

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ
СТУСА
ФІЗИКО – ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЗАГАЛЬНОЇ ФІЗИКИ І ДИДАКТИКИ ФІЗИКИ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ
ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ІЗ ЗАГАЛЬНОЇ ФІЗИКИ
(електрика, магнетизм, оптика)**

**Вінниця
2020**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ
ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ІЗ ЗАГАЛЬНОЇ ФІЗИКИ
(електрика,магнетизм, оптика)**

(для студентів денної форми навчання спеціальностей 104 «Фізика та астрономія», 014.08 «Середня освіта (фізика)», 122 «Комп'ютерні науки», 125 «Кібербезпека», 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»)

Під загальною редакцією Русакова В.Ф.

Вінниця
2020

УДК 378,147:52

Р 882

*Рекомендовано до друку вченою радою фізико-технічного
факультету Донецького національного університету імені Василя
Стуса
(протокол № 6 від 24.01.2020 р.)*

Укладачі: *В. Г. Пищюга*, кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри загальної фізики і дидактики фізики ДонНУ імені Василя Стуса;
Р. О. Пишкін, завідувач навчальною лабораторією механіки і молекулярної фізики кафедри загальної фізики і дидактики фізики ДонНУ імені Василя Стуса;
К. В. Демченко, завідувач навчальною лабораторією методики викладання фізики кафедри загальної фізики і дидактики фізики ДонНУ імені Василя Стуса.

Рецензент: *В. Г. Крижановський*, д-р технічних наук, професор, професор кафедри радіофізики та кібербезпеки ДонНУ імені Василя Стуса.

Р 882 Русаков В. Ф. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (електрика, магнетизм, оптика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей «комп'ютерні науки», «кібербезпека», «фізика та астрономія», «середня освіта (фізика)» «прикладна фізика та наноматеріали») / В. Ф. Русаков, В. Г. Пищюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко – Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2020 – 131 с.

До методичних вказівок включені лабораторні роботи з електрики, магнетизму і оптики, наведені основні теоретичні положення про досліджувані в роботах фізичні явища, формули фізичних законів, опис лабораторного обладнання, порядок виконання робіт, питання для контролю знань. Для зручності студентів наведені основні формули розрахунку похибок та необхідні фізичні константи.

УДК 378,147:52

© Русаков В.Ф., 2020

© Пищюга В. Г., 2020

© Пишкін Р. О., 2020

© Демченко К. В., 2020

© ДонНУ імені Василя Стуса, 2020.

Загальні положення про оформлення лабораторних робіт та розрахунків похибок.

Кожен студент повинен мати зошит, в якому записується *назва лабораторної роботи, мета роботи, основні формули, фізичні величини, які безпосередньо вимірюються (таблиця) або розраховуються по формулах, послідовність операцій (дій) при виконанні роботи і відповіді на питання допуску до виконання роботи*. Математичні розрахунки бажано виконувати з використанням комп'ютерних програм. **Звіт про виконання лабораторної роботи повинен бути виконаний на окремих листах і включати:**

- розрахунки середніх значень фізичних величин,
- розрахунки їх похибок,
- графіки функціональних залежностей досліджуваних процесів,
- аналіз отриманих експериментальних результатів роботи,
- відповіді на питання для захисту роботи.

Похибки вимірювання фізичних величин діляться на середньоквадратичні випадкові, систематичні і повні. Випадкові похибки σ_x залежать від інструментів або приладів, якими вимірюється фізична величина, способів і умов вимірювання. Систематичні похибки δ визначаються половиною найменшого поділку шкали приладу або в процентах, які вказані на приборі. Повна похибка дорівнює $\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \frac{\delta^2}{3}}$. Величина випадкової похибки залежить від кількості вимірів, чим більше вимірів тим менше похибка. Щоб врахувати цю залежність, вводиться коефіцієнт, який називається коефіцієнтом Ст'юдента і визначається теорією ймовірності, існує спеціальна таблиця коефіцієнтів Ст'юдента. В лабораторних роботах вимірювання величин робиться 5 разів.

Розрахунок похибки величини X_i , яка безпосередньо вимірюється n разів. Спочатку знаходиться середнє значення величини \bar{X} ,

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, \quad (1)$$

потім її середньоквадратична похибка:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2)$$

і записується результат вимірювання величини: $\bar{X} \pm \sigma_x$.

Розрахунок середнього значення і похибки величини V , яка безпосередньо не вимірюється, а розраховується по формулі, тобто V являється функцією декількох величин $V = f(\alpha, \ell, \omega)$, які безпосередньо вимірюються – $\alpha_i, \ell_i, \omega_i$. В цьому випадку спочатку знаходяться середні

значення $\bar{\alpha}$, $\bar{\ell}$, $\bar{\omega}$ за формулою (1), потім – середнє значення величини $\bar{V} = f(\bar{\alpha}, \bar{\ell}, \bar{\omega})$, далі розраховують похибки вимірюваних величин σ_{α} , σ_{ℓ} , σ_{ω} за формулою (2). Похибка величини V знаходиться за формулою:

$$\sigma_V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial \alpha} \sigma_{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \ell} \sigma_{\ell}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \omega} \sigma_{\omega}\right)^2}. \quad (3)$$

Результат записується таким чином: $\bar{V} \pm \sigma_V$.

Розрахунок середнього значення і похибки величини, яка знаходиться за графіком ($y = f(x)$).

В деяких лабораторних роботах необхідно знайти величину, яка являється коефіцієнтом пропорційності в функціональній залежності $y_i = f(x_i)$, (наприклад – температурний коефіцієнт електричного опору провідника α у функції $R_i = R_0(1 + \alpha t_i)$). В такому випадку використовують метод найменших квадратів. Цей метод використовують тільки в тому випадку, коли функціональну залежність $y_i = f(x_i)$ можна представити в підібраній системі координат лінійною функцією. Наприклад, функція $z_i = z_0 e^{-kt_i}$ переводиться в лінійну функцію, якщо взяти натуральний логарифм функції $\ln z_i = -kt_i + \ln z_0$, тоді в системі координат $\ln z_i$ - t_i отримаємо пряму лінію. Порівнюючи отриманий вираз із рівнянням прямої $y_i = kx_i + b$, маємо: $\ln z_i$ це y_i ; t_i це x_i , а $\ln z_0$ це b . Так, закон Кюри-Вейсса для магнітної сприйнятливості $\chi_i = \frac{C}{T_i - \theta}$ переводиться в лінійну функцію таким чином: $\chi_i^{-1} = C^{-1}(T_i - \theta)$, де $k = C^{-1}$, $b = \theta C^{-1}$.

