цьому колі зміною частоти змінного струму звукового генератора за постійних значень ємності C та індуктивності L .

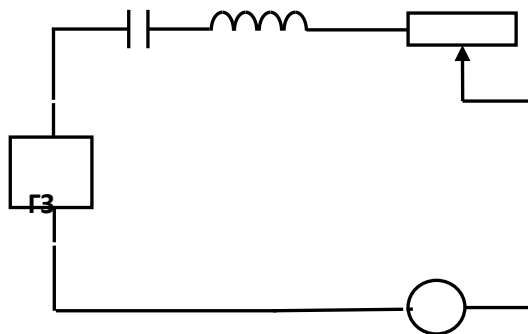


Рисунок 209.2

Типові резонансні криві залежності струму в послідовному колі, яке містить індуктивність L , ємність C , активний опір R , від частоти поданої напруги для різних значень активного опору зображені на рис. 209.3.

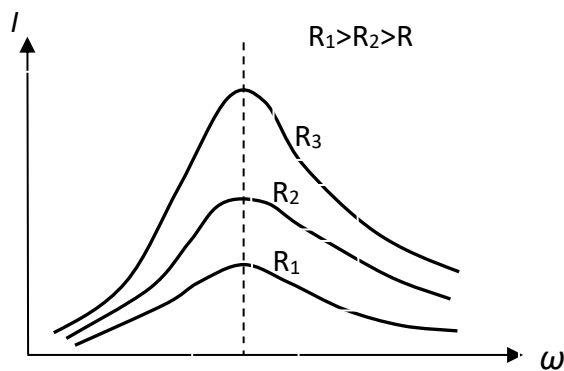


Рисунок 209.3

Послідовність виконання роботи

1. Зібрати коло за рис. 209.2 і показати для перевірки викладачу.
2. Установити певні значення ємності і активного опору. Опір на реостаті ввести повністю.
3. Тумблери генератора ГЗ-18 встановити таким чином: “Шкала приладу”-“1Л”, “Внутрішнє навантаження”-“Викл”, “Розладнання”-“0”, “Межі шкал”-“30 V”, регулятор виходу проти годинникової стрілки – до крайнього положення.
4. Увімкнути генератор у коло. Після нагрівання генератора протягом 1...2 хв, змінюючи частоту генератора від 200 до 2000 Гц, через кожні 50 Гц записувати до табл. 209.1 відповідні значення струму в колі. Вимкнути генератор.
5. Повторити вимірювання з тією самою ємністю та індуктивністю, але з активним опором на реостаті $R_2=7,5 \text{ Ом}$; $R_3=0$.
6. Після кожного дослідження генератор вимикати на 15 хв.

Таблиця 209.1

№ п/п	Частота, Гц	Струм I , А, за опором		
		15 Ом	7,5 Ом	0
1	800			
2	900			
3	1000			
4	1100			
5	1200			
6	1300			
7	1350			
8	1400			
9	1450			
10	1500			
11	1600			
12	1700			
13	1800			
14	1900			
15	2000			
16	2100			

За даними табл. 209.1 побудувати графіки (резонансні криві) аналогічно рис. 209.3 за $I = f(\nu)$, знайти експериментальне значення резонансної частоти.

За $R_3=0$ перевірити формулу Томсона $T = 2\pi\sqrt{LC}$ і визначити $\nu_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.
Остаточні результати досліджень і обчислень записати в табл. 209.2.

Таблиця 209.2

п/п	L, Гн	C, Ф	$\nu_{рез}$, Гц		$\Delta\nu$, Гц
			експериментальна	теоретична	
	$25 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-6}$			

Контрольні запитання

1. Сформулюйте закон Ома для змінного струму.
2. Як визначити зсув фаз між струмом і напругою?
3. Чому дорівнює різниця фаз між U_L і U_C ?
4. Сформулюйте умову резонансу.
5. Чому за резонансу U_L і U_C можуть бути більшими за U ?
6. Чому за резонансу $U_L + U_C = 0$?

Лабораторна робота № 210

ЗАГАСАЮЧІ КОЛИВАННЯ В КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ

Мета роботи: вивчити фізичні процеси, які відбуваються в контурі, що містить в собі опір, індуктивність і ємність.

Прилади і приладдя: низьковольтне джерело живлення, магазин опорів, магазин ємностей, індуктивність, перемикач на поляризованому реле, осцилограф.

Теоретичні відомості

Розглянемо коло, яке складається із послідовно з'єднаних активного опору R , індуктивності L і ємності C . Таке коло називається коливальним контуром (рис. 210.1).

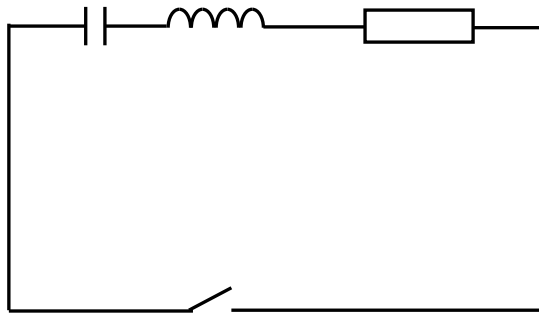


Рисунок. 210.1

Якщо попередньо заряджений конденсатор замкнути на індуктивність, у контурі виникає зростаючий струм розрядження. Цей струм, породжуючи зростаюче магнітне поле, викликає появу ЕРС самоіндукції, яка спочатку сповільнює швидкість розрядження. Коли конденсатор розрядиться, струм повинен би впасти до нуля, але ЕРС самоіндукції в контурі, згідно з правилом Ленца, підтримує попередній напрям струму – конденсатор перезаряджається; коли струм припиниться, конденсатор виявиться перезарядженим. Закінчиться перша половина періоду електромагнітних коливань, і процес піде у зворотному напрямі.

В ході описаного процесу періодично змінюється заряд на обкладках конденсатора, напруга U на конденсаторі і сила струму I , що протікає через індуктивність. Ці коливання супроводжуються взаємними перетворюваннями енергії електричного і магнітного полів.

У разі наявності в контурі активного опору первісний запас енергії системи поступово витрачається на виділення джоулевої теплоти, внаслідок чого

амплітуда коливань напруги і струму в контурі поступово зменшується. Із збільшенням активного опору контура загасання коливань відбувається швидше і, нарешті, за достатньо великого R коливання взагалі не виникають – спостерігається аперіодичний розряд конденсатора.

Знайдемо рівняння, яке описує вільні коливання в даному контурі. В початковий момент часу $t=0$ заряд на обкладках конденсатора q_0 ; замикання контура вимикачем приводить до виникнення струму I , магнітного поля, яке викликає в контурі ЕРС самоіндукції:

$$\varepsilon_c = -L \frac{dI}{dt}. \quad (210.1)$$

Заряд q і напруга U на конденсаторі зв'язані співвідношенням $q=CU$, звідки струм у контурі

$$I = \frac{dq}{dt} = C \frac{dU_c}{dt} \quad (210.2)$$

За другим рівнянням Кірхгофа сума спадів напруг у будь-якому замкненому контурі дорівнює сумі діючих у цьому контурі ЕРС. Використовуючи це правило для коливального контура (див. рис. 210.1), отримуємо

$$RI + U_c = \varepsilon_c. \quad (210.3)$$

Підставляючи (210.1) і (210.2) у (210.3) і поділивши всі доданки рівняння на L , отримуємо

$$\frac{d^2U}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dU}{dt} + \frac{U}{LC} = 0. \quad (210.4)$$

Введемо позначення

$$2\beta = \frac{R}{L}, \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}. \quad (210.5)$$

β - називається коефіцієнтом загасання,

ω_0 - власною частотою коливального контура.

Рівняння (210.4) набуває вигляду

$$\frac{d^2U}{dt^2} + 2\beta \frac{dU}{dt} + \omega_0^2 U = 0 \quad (210.6)$$

Із теорії коливань відомо, що розв'язок такого рівняння за умови, що $\beta^2 < \omega_0^2$, тобто $\frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{LC}$, має вигляд (рис. 210.3):

$$U = U_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha), \quad (210.7)$$

де $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$.

Підставляючи значення (210.5) для ω_0 і β у вираз для ω , знаходимо

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (210.8)$$

Таким чином, частота загасаючих коливань менша за власну частоту ω_0 .
Період коливань

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$$

(210.9)

Із зростанням коефіцієнта загасання β період коливань T збільшується, прямуючи до нескінченності при $\beta \rightarrow \omega_0$. Це означає, що коливальний процес переходить в аперіодичний. Для контура з певним значенням L і C аперіодичний процес, як видно з (210.9), настає за $R \geq R_k$. Критичний опір R_k визначається з умови $\beta = \omega_0$, тобто

$$\frac{R_k^2}{4L^2} = \frac{1}{LC}$$

Звідки

$$R_k = 2\sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (210.10)$$

Загасання коливань характеризується логарифмічним декрементом загасання

$$\lambda = \ln\left(\frac{a_1(t)}{a_2(t+T)}\right) = \beta T, \quad (210.11)$$

де a_1, a_2 -амплітуди коливань величини, які відповідають моментам часу, що відрізняються на період.

У ряді випадків коливальний процес доцільно вивчати, дослідивши безпосередньо залежність $U(I)$. Крива, яка зображує цю залежність, називається фазовою. В разі відсутності загасання у контурі фазова крива $U = f(I)$ має форму еліпса (еліпс утворюється, як відомо, в результаті додавання двох взаємно перпендикулярних гармонічних коливань однакової частоти). За наявності загасання в контурі амплітуда коливань зменшується з часом, що призводить до складнішої форми фазової кривої – спіралі. Її можна безпосередньо спостерігати на екрані осцилографа (рис. 210.2).

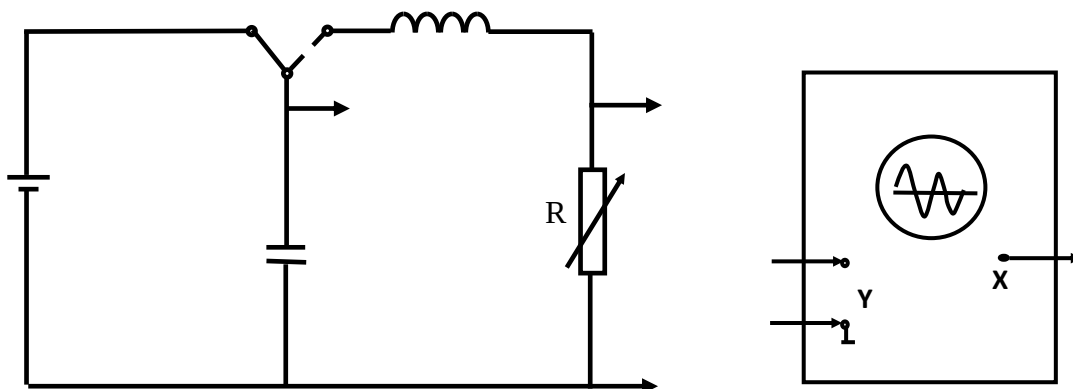


Рисунок 210.2

Загасаючі коливання вивчають на установці, схему якої показано на рис. 210.2 Конденсатор C за допомогою реле навперемінно підключається до джерела постійної напруги (конденсатор заряджається), або індуктивності L (розрядження конденсатора в контурі) з частотою 50 Гц. Це досягається тим, що в разі зміни напрямку змінного струму через електромагнітне реле, його якір-перемикач (магнітно-м'яке залізо) притягується то до одного, то до іншого полюсу, замикаючи клему "0" по черзі із клемами 1 і 2.