Ідея метода найменших квадратів полягає в тому, щоб знайти такі k і b прямої $y = kx + b$, щоб її ординати y мали найменші відхилення від експериментальних значень y_i , тобто, щоб сума квадратів $\sum_{i=1}^n (kx_i + b - y_i)^2 = \varphi$ була найменшою. Для цього необхідно, щоб $\frac{\partial \varphi}{\partial k} = 0$ і $\frac{\partial \varphi}{\partial b} = 0$, з цих двох рівнянь знаходять k і b . Опускаючи викладки, наведемо формули для k і b :

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4)$$

$$b = \bar{y} - k\bar{x}. \quad (5)$$

Для визначення похибок σ_k , σ_b знайдених параметрів k і b прямої $y = kx + b$ необхідно зробити наступне: розрахувати $y_{ip} = kx_i + b$, використовуючи виміряні x_i та знайдені k і b , потім розрахувати величину φ_m :

$$\varphi_m = \sum_{i=1}^n (y_{ip} - y_i)^2,$$

тоді похибка параметра k знаходиться за формулою:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{\varphi_m}{(n-2) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (6)$$

$$\text{а параметра } b - \text{ за формулою } \sigma_b = \sigma_k \sqrt{\bar{x}^2 + \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}. \quad (7)$$

При обробці результатів вимірювання (знаходженні похибок) виконуються арифметичні дії множення і ділення. Тому постає питання, скільки знаків (цифр) після коми залишати. Оскільки береться найбільша похибка, то поступають таким чином: якщо приладом вимірюється величина, наприклад, до третього знаку коми, а в кінцевому результаті (після всіх арифметичних дій) четвертий знак округляють – якщо четвертий знак 5 і більше, третій знак збільшують на одиницю, а четвертий знак відкидають, якщо четвертий знак менше 5, то його відкидають.

Фізичні константи	
Швидкість світла у вакуумі:	$c = 2.99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Прискорення вільного падіння:	$g = 9.80665 \text{ м/с}^2$
Число Авогадро:	$N_A = 6.022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Стала Стефана – Больцмана	$\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Стала Больцмана:	$k = 1.380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Заряд електрона:	$e = 1.60217733 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Маса електрона:	$m_e = 9.109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Маса протона:	$m_p = 1.6726231 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Стала в законі Віна	$v = 2,897768 \cdot 10^{-4} \text{ м} \cdot \text{К}$
Стала Рідберга:	$R_y = 13,605693009(84) \text{ эВ}$
Радіус Бора:	$a_0 = 5,2917720859(36) \cdot 10^{-11} \text{ м}$
Магнетон Бора:	$\mu_B = 927,400968(20) \cdot 10^{-26} \text{ Дж/Тл}$
Електрична стала	$\epsilon_0 = 8.85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнітна стала	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}$
Стала Планка	$h = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$

Лабораторні роботи виконуються на обладнанні, виготовленому фірмою

<http://www.uchtech.com.ua>, м.Рівне.

ЕЛЕКТРИКА ТА МАГНЕТИЗМ

Лабораторна робота № 1

Вивчення електростатичного поля

Мета роботи: дослідити електростатичне поле, яке створюється зарядженими тілами, і виміряти деякі характеристики електростатичного поля.

Приладдя: лабораторна установка ФПЕ-31.

Теоретична частина

Електричне поле – матеріальне середовище, яке існує навколо заряджених тіл та проявляє себе силовою дією на заряджені тіла. Основними характеристиками електростатичного поля є напруженість \vec{E} та потенціал φ .

Напруженість електричного поля \vec{E} – векторна фізична величина, силова характеристика електричного поля, чисельно дорівнює силі, яка діє на одиничний позитивний заряд, який поміщений в дану точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (1)$$

Якщо величина та напрямок вектора напруженості поля в кожній точці поля однакові, то таке поле називається однорідним.

Потенціал φ – скалярна фізична величина, енергетична характеристика електростатичного поля, чисельно дорівнює потенціальній енергії, якою б володів в даній точці поля одиничний позитивний заряд:

$$\varphi = \frac{W}{q}. \quad (2)$$

Між напруженістю \vec{E} та потенціалом φ існує наступний взаємозв'язок:

$$\vec{E} = -grad\varphi. \quad (3)$$

Вектор напруженості спрямований в сторону зменшення потенціалу. У випадку однорідного поля:

$$E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta r},$$

(4)

де $\Delta\varphi$ – різниця потенціалів $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$,

Δr – відстань між поверхнями (точками r_1 і r_2 , $\Delta r = r_1 - r_2$) з потенціалами φ_1 и φ_2 .

Графічно електростатичні поля зображують за допомогою силових ліній та поверхней однакового потенціалу (еквіпотенціальних поверхней). Силові лінії перпендикулярні еквіпотенціальним поверхням.

Експериментально простіше виміряти потенціал поля, ніж його напруженість. При вивченні розподілу потенціалу електростатичного поля застосовується метод зондів. Сутність методу зондів полягає в тому, що в досліджувану точку поля вводиться додатковий електрод-зонд. Він зроблений так, щоб мінімально порушувати своєю присутністю досліджуване поле.