Залежність $U(I)$ спостерігають на екрані осцилографа, клеми якого з'єднані провідниками із відповідними точками контуру, які позначені такими самими буквами.

Для одержання фазової кривої $U(I)$, тобто залежності напруги на конденсаторі від струму в контурі, необхідно вимкнути генератор розгортки осцилографа. При цьому на вертикальний вхід осцилографа, як і раніше, буде подаватися напруга з конденсатора, а на горизонтальний – напруга з активного опору R . Оскільки на активному опорі напруга збігається за фазою із струмом, отримуємо залежність напруги на конденсаторі від струму в контурі.

В даній лабораторній роботі необхідно дослідити загасаючі коливання в контурі, що містить активний опір R , індуктивність L і ємність C .

Послідовність виконання роботи

1. Зібрати схему згідно з рис. 210.2, приєднавши клеми осцилографа до відповідних точок контура: $U, I, 3$.
2. Увімкнути реле і генератор розгортки осцилографа. Змінюючи частоту генератора розгортки обертанням ручок "Діапазон частот", "частота плавно" і "Амплітуда синхронізації", добитися на екрані стійкості осцилограми (зображення одного цуга загасаючих коливань) (див. рис. 210.3).
3. Змінюючи R, L, C , прослідкувати за характером змін загасаючих коливань.
4. Визначити декілька значень періоду коливань T за (210.12) за виведеного магазину опорів і значень L і C , вказаних на установці.
5. Для тих самих значень L , C обчислити період коливань за формулою (210.9), в якій $R = R_1 + R_0$, де R_1 опір, встановлений за допомогою магазину опорів; R_0 - активний опір індуктивності, значення якого за різних L вказані на установці.
6. Результати вимірювань і обчислень занести до табл. 210.1

Таблиця 210.1

№ п/п	L , мГн	C , мкФ	LC	l_0 , мм	l_1 , мм	n	l_1 , мм	R_0 , Ом	$T_{\text{експ}}$, с	$T_{\text{теор}}$, с

7. Дослідити фазові криві. Для цього вимкнути генератор розгортки осцилографа і прослідкувати за характером змін осцилограми, змінюючи L і C .

8. За допомогою фазової кривої визначити критичний опір, за якого настає аперіодичний процес. Для цього установити $L=0,057$ мГн і $C=0,1$ мкФ. Збільшуючи опір R , отримати криву (див. рис. 210.4, б). З метою підвищення точності, спостерігати слід за максимального вертикального і горизонтального підсилення осцилографа. Отриманий результат порівняти з теоретичним обчисленням за (210.10).

9. За тих самих значень L і C , користуючись фазовими кривими, визначити логарифмічний декремент загасання λ , а також обчислити його за (210.11). Результати вимірювань і обчислень занести до табл. 210.2.

Таблиця 210.2

№ п/п	R_1 , Ом	a_1 , мм	a_2 , мм	$\lambda_{\text{експ}}$	$\lambda_{\text{теор}}$

Контрольні запитання

1. Вивести рівняння загасаючих коливань коливального контура.
2. Який опір контура називають критичним?
3. Дайте визначення логарифмічного декременту загасання.

Лабораторна робота № 211

ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ ПОЛЯ СОЛЕНОЇДА

Мета роботи: визначити магнітну індукцію методом балістичного гальванометра.

Прилади та приладдя: балістичний гальванометр, соленоїд, вимірювальна котушка, джерело струму, амперметр.

Теоретичні відомості

Рухомі заряди (зокрема електричні струми) створюють у навколишньому середовищі магнітне поле, яке проявляється в дії сил на заряди, що в ньому рухаються.

В однорідному магнітному полі на контур зі струмом діє момент сил, який орієнтує контур відносно поля. За напрям магнітного поля прийнято напрям позитивної нормалі до контура зі струмом (нормаль до поверхні, обмеженої плоским контуром, яка зв'язана з напрямом струму правилом правого гвинта, рис. 211.1). Момент сил M , який діє на контур зі струмом, пропорційний силі струму I , обмеженій контуром площі S , синусу кута між напрямками поля і позитивної нормалі, і залежить від магнітного поля.

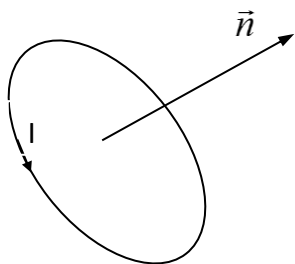


Рисунок 211.1

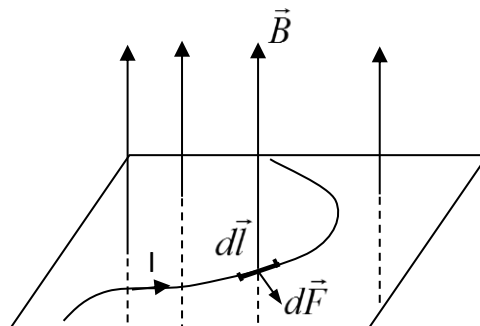


Рисунок 211.2

Величина

$$B = \frac{M}{IS \sin \alpha} \quad (211.1)$$

залежить тільки від властивостей магнітного поля і називається магнітною індукцією.

Величина

$$P_m = IS \quad (211.2)$$

називається магнітним моментом контура зі струмом.

Магнітне поле зображують лініями магнітної індукції – лініями, дотичні до яких визначають напрям вектора магнітної індукції.

Закон Ампера: на елемент струму dl в магнітному полі діє сила

$$dF = IBdl \sin \alpha \quad (211.3)$$

Напрямок сили визначається за правилом лівої руки (рис. 211.2).

Закон Біо-Савара-Лапласа дозволяє обчислити магнітну індукцію провідника зі струмом. Магнітна індукція $d\vec{B}$, яка створюється елементом струму довжиною dl , визначається співвідношенням (рис. 211.3)

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I [\vec{dl} \cdot \vec{r}]}{r^2}, \quad (211.4)$$

де $4 \cdot 10^{-7}$ Гн/м- магнітна стала; $[\vec{dl} \cdot \vec{r}]$ -векторний добуток.

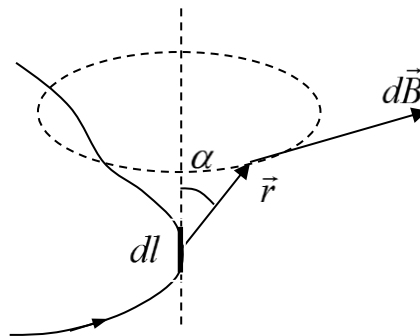


Рисунок 211.3

Абсолютна величина індукції магнітного поля елемента провідника

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2} \quad (211.5)$$

Магнітна індукція будь-якого провідника зі струмом дорівнює векторній сумі індукцій елементів струмів.

$$\vec{B} = \int_L d\vec{B} \quad (211.6)$$

Теоретичний розрахунок магнітної індукції соленоїда (додаток), діаметром якого можна знехтувати порівняно з довжиною, для його середньої частини дає формулу

$$B = \mu_0 In. \quad (211.7)$$

Для магнітної індукції на кінці соленоїда

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 In, \quad (211.8)$$

де $n = \frac{N}{l}$ - число витків на одиницю довжини соленоїда.

Опис установки

Установка складається із соленоїда, по якому пропускається електричний струм і магнітна індукція якого вимірюється, дзеркального гальванометра і вимірювальної котушки з лінійкою для визначення положення вимірювальної котушки (рис. 211.4).

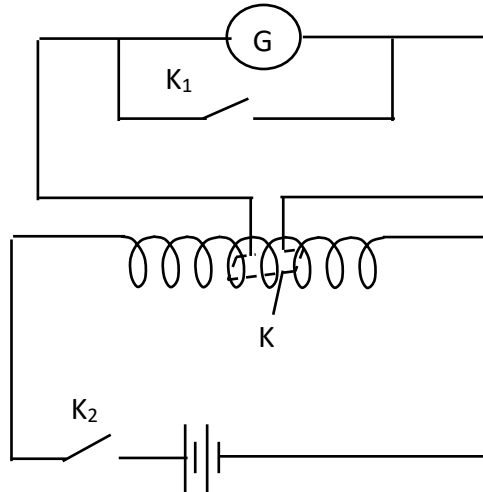


Рисунок 211.4

Магнітна індукція в даній роботі вимірюється за допомогою балістичного гальванометра. Так називається гальванометр для вимірювання електричного заряду, який протікає через рамку гальванометра за час, значно менший від періоду її власних коливань:

$$q = \beta m, \quad (211.9)$$

де β – стала гальванометра; m – число поділок шкали відхилення світлового покажчика гальванометра. Для збільшення періоду коливань рухому частину гальванометра роблять з більшим моментом інерції.

Якщо вимірювальна котушка K знаходиться в магнітному полі зі сталою магнітною індукцією, струму в колі гальванометра не буде. Якщо вмикати або вимикати магнітне поле, індукція за час змінюється в межах від 0 до B . Зміна потоку магнітної індукції $d\Phi$ викликає в котушці K ЕРС індукції

$$E_i = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (211.10)$$

Потік магнітної індукції Φ через N_k витків вимірювальної котушки з площею витка S

$$\Phi = BN_k S. \quad (211.11)$$

Тому

$$E_i = N_k S \frac{dB}{dt}. \quad (211.12)$$

Запишемо друге рівняння Кірхгофа $\left(\sum_i I_i R_i = \sum_k E_k\right)$ для кола гальванометра з урахуванням ЕРС самоіндукції котушки $\left(E_s = -L \frac{dI}{dt}\right)$

$$\begin{aligned} I(R + R_G) &= E_i + E_s; \\ I(R + R_G) &= -N_k S \frac{dB}{dt} - L \frac{dI}{dt}, \end{aligned} \quad (211.13)$$

де R, R_G –омічний опір відповідно котушки K і гальванометра.

Проінтегруємо (211.13) за часом від моменту вмикання поля ($t_1=0$) до встановлення постійного магнітного поля ($t_2=\tau$):

$$-\int_0^\tau N_k S \frac{dB}{dt} dt = \int_0^\tau (R + R_G) I dt + \int_0^\tau L \frac{dI}{dt} dt, \quad (211.14)$$

За час τ сила струму в колі гальванометра змінюється в межах від нуля на початку ($t=0$) до нуля в кінці ($t=\tau$). Тому

$$\int_0^\tau L \frac{dI}{dt} dt = \int_0^\tau L dI = 0; \quad \int_0^\tau I dt = q,$$

де q – кількість електрики, яка пройшла через гальванометр за час τ .

При цьому рівняння (211.14) матиме вигляд

$$\begin{aligned} -\int_0^\tau N_k S dB &= \int_0^\tau (R + R_G) I dt; \\ -N_k S \int_0^\tau dB &= (R + R_G) \int_0^\tau I dt; \\ -N_k S B &= (R + R_G) q, \end{aligned} \quad (211.15)$$

звідки

$$|B| = \frac{(R + R_G)}{N_k S} q. \quad (211.16)$$

Якщо гальванометром визначити заряд $q = \beta m$, за (211.16) можна обчислити магнітну індукцію:

$$B = \frac{R + R_G}{N_k S} \beta m. \quad (211.17)$$

Порядок виконання роботи

1. Перевірити електричне коло установки за схемою.
2. Коло гальванометра повинне замикатися ключем K_1 , а джерело постійного струму – вмикатися тумблером на ньому.
3. Увімкнути освітлення гальванометра і знайти на дзеркальній шкалі положення світлого покажчика гальванометра. Якщо виявити його не вдається, потрібно звернутися до викладача.

4. Увімкнути тумблер джерела живлення і при натисненій кнопці K_2 та замкненому ключі K_1 виставити силу струму в колі соленоїда 3...8 А (за вказівкою викладача).
5. Розімкнути коло соленоїда, відпустивши кнопку ключа K_2 .
6. Розімкнути ключ K_1 .
7. Зафіксувати початкове положення покажчика гальванометра m_{0i} .
8. Замкнути коло соленоїда, натиснувши кнопку ключа K_2 .
9. Відрахувати - максимальне відхилення покажчика гальванометра.
10. Зробити 3...5 вимірів за пп. 7-9 для одного і того самого положення вимірювальної котушки.
11. Змінюючи положення вимірювальної котушки через 1...3 см уздовж осі соленоїда і поза ним поблизу закритого кінця соленоїда, виміряти відхилення покажчика гальванометра.
12. Дані вимірювань записати в таблицю.

п/п	$m_{0i}, \text{ мм}$	$m_i, \text{ мм}$	$m, \text{ мм}$	$B, \text{ Тл}$	$l, \text{ см}$	$B_{розр}, \text{ Тл}$

13. Побудувати градувальний графік $B = f(l)$.
14. За (211.7) і (211.8) обчислити значення B для середини та кінця соленоїда і одержані результати порівняти з виміряними значеннями.

Контрольні запитання

1. Що таке індукція магнітного поля?
2. Сформулюйте закон Ампера.
3. Сформулюйте закон Біо-Савара-Лапласа.
4. Поясніть, як виводити формулу для магнітної індукції соленоїда.
5. Поясніть метод вимірювання балістичним гальванометром.
6. Сформулюйте закон електромагнітної індукції.

Додаток

Теоретичний розрахунок магнітної індукції B на осі кругового струму за законом Біо-Савара-Лапласа дає формулу

$$B(l) = \frac{1}{2} \mu_0 I \frac{R^2}{(R^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (211.18)$$

(позначення див. на рис. 211.5).

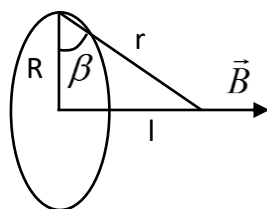


Рисунок 211.5

Магнітна індукція поля соленоїда може розраховуватися як сума магнітних індукцій полів колових струмів. Виділимо елемент соленоїда довжиною dl , в який входить dN витків соленоїда. В кожному витку проходить електричний струм I , тому круговий струм в елементі соленоїда

$$dI = IdN = Indl,$$

де n - число витків проводу на одиницю довжини соленоїда, а магнітна індукція dB від елемента соленоїда на осі соленоїда

$$dB = \frac{\mu_0}{2} \frac{InR^2 dl}{(R^2 + l^2)^{\frac{3}{2}}}. \quad (211.19)$$

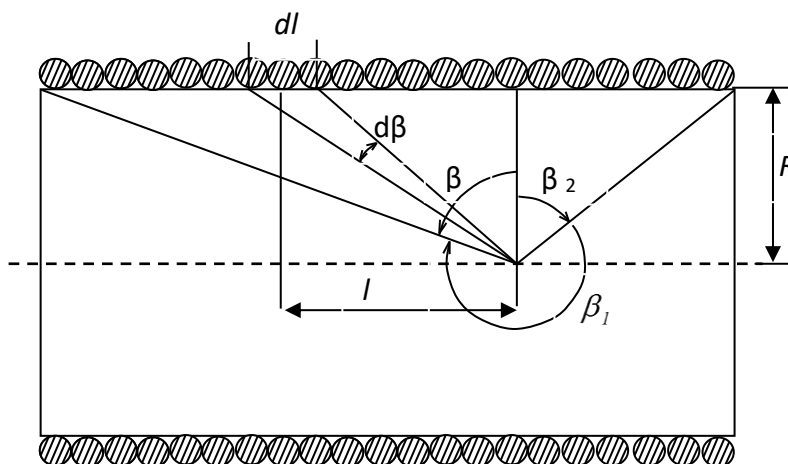


Рисунок 211.6

На рис. 211.6 видно, що

$$\cos \beta = \frac{R}{\sqrt{R^2 + l^2}}, \quad (211.20)$$

$$l = R \tan \beta. \quad (211.21)$$

Тому

$$dl = \frac{R}{\cos^2 \beta} d\beta. \quad (211.22)$$

Якщо підставити вирази (211.20)-(211.22) в (211.10), отримаємо

$$dB = \frac{1}{2} \mu_0 In \cos \beta d\beta. \quad (211.23)$$

Оскільки всі елементи магнітної індукції спрямовані по осі соленоїда, їх можна додати за абсолютною величиною:

$$B = \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{1}{2} \mu_0 I n \cos \beta d\beta = \frac{1}{2} \mu_0 I n (\sin \beta_2 - \sin \beta_1). \quad (211.24)$$

Для довгого соленоїда в його середній частині

$$\beta_2 = -\beta_1 \approx \frac{\pi}{2}, \quad B = \mu_0 n I;$$

$$\text{а на кінці } \beta_2 = \frac{\pi}{2}; \quad \beta_1 = 0; \quad B = \frac{1}{2} \mu_0 n I.$$

Лабораторна робота № 212

ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА

Мета роботи: визначити відношення заряду електрона до його маси (питомий заряд), вивчаючи його рух в однорідних електричному та магнітному полях.

Прилади і приладдя: електронний осцилограф.

Теоретичні відомості

Електрон має електричний заряд $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ та масу $m = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$. Відношення e/m називається питомим зарядом електрона. Заряд електрона є постійною величиною, маса також постійна за швидкостей, що малі порівняно з швидкістю світла.

В електронно-променевої трубки – основній частині осцилографа – одержують вузький напрямлений пучок електронів. Електрони, що випромінює катод, прискорюються анодною напругою і мають кінетичну енергію:

$$E_k = \frac{mv_0^2}{2} = eU_0, \quad (212.1)$$

де m, v_0, e - відповідно маса, швидкість і заряд електрона;

U_0 - прискорююча різниця потенціалів.

З (212.1) знайдемо швидкість електронів

$$v_0 = \sqrt{\frac{2eU_0}{m}}. \quad (212.2)$$

Пучок електронів, які рухаються в електронній трубці з постійною швидкістю v_0 уздовж осі Y , за відсутності магнітного поля, потрапляє в центр екрана (точка A на рис. 212.1) і там спостерігаємо світну точку.

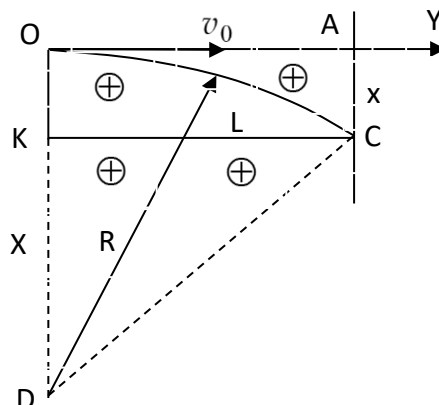


Рисунок 212.1

Якщо ж електрони будуть рухатися і в однорідному магнітному полі з індукцією B , напрям якої перпендикулярний до напрямку швидкості електрона v_0 , то на них діятиме сила Лоренца:

$$F = ev_0 B \sin \alpha \quad (212.3)$$

де α - кут між напрямками швидкості та індукції магнітного поля. Якщо v_0 перпендикулярно B , то $\sin \alpha = 1$ і (212.3) набуває вигляду

$$F = ev_0 B. \quad (212.4)$$

Напрямок сили Лоренца перпендикулярний до швидкості електронів і індукції магнітного поля (визначається за правилом лівої руки з врахуванням знаку заряду електрона) і не змінюється в однорідному магнітному полі. Під дією цієї сили електрони будуть рухатися по колу радіуса R . Це викличе зміщення світної точки з A в C (див рис. 212.1, тут вектор $\vec{B}$ напрямлений від нас і позначений $\oplus$).

Запишемо другий закон Ньютона $F = ma$ для цього випадку:

$$ev_0 B_z = ma_n = m \frac{v_0^2}{R}. \quad (212.5)$$

З (212.5) одержуємо

$$\frac{e}{m} = \frac{v_0}{B_z R}. \quad (212.6)$$

Радіус траєкторії електронів R можна визначити, якщо виміряти величину зміщення $x = AC$ пучка електронів на екрані кінескопа. З трикутника KCD випливає

$$R^2 = (R - x)^2 + L^2, \quad (212.7)$$

звідки

$$R = \frac{x^2 + L^2}{2x}. \quad (212.8)$$

Підставляючи цей вираз і v_0 з (212.2) у (212.6), одержуємо:

$$\frac{e}{m} = \sqrt{\frac{e}{m} 2U_0} = \frac{2x}{B_z(x^2 + L^2)}, \text{ або } \frac{e}{m} = \frac{8U_0 x^2}{B_z^2(x^2 + L^2)^2}.$$

Через те що $x \ll L$, то x можна знехтувати порівняно з L .

Отже, остаточно:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_0 x^2}{B_z^2 L^4}. \quad (212.9)$$

Величини, що входять в праву частину (212.9), можна виміряти: x -вимірюють масштабною лінійкою на екрані; U_0 - анодна напруга кінескопа; B_z - вертикальна складова індукції магнітного поля Землі, що використовується в досліді; L - відстань від анода до екрана в кінескопі осцилографа.