Пристрій та принцип роботи

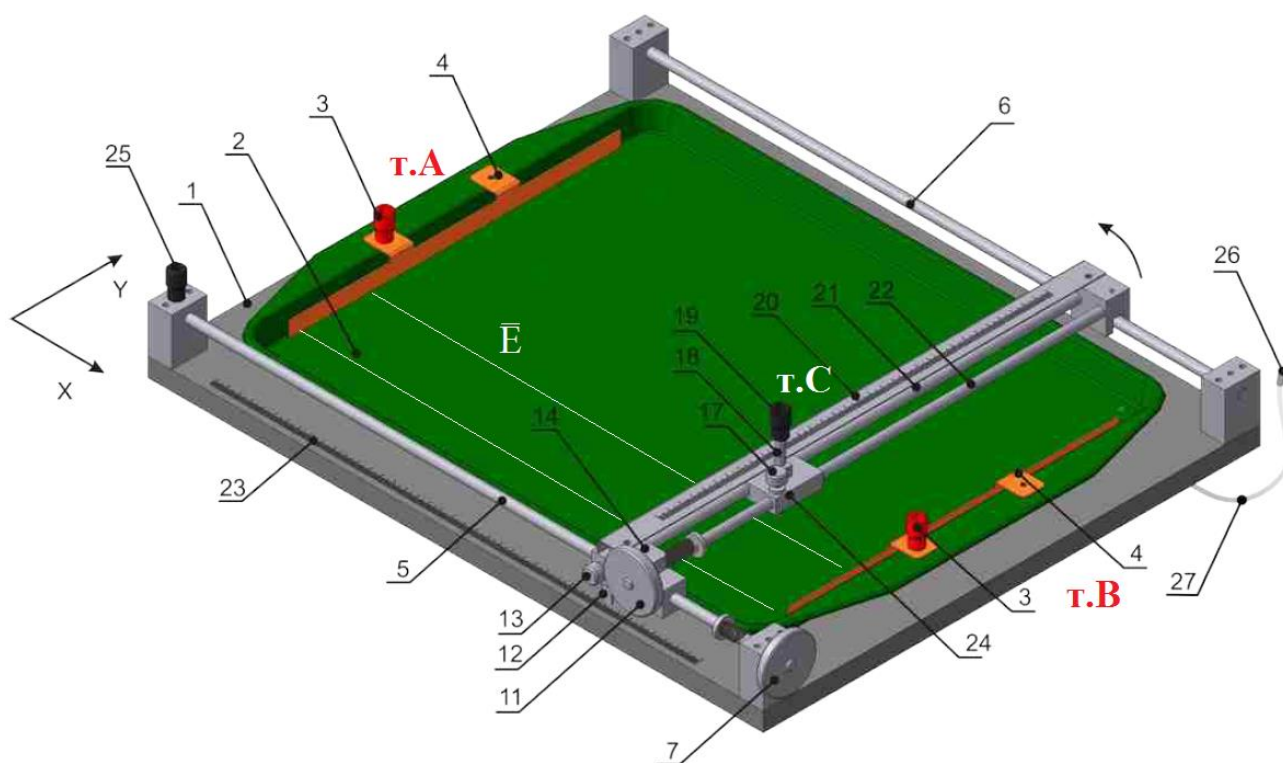


Рис.1 Зовнішній вигляд електростатичної ванни.

Установка для вивчення напруженості електричного поля складається з двох пристроїв №1 та №2 (Рис.2).

Пристрій №1 (рис.1) призначений для створення однорідного постійного електричного поля (електростатичне поле). Він складається з піддона 1, на якому встановлена ванна 2 (у ванні міститься вода). Вода служить середовищем, в якому створюється електростатичне поле за допомогою двох

металевих електродів 4, розміщених на протилежних сторонах ванни. До цих електродів прикладається постійна різниця потенціалів:

$$\Delta\varphi_{AB} = \varphi_A - \varphi_B,$$

де φ_A і φ_B – потенціали електродів.

Для вимірювання потенціалу електростатичного поля та його напруженості в різних точках поля (ванни) застосовується механізм позиціонування. Цей механізм складається з двох нерухомих напрямляючих 5,6 та однієї рухомої конструкції 21,22. На рухомій частині (по вісі Y) закріплений тонкий зонд 18 з електричною клемою 19.

Вимірювання *різниці потенціалів* в довільній точці ванни (наприклад, в т. С) здійснюється зондом за допомогою *компенсаційного методу*. Цей метод дозволяє звести до мінімуму викривлення електричного поля, які створює зонд.

Суть компенсаційного методу: компенсувати струм, який протікає між зондом (т. С) з потенціалом φ_C і точкою В з потенціалом φ_B . Для цього до зонду прикладають так звану опорну напругу ($U_{on} = \varphi_B - \varphi_C = \Delta\varphi_{BC}$) з протилежною полярністю $\varphi_B > \varphi_C$.

Для створення потенціалів φ_A , φ_B , φ_C застосовується пристрій №2 установки, який представляє собою джерело напруги та індикації (рис. 2).

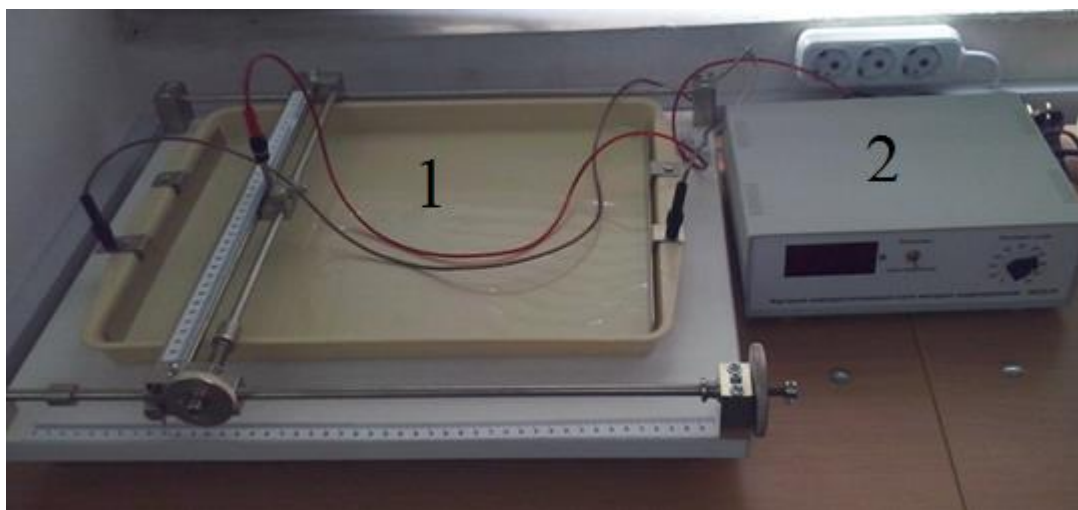


Рис.2 Зовнішній вигляд установки.