Послідовність виконання роботи

1. Зорієнтувати напрям електронної трубки осцилографа в площині магнітного меридіану (напрямок вказано на робочому місці).
2. Увімкнути осцилограф і дати йому прогрітись 2...3 хв.
3. Ручками регулювання “Яскравість” та “Фокусування” одержати на екрані зручне для спостереження зображення світної точки електронного променя.
4. Ручками зміщення променя за осями X і Y вивести зображення світної точки в центр екрана.
5. Повернути осцилограф на 90° навколо горизонтальної осі і помітити положення зображення.
6. Повернути осцилограф на 180° навколо горизонтальної осі (в бік, протилежний першому повороту) і відрахувати відхилення зображення за повороту на 180° .
7. Повторити вимірювання 3 – 5 разів, визначити середнє значення відхилення і для нього за (212.9) обчислити питомий заряд електрона.

Контрольні запитання

1. За якої орієнтації електронної трубки відхилення зображення буде мінімальним?
2. Як рухатиметься електрон під дією електричного поля, перпендикулярного до початкової швидкості електрона?

3. Чому в разі повороту осцилографа на 180^0 світна точка зміщується на екрані в протилежний бік?

4. Якою буде швидкість електрона за прискорюючою напругою 1000 В?

Лабораторна робота № 213

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ХВИЛІ ЗА МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ (СИСТЕМА ЛЕХЕРА)

Мета роботи: ознайомитись із поняттям електромагнітної хвилі; виміряти на практиці довжину електромагнітних хвиль на системі Лехера.

Прилади і приладдя: генератор струмів високої частоти із живленням від випрямляча; двопровідна лінія з індуктивним зв'язком; містки з індикаторами (лампочка розжарювання на 2.5 В і неонова лампочка); три дротяні містки без індикаторів .

Теоретичні відомості

Стоячі хвилі утворюються в результаті інтерференції прямої і зворотної хвиль із однаковими амплітудами і частотами. Рівняння хвилі, що поширюється в напрямі “+X”,

$$y_1 = y_0 \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \quad (213.1)$$

Рівняння хвилі, що поширюється в напрямі “-X”,

$$y_2 = y_0 \sin \omega \left(t + \frac{x}{v} \right), \quad (213.2)$$

де y_0 - амплітуда цих хвиль; y_1, y_2 - значення змінної величини в точці x ; $\omega \left(t \pm \frac{x}{v} \right)$ - фаза хвилі.

В будь-якій точці з координатою x сумарне значення величини, що здійснює коливання, згідно з принципом суперпозиції, буде

$$y = y_1 + y_2 = 2y_0 \cos \omega \frac{x}{v} \sin \omega t \quad (213.3)$$

Рівняння (213.3) є рівнянням стоячої хвилі. Воно показує, що в результаті інтерференції прямої і зворотної хвиль у кожній точці середовища із фіксованою координатою x відбувається гармонічне коливання з тією самою частотою. Вираз

$$y(x) = 2y_0 \cos \omega \frac{x}{v} = 2y_0 \cos 2\pi \frac{x}{\lambda} \quad (213.4)$$

не залежить від часу і є амплітудою коливань в точці x (тут λ - довжина біжучої хвилі).

Із (213.4) видно, що амплітуда стоячої хвилі залежить від координати x . В тих точках середовища, для яких $\cos 2\pi \frac{x}{\lambda} = 0$, коливання відсутні, тобто $y = 0$.

Такі точки називаються вузлами стоячої хвилі. В точках, де $\cos 2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm 1$, амплітуда коливань має найбільше значення, що дорівнює $2y_0$. Такі точки називаються пучностями стоячої хвилі.

Довжина стоячої хвилі являє собою відстань між сусідніми вузлами або пучностями (рис. 213.1).

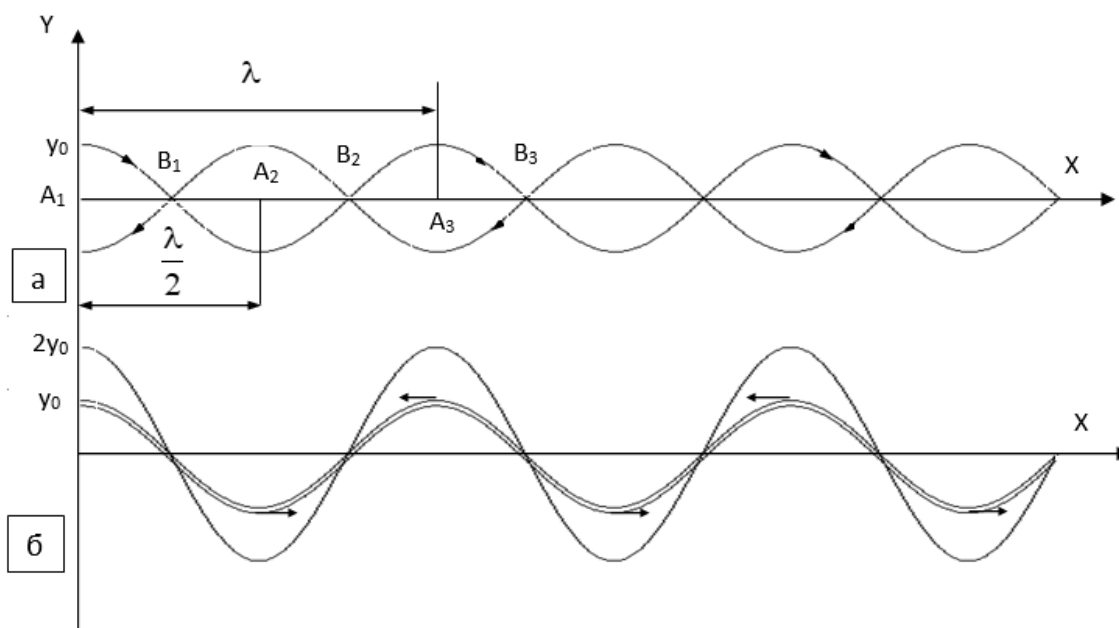


Рисунок 213.1

Координати будь-якого вузла визначаються з умови $\cos 2\pi \frac{x}{\lambda} = 0$:

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm(2k+1)\frac{\pi}{2},$$

де $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Отже,

$$x = \pm(2k+1)\frac{\lambda}{4}. \quad (213.5)$$

Для пучностей $\cos \frac{x}{\lambda} 2\pi = \pm 1$, $2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm k\pi$, де $k = 0, 1, 2, 3, \dots$. Тому

$$x = \pm k \frac{\lambda}{2}.$$

Таким чином, відстань між сусідніми вузлами (між точками B_1 і B_2 , B_2 і B_3 і т. ін.) або між сусідніми пучностями (між точками A_1 і A_2 , A_2 і A_3 тощо) дорівнює $\frac{\lambda}{2}$ (див. рис. 213.1 а, б), тобто довжина стоячої хвилі дорівнює половині довжини біжучої хвилі.

Характерні особливості стоячої хвилі:

В стоячій хвилі амплітуди коливань різні у різних місцях системи; в ній є вузли і пучності коливань (у біжучій хвилі амплітуди скрізь однакові);

У межах ділянки хвилі від одного вузла до сусіднього всі точки середовища коливаються в однаковій фазі. При переході до сусідньої ділянки фази коливань змінюються на протилежні (в біжучій хвилі фази коливань залежать від координат і часу);

В стоячій хвилі немає одностороннього переносу енергії, як це спостерігається у біжучій хвилі, оскільки в ній перенесення енергії здійснюється в протилежних напрямках хвилями, що додаються, взаємно компенсується.

Викладені положення теорії стоячих хвиль справедливі для стоячих хвиль будь – якої природи, в тому числі і електромагнітних.

Стоячі електромагнітні хвилі зручніше всього отримати в системі Лехера – в електричній двопровідній лінії. Ця лінія, в яку через індуктивний зв'язок витків L_1 і L_3 передається енергія коливань від генератора, являє собою систему із двох довгих паралельних проводів (рис. 213.2). Для живлення лінії слугує двотактний генератор струмів високої частоти.

Триелектродні електронні лампи (подвійний тріод типу 6Н7С) слугують для підсилення електромагнітних коливань, що виникають у контурі $L_1 C_M$, де L_1 - індуктивність контура; C_M - ємність монтажу.

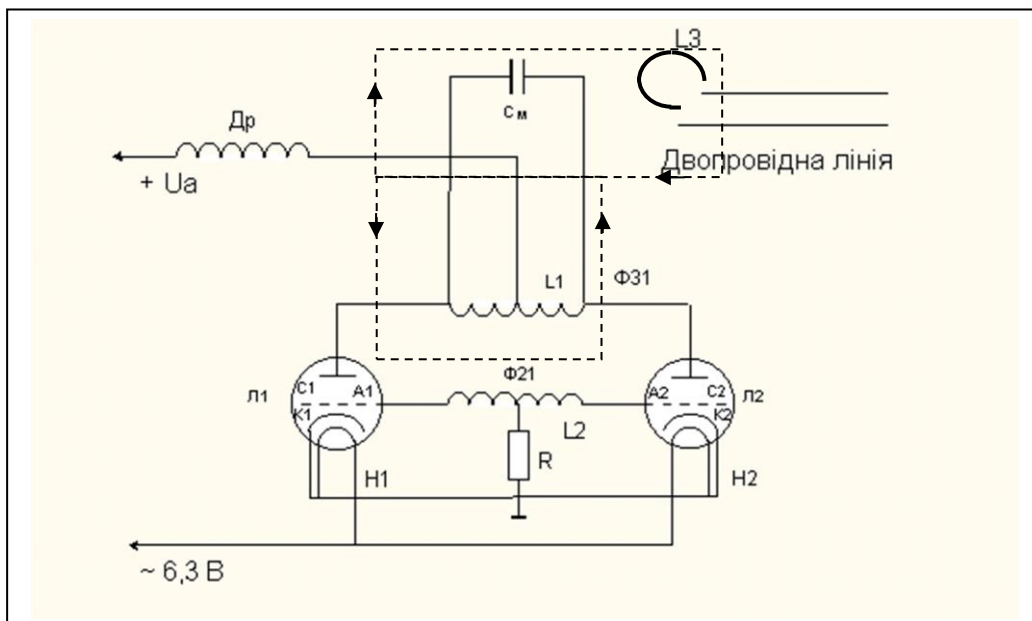


Рисунок 213.2

Для прикладу розглянемо процеси, що відбуваються в лампі L_1 . Катод лампи K_1 , розігріваючись ниткою розжарення H_1 , емітує електрони, які під дією позитивної анодної напруги U_A (+100...200В) прямують до анода A_1 , проходячи через сітку. Зміна напруги на сітці C_1 змінює струм лампи I_1 . Анодний струм I_1 створює магнітне поле в індуктивностях L_1 і L_2 . Потік індукції магнітного поля цього струму через контур з індуктивністю L_2

$$\Phi_{21} = L_{21}I_1, \quad (213.7)$$

де L_{21} - взаємна індуктивність контурів L_1 і L_2 .

В разі зміни анодного струму I_1 в контурі з L_2 виникає ЕРС індукції:

$$E_{21} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21}\frac{dI_1}{dt}. \quad (213.8)$$

Індуктивність L_2 увімкнена так, щоб зростання сили струму викликало збільшення позитивного потенціалу на сітці C_1 , що приводить до збільшення сили анодного струму I_1 . такий зв'язок називається позитивним зворотним.

Позитивна ЕРС, яка діє в колі сітки C_1 лампи L_1 , приводить до подальшого збільшення струму в L_1 доти, доки він не досягне насичення. Внаслідок насичення струму похідна в (213.8) дорівнює нулю, тобто $E_{21} = 0$. Внаслідок симетричного вмикання котушки L_{21} між сітками L_1 і L_2 $E_1 = -E_2$, тобто, коли лампа L_1 відкрита, лампа L_2 закрита. За $E_1 \rightarrow 0$ струм лампи L_1 починає зменшуватись, а це призводить до того, що сітка C_1 заряджається від'ємно і лампа L_1 запирається.

Аналогічний процес відбувається і в лампі L_2 , коли лампа L_1 закрита. Такий процес наперемінного відкривання і закривання лампи буде здійснюватися періодично з частотою, що дорівнює власній частоті контура:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_m}}. \quad (213.9)$$

Індуктивний зв'язок між L_1 і L_3 дозволяє частину потужності генерованих електромагнітних коливань передавати в лінію. Процеси, що відбуваються в схемі генератора, графічно зображені на рис. 213.3.

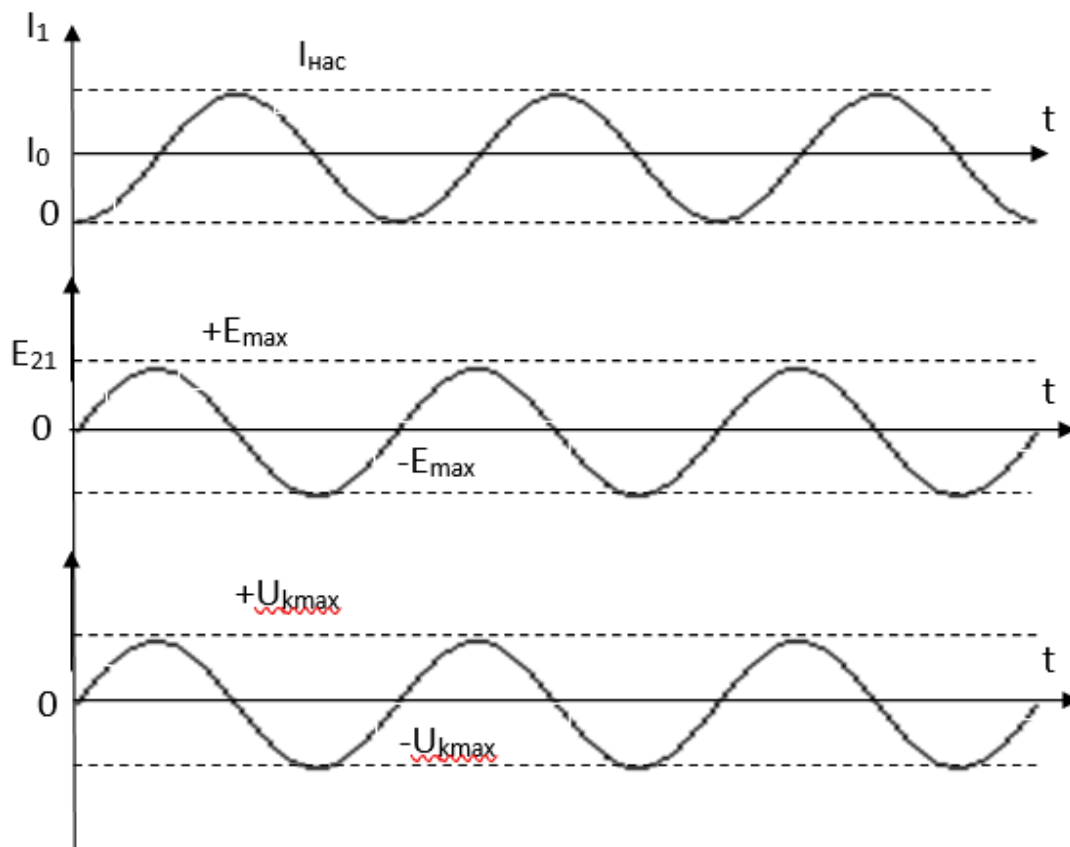


Рисунок 213.3

На рис. 213.3 $I_1, I_{\text{нас}}$ - струм лампи L_1 і струм насичення, відповідно; E_{21} - ЕРС взаємної індукції L_1 і L_2 ; U_k - напруга на контурі.

Дросель Dr має великий індуктивний опір для частоти, що генерується і слугує для запобігання проникнення струмів високої частоти в коло анодного живлення. Резистор R (510 Ом) призначено для відтоку електронів сітки на катод.

Кінці провідників лінії можуть бути розімкнені або замкнені на будь-який опір, зокрема накоротко. Якби на вхід лінії подавалася напруга, що повільно змінюється, тоді б головну роль відігравали струми провідності, і в разі розімкнених кінців лінія б не діяла. За швидкої зміни напруги на вході вирішальну роль відіграють струми зміщення в просторі між проводами. Уздовж лінії розповсюджується хвиля швидкозмінної синусоїдної напруги і відповідно косинусоїдного струму, оскільки зсув фази між струмом і напругою складає $\frac{\pi}{2}$.

На кінцях провідників будуть накопичуватися заряди протилежних знаків. Коли створений ними потенціал виявиться достатнім для того, щоб перешкодити подальшому зростанню зарядів, почнеться зворотний рух хвилі, відбитої від відкритого кінця ліній. Провідники тут відіграють роль напрямляючих для поля,

до того ж майже всі силові лінії електричного поля закінчуються на провідниках. Тому на відміну від однопровідної лінії (антени) випромінювання в двопровідній лінії практично відсутнє.

Хвилі, які ідуть від генератора і відбиті від кінця, мають однакові частоти і тому між собою інтерферують. Проте картина розміщення максимумів і мінімумів, які утворюються в результаті інтерференції хвиль, так швидко змінюється, що прослідкувати за нею неможливо. Інший результат вийде, якщо довжина лінії у випадку відкритого кінця виявиться такою, що дорівнює непарному числу четвертої частини довжини хвилі. Тоді, в результаті додавання прямої і зворотної хвиль, положення вузлів і пучностей будуть постійними.

Якщо є перемикач в кінці проводів, то там утворюються пучність струму і вузол напруги (рис. 213.4). В разі розімкнених кінців проводів на них утворюються пучність напруги і вузол струму. Частоту генератора підбирають такою, щоб на проводах уклалося ціле число четвертин довжини хвилі, тоді вузли і пучності будуть чітко виражені.

Виявити пучність напруги можна, накинувши на проводи перемикачки з неоновими лампочками. У місцях пучностей напруги неонові лампочки світитимуться. Пересуваючи неонову лампочку вздовж двопровідної лінії, знаходять місця найбільш інтенсивного світіння газу. Відстань між сусідніми пучностями дорівнює довжині стоячої хвилі, або половині довжини біжучої хвилі. Пучність струму можна спостерігати, переміщуючи уздовж проводів перемикачку з лампочкою розжарювання. В пучностях струму лампочка горітиме найбільш яскраво. Замість зміни частоти генератора можна переміщати дріт у перемикачку в кінці двопровідної лінії, добиваючись того, щоб довжина дорівнювала цілому числу четвертин хвилі, тобто

Систему Лехера можна використовувати для вимірювання швидкості електромагнітних хвиль v і діелектричної проникності середовища ε (особливо рідин).

Знаючи частоту генератора ν і визначивши довжину хвилі λ , знаходять швидкість $v = \lambda \nu$.

Занутивши лінію у діелектрик (рідину), обчислюють довжину біжучої хвилі, що дорівнює подвійній відстані між сусідніми вузлами або пучностями, визначають швидкість хвилі v , а за законом Максвелла ($v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$) можна знайти діелектричну проникність, оскільки для неферромагнітних речовин $\mu = 1$; швидкість електромагнітних хвиль у вакуумі $c = 3 \cdot 10^8$ м/с.

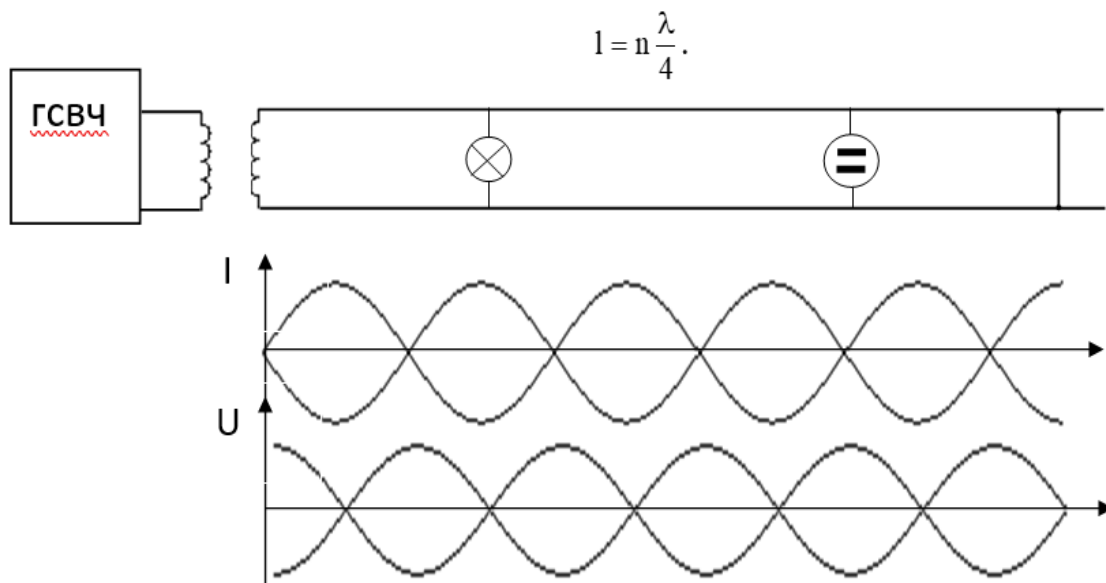


Рисунок 213.4

Генератор незагасаючих ультракоротких хвиль, установлений на підставці, живиться від мережі змінного струму через випрямляч. Збільшення або зменшення індуктивного зв'язку між витками генераторного контура і входним витком лінії здійснюється їх взаємним зближенням або віддаленням.