В положенні тумблера «*електроди*» прилад показує різницю потенціалів $\Delta\varphi_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$ між електродами (приблизно вона дорівнює 8В). Перемикач «*потенціал зонда*» дозволяє виставляти різницю потенціалів $\Delta\varphi_{BC} = \varphi_B - \varphi_C$

(потенціал зонда φ_C) яка чисельно дорівнює від 0 до 1 $\Delta\varphi_{AB}$ (0, 0.8, 1.6, 3.2, 4, 4.8, 5.6, 6.4, 7.2, 8 Вольт)

Положення зонда 18 змінюється «грубо» шляхом переміщення руками повзунків 14 та 24 по рухомим напрямляючим 5 та 22. Для більш точного позиціонування зонду 18 необхідно за допомогою гвинтів 13 та 17 закріпити повзунки 14 та 24, та за допомогою штурвалів 7 та 11 перемістити їх в потрібному напрямку за допомогою рухомих напрямляючих.

Переміщуючи зонд за допомогою системи позиціонування, досягають мінімального значення різниці потенціалів між зондом та опорним потенціалом на нуль-індикаторі вимірюваного пристрою № 2.

Координати точки відраховують за допомогою шкал 23 та 20 та вказівників.

Джерело живлення підключається до мережі 220 В, 50 Гц.

На рис. 1 позначено: 1 – піддон, 2 – ванна, 3 – клеми, 4 – електроди, 5,6 – напрямляючі по вісі X, 7 – штурвал для точного переміщення по Oх, 14 – повзунок з пристроєм переміщення по Oу, 13 – фіксуючий гвинт, 21, 22 – пристрій позиціонування по Oу, штурвал 11 для точного позиціонування по Oу, 24 – повзунок з зондом 18, 19 – клема, 12- вказівники відліку, 23, 20 – шкали відліку, 26, 27 – зливний шланг.

Порядок виконання роботи

1. Поле плоских електродів

1. Заповніть ванну водою.
2. На листі міліметрового паперу формату А3 накресліть координатні вісі X та Y (якщо на листі А4, то ліпше в масштабі 1:2), та нанесіть контури електродів.
3. Увімкніть (з дозволу викладача) вимірювальний пристрій.
4. Зафіксуйте напругу на електродах (переведіть тумблер режиму вимірювання в положення «електроди»).
5. Встановіть перемикач опорного потенціалу на пристрої №2 в положення «0.1», це означає, що опорний потенціал дорівнює $0.1 \cdot 8 = 0.8\text{В}$, запишіть це значення в таблицю.
6. Переведіть тумблер режима вимірювання в положення «нуль-індикатор».
7. Переміщуйте зонд спочатку по Oх, за допомогою напрямляючих 5, 6, та штурвалу 7 до встановлення мінімального значення різниці потенціалів $\Delta\varphi_{BC}$ на індикаторі. Виміряйте координату $X_i = \Delta r_i$ положення зонда за допомогою шкали 23 та нанесіть її на координатну площину, або запишіть в таблицю.

8. Після цього, переміщуючи зонд паралельно електродам (по Oy), визначте координати Y_i 5-ти точок з таким же значенням потенціалу $\approx 0.8V$, запишіть в таблицю.
9. Виконайте вимірювання згідно пп. 5–8 для інших 4-х опорних потенціалів (зазвичай, викладач називає 5 опорних потенціалів).
10. По завершенні роботи вимкніть вимірювальний пристрій за допомогою вимикача «Мережа».
11. По отриманим точкам Y_i (де в режимі «нуль-індикатор» прилад показав $\Delta\phi_{BC} \approx 0$ для кожного X_i) проведіть лінії рівного потенціалу (еквіпотенціальні поверхні). Накресліть картину силових ліній.
12. Розрахуйте п'ять значень напруженості E за формулою (4) для різних Δr_i та $\Delta\phi_{BC}$ (0,8; 1,6; 3,2; 4,8; 6,4 В). Знайдіть середнє значення напруженості поля та похибку.
13. Запишіть кінцевий результат для напруженості однорідного поля у вигляді:

$$E = \bar{E} \mp \sigma_E.$$

14. Знайдіть відносну похибку вимірювань.

1.1 Викривлення поля плоских електродів

1. Покладіть в середину ванни, не виймаючи плоских електродів, металевий циліндр.
2. Виконати вимірювання згідно пп. 5–11.
3. Отримати картину еквіпотенціальних поверхней та силових ліній, враховуючи їх ортогональність.

1.2 Поле циліндричних електродів

1. Помістіть до ванни циліндричні електроди (за вимогою викладача), переключіть на їх клеми сигнальні проводи від плоских електродів.
2. Виконайте вимірювання згідно пп. 2–11.
3. Отримайте картину еквіпотенціальних поверхней та силових ліній, враховуючи їх ортогональність.

Контрольні питання

Підготовка до роботи (бажано відповіді представити в письмовому вигляді)

1. Яка мета роботи?
2. Поле електродів якої форми необхідно дослідити в даній роботі?

3. Намалуйте приблизну картину розподілу силових ліній та поверхней однакового потенціалу (еквіпотенціальних поверхней) електростатичного поля між двома плоскими електродами.

Захист роботи (відповіді представити у письмовому вигляді).

1. Дайте визначення напруженості електростатичного поля, запишіть формулу і одиниці вимірювання.
2. Дайте визначення потенціалу, запишіть формулу для потенціалу електричного поля, вкажіть одиниці вимірювання.
3. Яке поле називається однорідним?
4. Від чого залежить робота по переміщенню заряду в такому полі?
5. Яке взаємне розміщення силових ліній та еквіпотенціальних поверхней?
6. Як за розподілом потенціала визначити напрямок силових ліній?

Чому не має електростатичного поля плоского конденсатора в точках А та В? (Рис.3.)

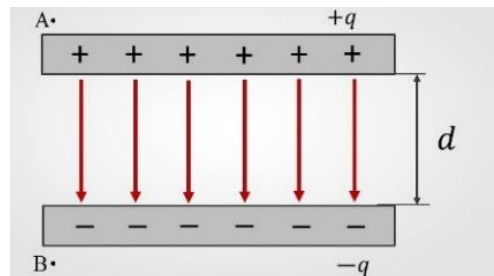


Рис.3. Силові лінії електричного поля конденсатора

7. Порівняйте роботи W , які треба виконати, щоб перемістити одиничний електричний заряд в електричному полі конденсатора з точки А в точку В різними шляхами (1, 2, 3) і з точки А в точку С: $W_{AB}(1), W_{AB}(2), W_{AB}(3), W_{AC}(4)$, (Рис.4.)