Щоб знайти вузли і пучності струму і напруги, перемичку з лампочкою розжарення або неоновую лампочкою слід вести уздовж лінії від її кінця до генератора; положення максимального світіння лампочки покаже на установлення стоячої хвилі; між генератором і перемичкою укладається парне число четвертин довжини хвилі, а в положенні максимального світіння лампочки знаходиться остання пучність струму або напруги.

Послідовність виконання роботи

1. Ввімкнути живлення генератора від мережі через випрямляч.

2. Настроїти двопровідну лінію на утворення стоячої хвилі. Для цього накласти на провід в кінці лінії перемичку з лампочкою і повільно переміщувати її уздовж лінії. Якщо лампочка не засвітиться, слід підсилити зв'язок між генератором і лінією переміщенням генератора.

3. Визначити довжину стоячої хвилі за положеннями пучностей струму. Для цього повільно переміщувати перемичку з лампочкою розжарювання вздовж лінії і відмічати положення початкового і кінцевого максимумів світіння і їх загальну кількість. Виміряти відстань між положенням крайніх максимумів і розрахувати довжину стоячої хвилі.

4. Аналогічні вимірювання виконати з неоновую лампочкою, визначивши λ_{cm} за пучностями напруги.

5. Перевірити, що відстань між сусідніми пучностями струму і напруги складає $0.5\lambda_{cm}$. Для цього знайти положення пучності струму лампочкою розжарювання і найближчої пучності напруги неоновую лампочкою. Вимірявши віддаль між цими пучностями, порівняти її з довжиною стоячої хвилі.

6. За середнім значенням довжини стоячої хвилі (за пучностями струму і напруги) визначити довжину біжучої хвилі.

7. Обчислити частоту генератора: $\nu = \frac{c}{\lambda}$.

№ п/п	l_1 , м	L_2 , м	L_3 , м	λ , м	ν , Гц	$\Delta\nu$, Гц
1						
2						
3						

Контрольні запитання

1. Що називається хвилею і довжиною хвилі?
2. В чому полягає інтерференція хвиль? Умова її здійснення.
3. Що таке система Лехера?
4. Що таке стояча хвиля?
5. Умови утворення стоячої хвилі в системі Лехера, замкненій містком накоротко.
6. Як монтується двопровідна лінія на утворення стоячих хвиль?
7. Як визначається швидкість електромагнітної хвилі в разі використання системи Лехера?

Лабораторна робота № 214

ВИВЧЕННЯ РОБОТИ ОСЦИЛОГРАФА І ДОСЛІДЖЕННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК (ВАХ) ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ

Мета роботи: ознайомитися з будовою і принципом роботи осцилографа; отримати і пояснити ВАХ запропонованих викладачем елементів електричних схем.

Прилади і приладдя: електронний осцилограф, приставка до осцилографа, набір досліджуваних елементів, джерело змінної напруги.

До виконання лабораторної роботи можна приступати лише після ретельного вивчення опису роботи з осцилографом. Кінескоп осцилографа знаходиться під напругою до 1000 В, тому, працюючи з осцилографом, необхідно суворо дотримуватися техніки безпеки.

Опис установки

Електронний осцилограф призначено для дослідження змінних періодичних напруг: залежності напруги від часу, частоти періодичної напруги, зсуву фаз двох напруг однакових частот. Користуючись допоміжними приладами, за допомогою осцилографа можна визначити силу струму і його залежність від часу, потужність, тривалість одиничного сигналу напруги.

Переваги осцилографа – висока чутливість і мала інерційність (можна досліджувати процеси тривалістю $10^{-6} \div 10^{-8}$ с).

Електронний осцилограф складається з електронно-променевої трубки (ЕПТ), каналів вертикального (Y-каналу) і горизонтального (X-каналу) відхилень електронного променя, блока живлення, калібраторів амплітуди і тривалості напруги, органів управління. Електронно-променева трубка (ЕПТ) перетворює сформовані Y– і X– каналами напруги у видиме зображення.

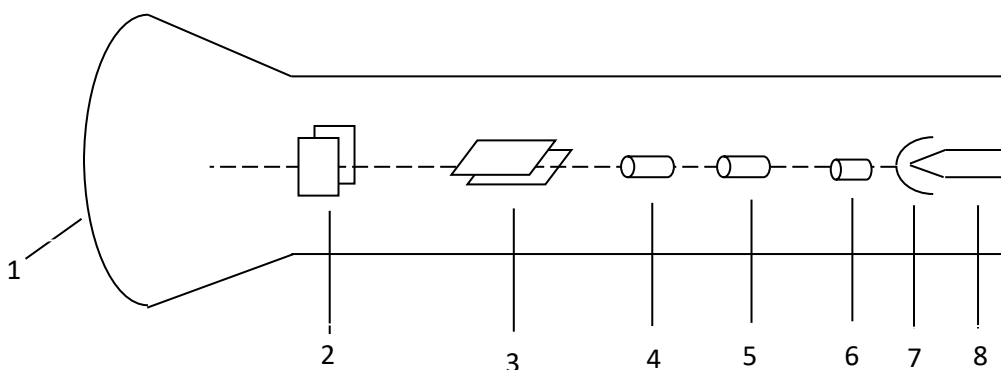


Рисунок 214.1

ЕПТ (рис.214.1) складається із скляного балона з тиском газу біля 10^{-6} мм рт.ст., в якому розміщені електроди. Потік електронів отримують термоелектронною емісією із катода 7, який розігрівають електродом 8 (рис 1), де 6 – керуючий електрод; 4 – анод для фокусування електронного променя ; 2,3 – пластини відповідно для вертикального і горизонтального відхилення променя; 1 – флюоресціюючий екран. Між катодом і першим анодом 5 прикладено прискорююче електричне поле (напруга порядку 10^3 в). Після проходження між відхиляючими пластинами електронний промінь потрапляє на флуоресціюючий екран, який являє собою шар люмінофора, нанесеного на внутрішній стінці скляного балона. Екран в місці попадання електронів світиться. Свічення екрана під дією падаючих електронів пояснюється тим, що вони, стикаючись з атомами люмінофора, передають їм свою кінетичну енергію, визиваючи їх збудження. Переходячи в нормальний стан, збуджені атоми випромінюють світло люмінесценції. Якщо енергія електронів недостатня для збудження атомів, ніякого свічення спостерігатись не буде. Тому не можна зменшувати прискорюючий потенціал нижче певної межі.

Якщо до пари паралельних пластин , між якими проходить електронний пучок, підключити напругу, то електрони відхиляються від свого попереднього напрямку руху: на ділянці шляху між пластинами на них діятиме сила $F = e E$, напрямлена до позитивно зарядженої пластини. Величина зміщення y світної точки на екрані осцилографа під дією електричного поля однієї пари пластин виражається формулою

$$y = \frac{lL}{2dU} U_{nl} , \quad (214.1)$$

де U_{nl} -напруга, підведена до цих пластин; l - довжина пластин; L -відстань від пластин до екрана; U - потенціал другого анода по відношенню до катода, який визначає кінетичну енергію електронів; d - віддаль між пластинами. В кожній конкретній трубці U, L, l, d є величини постійні, і тому зміщення світної точки на екрані прямо пропорційне прикладеній до відхиляючих пластин напрузі. На цій властивості фактично і базуються всі застосування осцилографів. Дійсно, якщо до однієї пари пластин прикладена напруга, пропорційна величині X , яка вимірюється, а до другої пари пластин напруга, пропорційна величині $y = f(x)$, то на екрані електронно-променевої трубки слід променя буде описувати функцію $f(x)$ в прямокутних координатах.

В разі прикладення до пластин напруги U_x слід електронного променя відхиляється на відстань x у горизонтальному напрямі. Відношення $A_x = x/U_x$ називається чутливістю ЕПТ за напругою в напрямі X .

Аналогічно для відхилення у вертикальному напрямі y $A_y = y/U_y$ є чутливість за напругою в напрямі Y .

За постійних напруг живлення ЕПТ чутливості A_x і A_y постійні для даної трубки. Крім цих величин ЕПТ характеризується робочими напругами на

електродах, тривалістю післясвітіння, вхідною ємністю пластин і розмірами екрана.

Крім трубок з відхиленням променя електричним полем, існують трубки з відхиленням променя магнітним полем.

Канал вертикального відхилення забезпечує підсилення вхідної напруги до рівня, необхідного для отримання нормального зображення на екрані по вертикалі. Y-канал складається із вхідного атенюатора (подільника напруги) і широкополосного підсилювача напруги. З виходу підсилювача сигнал подається на пластини вертикального відхилення.

Канал горизонтального відхилення слугує для створення розгортаючої напруги (у більшості випадків пилоподібної форми (рис.4)) її підсилення і синхронізації. Підсилювач напруги X- каналу аналогічний підсилювачу Y – каналу. Якщо на Y – канал подати періодичну змінну напругу (наприклад,

$U_x = U_0 \cos \omega t$), світна точка на екрані буде здійснювати відповідні періодичні переміщення в Y – напрямі. Через наявність післясвітіння екрана на ньому буде видно нерухому вертикальну лінію. Але якщо на горизонтально відхиляючі пластини подати напругу, яка лінійно зростає з часом (до визначеної максимальної напруги $U_{\max}$) $U_x = kt$, то, згідно із співвідношенням (1), світна точка одночасно рівномірно переміщуватиметься в горизонтальному напрямі. На екрані буде видно залежність напруги, поданої на вертикальні пластини, від часу.

Для одержання зображення достатньої тривалості необхідне багаторазове повторення розгортки синхронно з вертикальним сигналом. Тому в кінці кожного циклу розгортки напруга повинна швидко спадати до початкового рівня (рис. 214.2).

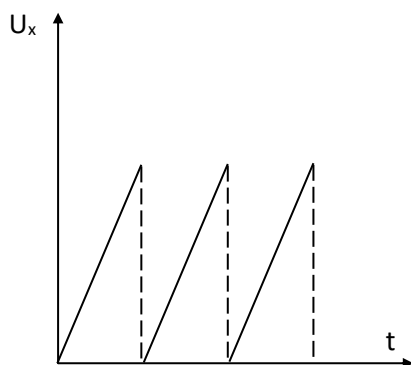


Рисунок 214.2

У більшості осцилографів напругу розгортки отримують за допомогою генераторів пилоподібної напруги, дія яких ґрунтується на заряді конденсаторів через великий опір під час прямого ходу і їх швидкому розряду через малий опір під час зворотного ходу.

На час зворотного ходу променю його, як правило, гасять, подаючи з генератора розгортки від'ємний імпульс на модулятор або позитивний імпульс на катод ЕПТ.

Блок синхронізації забезпечує одержання нерухомого зображення на екрані сигналу, що досліджується. Для цього роботу генератора розгортки синхронізують з напругою, що досліджується.

Для одержання на екрані осцилографа залежності сили струму через досліджуваний елемент від прикладеної до нього напруги використовується приставка (рис. 214.3). З рис. 214.3 видно, що напруга між точками М і У пропорційна по величині і співпадає по фазі з силою струму через досліджуваний елемент.

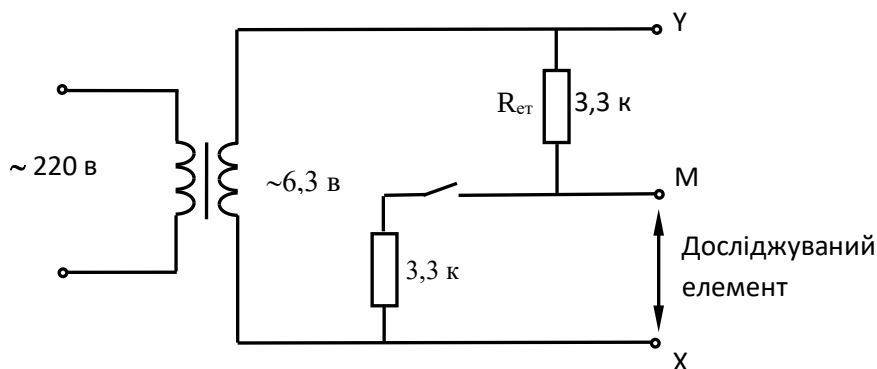


Рисунок 214.3

Падіння напруги на досліджуваному елементі знімають з точок М і Х, ключ К використовується під час калібрування приладу.

Якщо напругу на опорі R_{em} , пропорційну струму через досліджуваний елемент, підвести до клем підсилювача вертикально відхиляючих пластин осцилографа, а напругу, яка падає на елементі, підвести до клем горизонтально відхиляючих пластин, то електронний промінь на екрані викреслить вольт-амперну характеристику елемента. По виду вольт-амперної характеристики можна визначити характер елемента, що досліджується.

Теоретичні відомості

Проаналізуємо, що буде спостерігатися на екрані осцилографа при включенні між точками Х і М різних елементів.

1. При дослідженні резистора на екрані осцилографа повинна виникнути пряма лінія, оскільки, згідно із законом Ома, залежність $I = f(U)$ на активному навантаженні прямо-пропорційна, а різниця фаз між коливаннями I та U рівна нулю. Ця пряма лінія буде нахилена під деяким кутом α до горизонту, причому $\text{tg } \alpha = \frac{R_x}{R_{em}}$. У крайньому випадку, коли $R_x \rightarrow \infty$ (обрив), струм відсутній ($I=0$) і напруга буде лише між точками розриву М і Х, оскільки $\varphi_y - \varphi_m = R_{em}I = 0$. Тому

на екрані осцилографа спостерігатиметься горизонтальна лінія. Під час короткого замикання клем Х і М ($R_x = 0$) сигнал подаватиметься лише на канал У осцилографа і, відповідно, отримаємо на екрані вертикальну лінію.

2. Більш складна картина спостерігається при дослідженні діода. Основною особливістю діодів є одностороння провідність. При прямому ввімкненні діод є хорошим провідником електричного струму, а при зворотному – струм майже відсутній. На рис. 214.4 приведена ВАХ кремнієвого діода. Нелінійні властивості $p-n$ переходу використовуються для випрямлення змінного струму.

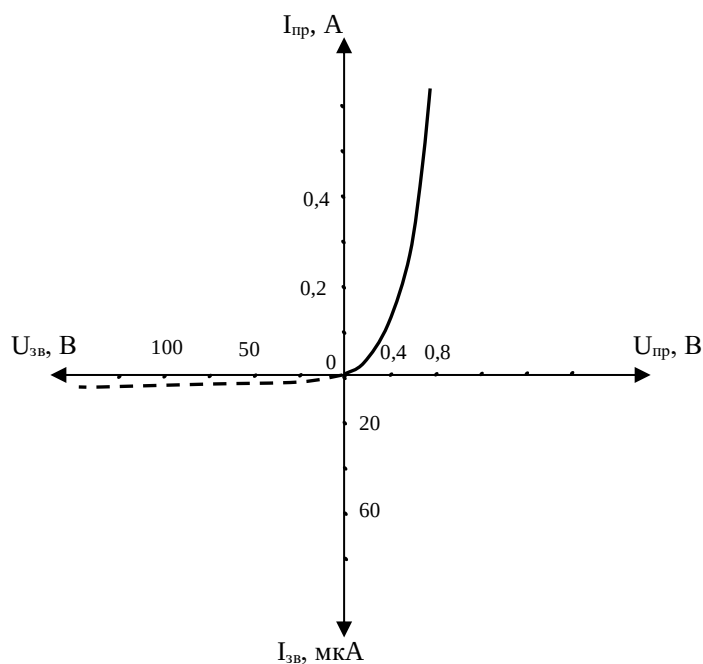


Рисунок 214.4

Якщо збільшувати зворотну напругу ($U_{зв}$) на напівпровідниковому діоді, то відбувається пробій $p-n$ переходу, при якому зворотній струм різко зростає. Розрізняють два види пробою: електричний (оборотний) і тепловий (необоротний). Явище електричного пробою знаходить застосування в кремнієвих діодах, які отримали назву кремнієвих стабілітронів. ВАХ стабілітрона приведена на рис. 214.5.

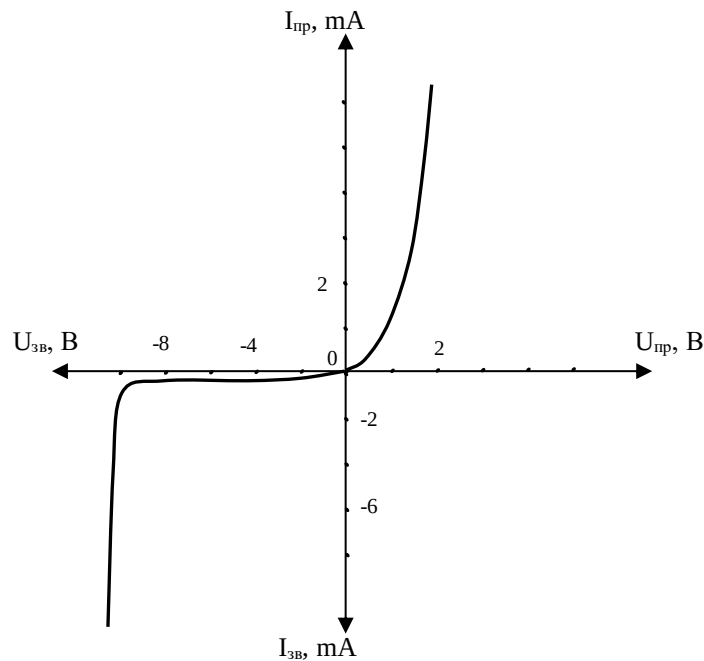


Рисунок 214.5

В режимі пробою ВАХ має вигляд прямої вертикальної лінії, яка проходить майже паралельно вісі струмів. Тому при зміні в широких межах струму падіння напруги на приладі практично не змінюється. Ця властивість кремнієвих діодів і дозволяє використовувати їх в якості стабілізаторів напруги.

3. Розглянемо досліджуваний елемент-конденсатор. Змінний струм через конденсатор випереджує напругу на ньому по фазі на $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$. Тому світна точка на екрані осцилографа описуватиме еліпс. Еліпс буде спостерігатись також і при дослідженні індуктивності, оскільки гармонічні зміни струму на індуктивному навантаженні відстають по фазі від коливань напруги на $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути осцилограф і дати йому прогрітись протягом 3-5 хвилин.
2. Ручками керування зміщенням променя У і Х вивести світну точку в центр екрана. Ручками „Яскравість” і „Фокус” отримати точку, за яскравістю зручну для спостереження і мінімальних розмірів.
3. Калібровка. Скласти схему (рис.6), увімкнути приставку у мережу, вимкнути тумблер „Розгортка”. На екрані виникне горизонтальна лінія. При ввімкненні кнопки К (рис.3) лінія відхилиться від

горизонтального положення. Ручками „Підсилення X” і „Підсилення Y” добитися, щоб кут нахилу був рівний 45^0 .

4. До клем X і M під'єднати запропоновані викладачем досліджувані елементи. Отримані на екрані осцилографа ВАХ перемалювати в зошит.

5. Увімкнути тумблер „Розгортка”. Ручкою „Частота розгортки” отримати стійке зображення на екрані осцилографа для випадків, коли до клем X і M увімкнено: а) резистор, б) діод, в) стабілітрон. Зображення на екрані перенести в зошит.

6. Вимкнути осцилограф і приставку із мережі.

Контрольні запитання

1. Яке призначення електронно-променевої трубки в осцилографі?

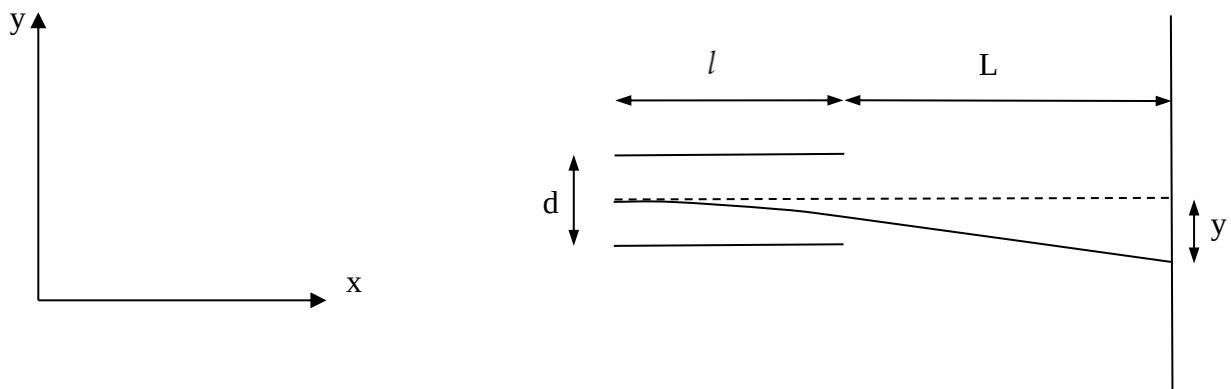
2. Як здійснюється відхилення електронного променя в електронно-променевої трубки?

3. Для чого служить генератор розгортки в осцилографі? Якої форми напругу він генерує?

4. Для чого потрібна синхронізація?

5. Пояснить отримані на екрані осцилографа і зарисовані в зошит зображення.

Додаток



Позначимо швидкість, з якою електрони влітають до відхиляючих пластин через v_x . Знайдемо зміщення y світної точки на екрані осцилографа (рис.6) під дією прикладеної до пластин напруги U_{nl} . Під час польоту електронів між пластинами на протязі часу t на них діятиме з боку однорідного електричного поля сила F_y ,

$$F_y = eE = e \frac{U_{nl}}{d}, \quad F_y = m_e a_y,$$

яка надаватиме електронам постійне прискорення $a_y = \frac{eU_{nl}}{m_e d}$.