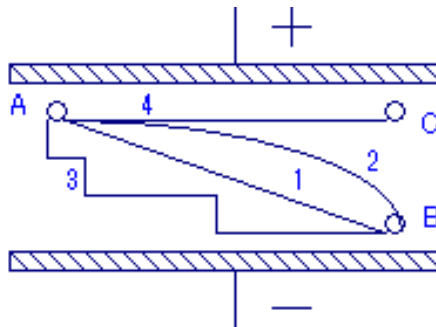


Рис.4. Траєкторії переміщення заряду

Рекомендована література

1. Кучерук І.М. Горбачук І.Т. Луцик П.П. Загальний курс фізики. Навчальний посібник, Т. 2. Електрика і магнетизм. К.: Техніка, 2001. 425с.
2. Трофимова Т.И. Курс общей физики. М.: Наука, 2006. §§ 79,84,85.
3. Барановський В.М. Бережний П.В. Горбачук І.Т та ін. Загальна фізика. Лабораторний практикум. Навчальний посібник. За загальною редакцією Горбачука І.Т. К.: Вища школа, 1992. 509 с.

4. Ахиезер А.И. Ахиезер И.А. Электромагнетизм и электромагнитные волны: Учеб. Пособие. М.: Радио, 1985. 504с.
5. Гершензон Е.М. Курс общей физики. Электричество и магнетизм: Учеб. Пособие. М.: Наука, 1980. 223 с.
6. Чебаненко А.П. Курс загальної фізики. Підручник, Т. 3. Електрика і магнетизм. Одеса: Астропринт, 2011. 224 с.
7. Русаков В.Ф. Электричество и магнетизм: учебное пособие. Винница: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 236 с.

Лабораторна робота №2

Вимірювання індукції магнітного поля Землі.

Мета: вимірювання горизонтальної та вертикальної складової індукції магнітного поля Землі.

Приладдя: лабораторна установка ФПЕ-33.

Теоретична частина

Планета Земля – це природний магніт. Постійна складова магнітного поля Землі (~99%) обумовлена зарядами в розплавленому металевому ядрі планети і обертання її навколо вісі обертання Землі. Змінна складова (~1 %)

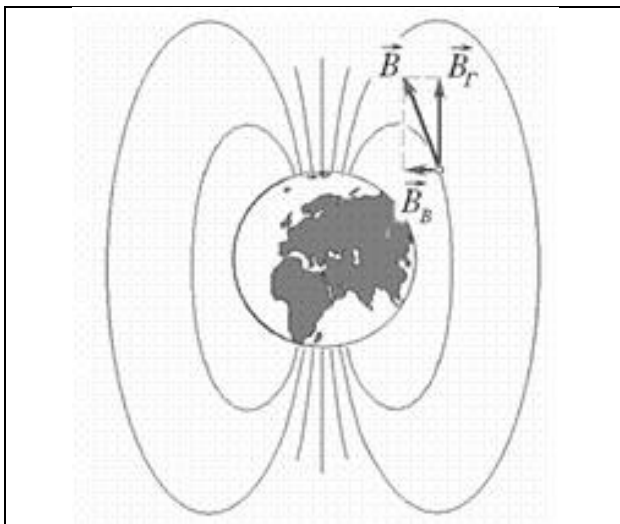


Рис.1. Силові лінії магнітного поля Землі

магнітного поля обумовлена впливом джерел іоносфери та електричних струмів в земній корі. Магнітне поле Землі утворює так звану магнітосферу (рис. 1). Це область навколоземного простору, фізичні властивості якого визначаються магнітним полем Землі та його взаємодією з потоками заряджених частинок космічного походження. Біля поверхні Землі індукція поля \vec{B} зменшується від *геомагнітних полюсів* до екватора, відповідно, від $7,0 \cdot 10^{-5}$ Тл до $1,6 \cdot 10^{-5}$ Тл.

Магнітне поле Землі – це поле **магнітного диполя**, утворене електричним струмом $I \approx 3 \cdot 10^9$ А, який тече на відстані $r \approx 5000$ км від центру Землі по колу вздовж екватору.

Характеризують магнітне поле Землі трьома параметрами: горизонтальною складовою індукції \vec{B}_r , вертикальною складовою \vec{B}_v , магнітним нахиланням θ та магнітним схиланням α – кутом між географічним та магнітним меридіанами в даній точці земної поверхні. Кут магнітного нахилання θ – це кут між горизонтальною площиною і нахилом магнітної стрілки, підвішеної на нитці.

Магнітні полюси Землі не співпадають з географічними полюсами та з часом змінюють своє положення. *Вектор індукції* магнітного поля Землі \vec{B} на

екваторі напрямлений горизонтально, біля магнітних полюсів Землі – вертикально, а в інших місцях – під деяким кутом θ до горизонтальної площини. Напрямок вектора магнітної індукції можна визначити за допомогою магнітної стрілки NS , підвішеної на тонкій нитці (рис. 2), яка встановлюється за напрямком вектора \vec{B} .

Вертикальна площина, в якій встановлюється магнітна стрілка, називається площиною *магнітного меридіана*. Магнітні полюси не співпадають з географічними, тому стрілка буде відхилена від географічного меридіана на деякий кут α , який називають *магнітним схиленням*. Магнітна стрілка, яка може обертатися навколо вертикальної вісі OO' , встановлюється під дією горизонтальної складової індукції магнітного поля B_H (рис. 3). Величини B_H , α , θ називають елементами земного магнетизму.

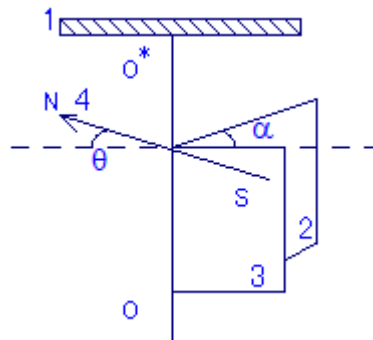


Рис. 2. Кути нахилання θ та схилення α земного магнетизму.

На рис. 2. 1 – підвіс, 2 – площина географічного меридіана, 3 – площина магнітного меридіана, 4 – магнітна стрілка, підвішена на нитці O^*O , α – кут магнітного схилання, θ – кут магнітного нахилання

В роботі використовується явище електромагнітної індукції, відкрите М. Фарадеєм. За законом Фарадея при перетині магнітним потоком Φ площі контуру, який утворений провідником, на його кінцях виникає електрорушійна сила ε :

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt},$$

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\beta,$$

де S – площа контуру, \vec{B} – індукція магнітного поля, β – кут між вектором індукції магнітного поля \vec{B} та нормаллю \vec{n} до площини контуру.