Оскільки $v_y = a_y t$; $t_1 = \frac{l}{v_x}$, а час прольоту електрона від пластин до екрана

$t_2 = \frac{L}{v_x}$, то відхилення на екрані маємо:

$$y = v_y t_2 = \frac{eU_{nl} l L}{m_e d v_x^2}, \quad \frac{m v_x^2}{2} = eU - \text{кінетична енергія електрона,}$$

прискореного напругою U кінескопа. Тому $y = \frac{lL}{2dU} U_{nl}$. Отже, відхилення світної точки на екрані прямо пропорційне відхиляючій напрузі.

Лабораторна робота № 216

ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА ДО МАСИ МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Мета роботи: ознайомитись з принципом роботи магнетрона та визначити відношення заряду електрона до його маси.

Прилади і приладдя: Касета ФПЕ-03, яка містить електронну лампу 6Ф6С (радіус анода 1 мм); соленоїд довжиною $l = 167\text{ мм}$ і діаметром 85 мм, число витків соленоїда $N = 2700$; джерело живлення лампи: напруга накалу 2,5 - 4,5 В, анодна напруга 12 - 120 В; джерело живлення соленоїда 0 - 24В.

Теоретичні відомості

Магнетрон - вакуумна електронна лампа, в якій величина анодного струму регулюється одночасно електричним та магнітним полями. Магнетроном може бути електронна лампа з циліндричним анодом та прямолінійним катодом, розміщеним по осі анода.. Лампа розміщується в магнітному полі, індукція якого напрямлена вздовж осі анода (рис. 216.1).

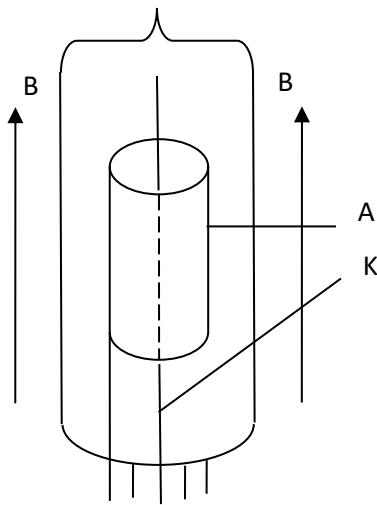


Рисунок 216.1

Якщо індукція поля $B = 0$, то електрони рухаються, в основному, вздовж радіуса анода від катода до анода під дією електричного поля. Напруженість електричного поля напрямлена від анода до катода (рис. 216.2а). При наявності магнітного поля на електрони буде діяти сила Лоренцо

$$\begin{aligned}\vec{F}_L &= e[\vec{v}\vec{B}] \\ F_L &= evB \sin \alpha\end{aligned}\tag{216.1}$$

де α - кут між векторами $\vec{v}$ і $\vec{B}$

$$v \sin \alpha = v_r$$

v_r - радіальна складова швидкості електронів.

Сила Лоренца змінює тільки напрямок швидкості електронів, тому що вона напрямлена перпендикулярно швидкості (рис. 216.26).

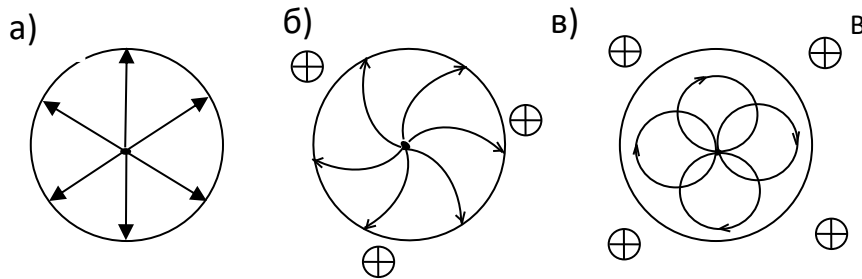


Рисунок 216.2

Тому траєкторії електронів являють собою дуги кіл, що лежать в площинах, перпендикулярних індукції магнітного поля. Запишемо другий закон Ньютона для руху електрона в магнітному полі:

$$F = ma$$

$$F = evB \sin \alpha$$

$$a = a_n = \frac{v_i^2}{r}$$

$$ev_r B = m \frac{v_r^2}{r} \quad (216.2)$$

Визначимо радіус кола траєкторії електрона:

$$r = \frac{mv_r}{eB}$$

При зростанні індукції магнітного поля B радіус кривизни r зменшується. Якщо виконується умова

$$r \leq \frac{R_A - R_K}{2}$$

де R_A - радіус анода, R_K - радіус катода, то діаметр траєкторії стає меншим віддалі між катодом та анодом. Електрони при цьому не досягають поверхні анода. Вони повертаються до катода (рис. 216.2в). При цьому спостерігається зменшення сили анодного струму. Звичайно радіус катода набагато менший радіуса анода:

$$R_K \ll R_A,$$

тому $r = 0.5R_A$ і зменшення анодного струму спостерігається при індукції магнітного поля, яка називається критичною:

$$B_{кр} = \frac{2mv}{eR_A} \quad (216.4)$$

Швидкість електронів v можна обчислити за анодною напругою U_A . Потенціальна енергія електронів в електричному полі анодної напруги перетворюється в кінетичну енергію електрона:

$$eU_A = \frac{mv^2}{2}, \quad (216.5)$$

звідси

$$v = \sqrt{\frac{2U_A e}{m}} \quad (216.6)$$

З рівнянь (216.4) і (216.6) визначаємо e/m :

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_A}{B_{кр}^2 R_A^2} \quad (216.7)$$

Індукцію магнітного поля, що створюється струмом в обмотці соленоїда, обчислимо за формулою для скінченного соленоїда:

$$B = \frac{\mu_0 N I_c (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)}{2l} \quad (216.8)$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнітна постійна, I_c - сила струму соленоїда, N - число витків обмотки соленоїда, l - довжина соленоїда, α_1, α_2 - кути між радіусом-вектором точки розрахунку і напрямком твірної соленоїда. Ця формула виведена за законом Біо-Савара-Лапласа. Для центра соленоїда, де знаходиться електронна лампа:

$$\cos \alpha_1 = -\cos \alpha_2 = \frac{l}{\sqrt{l^2 + d^2}} \quad (216.9)$$

$d = 2R_c$ - діаметр соленоїда.

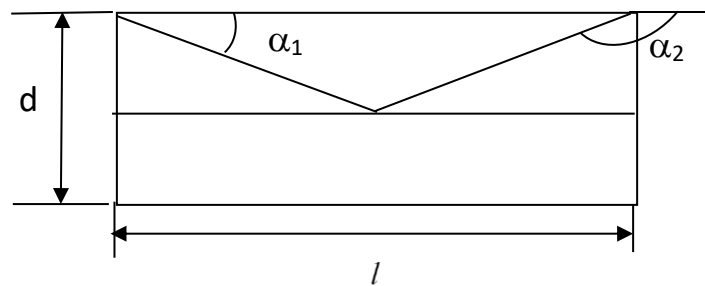


Рисунок 216.3

Установка для визначення (e/m) складається з двох електричних кіл: кола електричної лампи (рис. 216.4) і кола соленоїда (рис. 216.5).

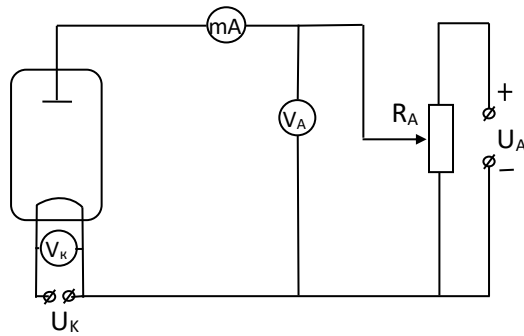


Рисунок 216.4

Коло електричної лампи містить: джерело анодної напруги U_A ; змінного опору R_A для встановлення анодної напруги; вольтметра V_A для вимірювання анодної напруги; міліамперметра для вимірювання анодного струму; джерела напруги нагріву катода лампи U_K ; опору для встановлення напруги нагріву і вольтметра V_K для його вимірювання.

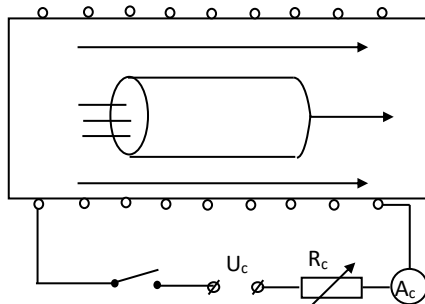


Рисунок 216.5

Електронна лампа поміщена в середину соленоїда. Постійний електричний струм в обмотці соленоїда створює в ньому магнітне поле. Магнітна індукція цього поля повинна бути напрямлена вздовж катода лампи (рис.5). Сила струму в соленоїді від джерела напруги U_c регулюється змінним опором R_c і вимірюється амперметром A_c .

Послідовність виконання роботи

1. Провести зовнішній огляд установки. Соленоїд з електронною лампою знаходиться в касеті ФПЕ-03. В роботі використовується лампа 6Ф6С. Радіус анода лампи $R_A = 1$ мм.
2. Перевірити, щоб реостати R_A і R_K були встановлені на мінімальні анодну та катодну напруги.
3. З дозволу викладача увімкнути живлення установки, натиснути на праву кнопку блока живлення.

4. Встановити регулятором " U_A " анодну напругу, вказану на робочому місці. Прогріти лампу 7 - 10 хв.

5. Регулятором " I_c " встановити силу струму в соленоїді, записати його значення і відповідне значення сили анодного струму. Вимірювання виконувати через 0,2 А сили струму соленоїда.

I_c, A				
I_A, mA				
$\Delta I_A, mA$				

6. Зміна сили анодного струму більш чутлива до дії магнітного поля, тому намалювати графік $\Delta I_A = f(I_c)$, де ΔI_A - зміна анодного струму при зміні сили струму в соленоїді. Критичному значенню сили струму соленоїда відповідає початок спаду анодного струму.

7. За формулою (8) обчислити значення $B_{кр}$ для $I_{c,кр}$; $l = 0,167$ м, $d = 0,085$ м, $N = 2700$ витків.

8. За формулою (7) обчислити відношення (e/m) в одиницях СІ; а за формулою (6) визначити швидкість електронів у лампі.

9. Перевірити одержане значення відношення (e/m) з табличним значенням.

Контрольні запитання

1. Перерахувати властивості електричних зарядів.
2. Записати II закон Ньютона для руху електрона в магнітному полі.
3. Пояснити принцип роботи магнетрона.
4. Що таке критична індукція для магнетрона?
5. Який вплив на залежність $I_A = f(B)$ створює розподіл електронів за швидкостями?