В якості контуру в роботі застосовується котушка з діаметром $d = 0.3$ м, яка складається з $N = 400$ витків мідної проволочки, опір котушки $R = 22$ Ом. Зміна потоку Φ здійснюється за рахунок зміни кута β шляхом обертання котушки (контур).

В даній роботі застосовується пристрій (рис. 3а), який складається з індуктора (котушка, що обертається) та вимірювального приладу. Вимірювальний прилад – інтегратор, який рахує середнє значення інтеграла електрорушійної сили індукції по часу (ЕРС виникає в котушці завдяки зміні магнітного потоку за законом Фарадея):

$$\langle \varepsilon \cdot \Delta t \rangle = \langle \Delta \Phi \rangle.$$

В залежності від орієнтації вісі обертання котушки вимірюється вертикальна або горизонтальна складова індукції \vec{B} магнітного поля Землі. Формула, за якою розраховується індукція магнітного поля Землі:

$$B = \frac{\langle \varepsilon \cdot \Delta t \rangle}{S}, \quad \text{де } S - \text{площа котушки.} \quad (1)$$



Рис.3а, б, Зовнішній вигляд лабораторної установки

На рис. 3б показані деталі пристрою: 1 – основа, 2 – стійка з кронштейном, 3 – рамка, 4 – котушка, 5 – клемма, 6 – ручка, 7 – гайка, 8 – регулювальні ніжки.

Порядок роботи:

1.Визначення вертикальної B_v складової індукції магнітного поля Землі.

1.1.Встановіть поворотом від руки рамку 3 в горизонтальне положення, відпустивши гайку 7.

1.2.Увімкніть вимірювальний прилад (з дозволу викладача) за допомогою перемикача “Мережа” – повинен засвітитися індикатор «мкВ·с». При

увімкненні, а також при натисненні кнопки “СБРОС”, необхідно щоб котушка 4 залишалась нерухомою, так як в цей момент відбувається автокореляція нуля.

1.3. *Рівномірно обертаючи* ручку близько 10 разів, дочекатися стабільних показів інтегратора, записати це значення в таблицю, виконати вимірювання $\langle \varepsilon \cdot \Delta t \rangle$ 5 разів, вирахувати B_v (формула 1), знайти середнє значення результатів вимірювання та їх похибку.

1.4. Натискнути кнопку “СБРОС” та утримувати її поки не погаснуть індикатори, а потім відпустити.

2. Визначення горизонтальної B_r складової індукції магнітного поля Землі

2.1. Встановити рамку у вертикальне положення.

2.2. Обертаючи котушку (10 разів), дочекатися стабільних показів інтегратора, записати це значення в таблицю, вимірювання провести 5 разів, вирахувати B_r (формула 1), знайти середнє значення, та похибку.

2.3. Після закінчення роботи вимкнути вимірювальний прилад за допомогою перемикача “МЕРЕЖА”.

Зміст звіту

1. Тема, мета, хід роботи, робочі формули для розрахунку індукції \vec{B} магнітного поля Землі.
2. Таблиця з вихідними даними котушки та вимірюваними величинами в системі СІ.
3. Розрахунок чисельних значень вертикальної, горизонтальної складових та повної індукції \vec{B} магнітного поля Землі з врахуванням похибки вимірювань.
4. Порівняння експериментального результату з відомими табличними значеннями, висновки.

Контрольні питання

1. Чим обумовлена природа земного магнетизму?
2. Що розраховується за законом Біо-Савара-Лапласа?
3. Як розраховується індукція магнітного поля кругового струму?
4. Дайте визначення елементів земного магнетизму.
5. Де застосовують значення параметрів магнітного поля Землі?
6. Розрахуйте магнітне поле витка зі струмом.
7. Основні характеристики магнітного поля, та одиниці їх вимірювання.

Рекомендована література

1. Кучерук І.М. Горбачук І.Т. Луцик П.П. Загальний курс фізики. Навчальний посібник, Т. 2. Електрика і магнетизм. К.: Техніка, 2001. 425 с.

2. Барановський В.М. Бережний П.В. Горбачук І.Т та ін. Загальна фізика. Лабораторний практикум. Навчальний посібник. За загальною редакцією Горбачука І.Т. К.: Вища школа, 1992. 509 с.
3. А.А.Детлаф Б.М.Яворский Курс физики. М.: Высшая школа, 2002. 718 с.
4. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М.: Мир и Образование, 2005. 463 с.
5. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. М.: Высш. школа, 1983. 279 с.
6. Трофимова Т. И. Курс общей физики. М.: Наука, 2006. §§ 109,110,119, 121,123.
7. Чебаненко А.П. Курс загальної фізики. Підручник, Т. 3. Електрика і магнетизм. Одесса: Астропринт, 2011. 224 с.
8. Русаков В.Ф. Электричество и магнетизм: учебное пособие. Винница: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 236 с.

Лабораторна робота №3

Дослідження залежності електричного опору металів та напівпровідників від температури

Мета роботи: дослідити залежність електричного опору металу та напівпровідника від температури, визначити температурний коефіцієнт опору метала.

Приладдя: лабораторна установка ФПК-07.

Теоретична частина

Електричний опір R – скалярна фізична величина, яка характеризує властивість провідника протидіяти проходженню через нього електричного струму, дорівнює відношенню напруги U на кінцях провідника до сили струму I , який тече по ньому:

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

Електричний опір провідників, наявність електричного струму в яких призводить до виділення тепла, називається активним. Опір однорідного провідника залежить від матеріалу провідника та його геометричних розмірів, він називається омічним опором та вираховується за формулою:

$$R = \frac{\rho \ell}{S}, \quad (1)$$

де ℓ – довжина провідника, S – площа поперечного перерізу провідника, ρ – питомий електричний опір, який характеризує електричні властивості матеріалу провідника.

Електричний опір вимірюють омметрами або вимірювальними мостами. Одиниця електричного опору в СІ – Ом.

Електричний опір металів обумовлений розсіюванням (розсіювання - це зміна напрямку руху електрона при його зіткненні з іоном) електронів провідності на іонах кристалічної ґратки та структурних неоднорідностях (домішки, дефекти і т.д.). З ростом температури амплітуди рухів атомів збільшується, ймовірність зіткнення електронів з атомами зростає, (ймовірність зміни напрямку руху електронів збільшується), тому опір металів збільшується. Необхідно мати на увазі, що кількість носіїв струму в металі з ростом температури метала практично не змінюється.

З великою мірою точності можна рахувати, що залежність опору металів

від температури є лінійною:

$$R = R_0(1 + \alpha t), \quad (2)$$

де R – опір провідника при температурі t °С, R_0 – опір при 0°С,
 α – температурний коефіцієнт опору.

Температурний коефіцієнт опору – величина, яка чисельно дорівнює відносній зміні опору провідника при зміні його температури на 1 °С:

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_0} \cdot \frac{1}{\Delta t}$$

Для чистих металів температурний коефіцієнт представляє величину порядку $\alpha \approx 0,0041/^\circ\text{С}$. Для деяких електротехнічних сплавів (манганін, константан) α настільки мале, що ним можна нехтувати, і в достатньо широкому інтервалі температур рахувати опір незалежним від температури.

В роботі необхідно виміряти температурний коефіцієнт α двома

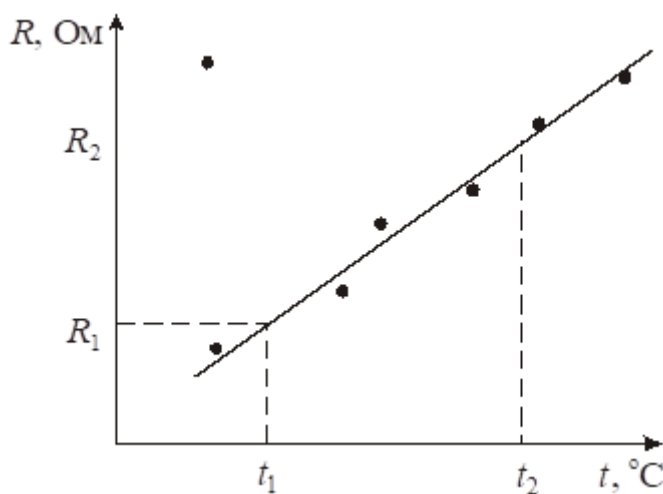


Рис.1. Графік залежності опору провідника від температури

способами: за формулою (2) та методом найменших квадратів. В першому випадку необхідно за результатами вимірювань R_i та t_i побудувати графік $R_i = f(t_i)$, який представляє пряму лінію $R_i = R_0 + R_0 \alpha t_i$ (див. рис 1). На вісі температур треба взяти два значення температур t_1 і t_2 та відповідні їм опори R_1 та R_2 (як показано на рис.1) і підставити їх в рівняння (2),

отримаємо систему рівнянь:

$$R_1 = R_0(1 + \alpha t_1) \quad (3)$$

$$R_2 = R_0(1 + \alpha t_2), \quad (4)$$

де R_1 – опір провідника при температурі t_1 °С, R_2 – опір того ж провідника при температурі t_2 °С.

Розв'язуючи систему (3), (4) отримаємо значення коефіцієнта α

$$\alpha = \frac{(R_2 - R_1)}{R_1 t_2 - R_2 t_1} .$$

Зауваження: з метою зменшення похибки α значення t_1 і R_1 , t_2 і R_2 необхідно брати значення X (t_1, t_2) і Y (R_1, R_2) у вузлах сітки графіка (тобто на перетину вісів X і Y).

Щоб знайти R_0 , необхідно пряму графіка $R_i = f(t_i)$ екстраполювати до перетину з віссю Y , в точці перетину отримаємо значення опору R_0 . Оцінити похибки α та R_0 .

В другому випадку (метод найменших квадратів) спочатку розраховують кутовий коефіцієнт $k = \alpha R_0$ за формулою:

$$\alpha R_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})(R_i - \bar{R})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}, \quad (5)$$

потім розраховують значення R_0 за формулою $R_0 = \bar{R} - (\alpha R_0) \bar{t}$, знаючи R_0 і αR_0 , знаходимо α . Порівняти отримані двома способами результати розрахунків α і R_0 та зробити висновок.

Напівпровідники – широкий клас речовин, які характеризуються такими значеннями питомого опору, що лежать в проміжку між питомим опором металів ($\rho \sim 10^{-8} \div 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) та діелектриків ($\rho \sim 10^{-12} \div 10^{-14} \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Характерна особливість напівпровідників (суттєва різниця з більшістю металів) – зменшення їх опору з ростом температури за рахунок збільшення кількості носіїв струму (розсіювання носіїв струму на атомах в напівпровідниках теж має місце, але воно дає на багато менший внесок в опір напівпровідників, ніж в металах).

Опис експериментальної установки

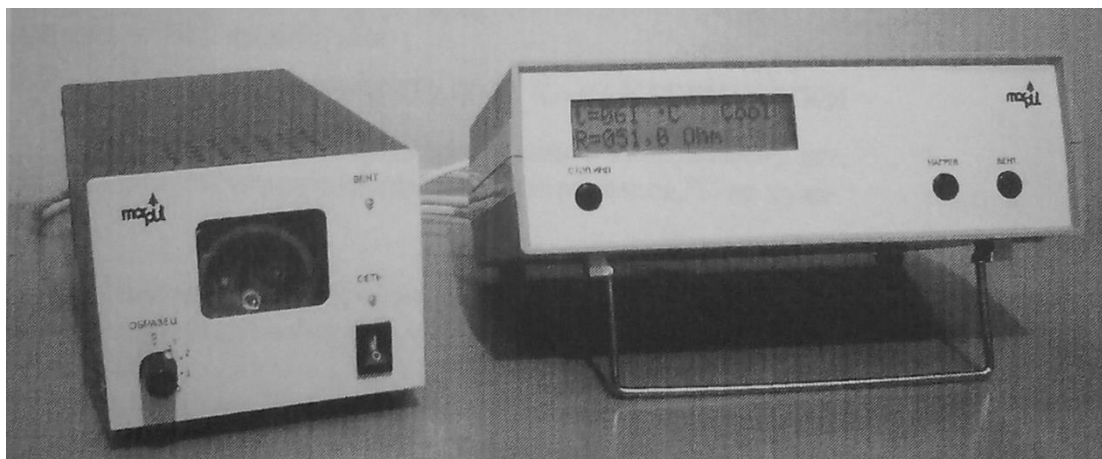


Рис. 2. Загальний вигляд установки

Установка складається з електропечі, датчика температури та вимірювального пристрою. Загальний вигляд установки показано на рис. 2.

На передній панелі електропечі знаходиться віконце, яке дозволяє спостерігати зразки, встановлені в електропечі. На цій же панелі розміщені наступні органи управління та індикації.

- Вимикач «Мережа» (призначено для увімкнення та вимикання живлення електропечі).
- Перемикач «ЗРАЗОК» (призначено для почергового підключення зразків до вимірювального входу вимірювача температури).

Положенням перемикача «ЗРАЗОК» відповідає:

- “1” – метал;
- “2” – сплав з низьким температурним коефіцієнтом опору, (даний зразок введено в установку для демонстрації властивостей сплавів з малим температурним коефіцієнтом опору);
- “3” – напівпровідник;
- “0” – вхід вимірювача температури закорочено.

На передній панелі вимірювального пристрою розміщені наступні органи управління та індикації.

Кнопки «НАГРІВ» та «ВЕНТ.» призначені для увімкнення та вимкнення (шляхом повторного натискання) електропечі та вентилятора відповідно.

Кнопка «СТОП ІНД.» призначена для увімкнення (та вимкнення) режиму зупинки індикації значень температури та опору (при увімкненні цього режиму, покази на вимірювальних індикаторах фіксуються в тому стані, в якому вони знаходились при натисненні кнопки «СТОП ІНД.», при цьому режим роботи установки не змінюється; при повторному натисненні відбувається вимкнення даного режиму і на індикаторах знову відображаються поточні значення вимірювальних величин).

Індикатор показує вимірювальні величини (у верхній частині – температуру t в $^{\circ}\text{C}$, а в нижній – опір R в Ом), а також режим роботи – «WARM» (нагрів), «COOL» (охолодження) та «FIXED» (зупинка індикації).

На задній панелі вимірювального пристрою розміщено вимикач «МЕРЕЖА».

Порядок виконання роботи

1. Увімкніть (з дозволу викладача) вимірювальний пристрій та піч за допомогою вимикачів «МЕРЕЖА». При цьому на індикаторі R вимірювального пристрою буде показано значення опору обраного зразка або нулі при замкнутому вході (допускається індикація до значення другого молодшого розряду), а на індикаторі t – *температура оточуючого зразок середовища*.
2. На печі повинен світитися індикатор «МЕРЕЖА» і не світитися індикатор «ВЕНТ.». Дати приборам прогрітися протягом 3–5 хв.
3. Встановити перемикач «ЗРАЗОК» в положення 1, тобто підключити металевий зразок до нагрівача.
4. Увімкнути нагрівання зразка, натискнувши кнопку «НАГРІВ» (при цьому на індикаторі повинен відображатися режим роботи «WARM» (нагрів) та спостерігати по індикатору температури нагрівання зразка).
5. Зняти покази індикаторів температури та опору з кроком 5°C до температури 100°C (межа 120°C) і занести в таблицю 1.

По досягненню 120°C автоматично увімкнеться вентиляція та вимкнеться нагрівання печі.

6. По досягненні необхідної температури натиснути «ВЕНТ.» для увімкнення примусового охолодження.
7. Перемкнути перемикач «ЗРАЗОК» в положення 3 та зняти покази температури та опору напівпровідникового зразку при охолодженні з кроком 5°C від максимальної температури до $\sim 30^{\circ}\text{C}$, заносючи дані в таблицю 2.
8. По завершенні роботи вимикачами «МЕРЕЖА» вимкнути установку.

Обробка результатів вимірювань

1. Побудувати графік залежності $R_i = f(t_i)$ для металевого зразка (на осі температур значення температури повинно змінюватися від 0°C до 100°C).
2. Розрахувати температурний коефіцієнт опору α за формулою (5). Значення опорів R_1 та R_2 і відповідні їм температури t_1 та t_2 визначити з графіку (прямої) $R_i = f(t_i)$, а не з таблиці. Знайти R_0 шляхом екстраполяції до перетину прямої з віссю R .

3. Розрахувати α та R_0 методом найменших квадратів, порівняти результати розрахунків α та R_0 , отриманих різними методами.
4. Побудувати графік залежності провідності $\sigma = 1/R$ досліджуваного напівпровідника в системах координат: $\sigma(T)$ і $\ln \sigma(\frac{1}{T})$, де T – температура в градусах Кельвіна.

Контрольні питання та завдання

Підготовка до роботи

1. Яка мета роботи?
2. Які величини вимірюються безпосередньо?
3. Які графіки необхідно побудувати по результатам експерименту?
4. Запишіть формулу залежності опору провідника від температури. Поясніть сенс позначень.

Захист роботи

1. Що називається електричним опором?
2. Від чого залежить опір провідника? Запишіть формулу для розрахунку α .
3. Як залежить електричний опір металів від температури? Запишіть формулу.
4. Дайте визначення температурного коефіцієнту опору α .
5. Порівняйте знайдене значення температурного коефіцієнту опору α з табличним значенням. Зробіть висновки.
6. Які речовини відносяться до напівпровідників?
7. Як залежить електричний опір напівпровідників від температури?
8. Порівняйте залежність опору від температури напівпровідників та металів і поясніть причину різної залежності їхнього опору від температури.
9. Дайте визначення активного, омичного, реактивного та повного опору.

Рекомендована література

1. Кучерук І.М. Горбачук І.Т. Луцик П.П. Загальний курс фізики. Навчальний посібник, Т. 2. Електрика і магнетизм. К.: Техніка, 2001. 425 с.
2. Ахиезер А.И. Электромагнетизм и электромагнитные волны: Учеб. пособие. М.: Радио, 1985. 504 с.
3. Барановський В.М. Бережний П.В. Горбачук І.Т та ін. Загальна фізика. Лабораторний практикум. Навчальний посібник. За загальною редакцією Горбачука І.Т. К.: Вища школа, 1992. 509 с.
4. Гершензон Е.М. Курс общей физики. Электричество и магнетизм: Учеб. пособие. М.: Наука, 1980. 223 с.
5. Чебаненко А.П. Курс загальної фізики. Підручник, Т. 3. Електрика і магнетизм. Одеса: Астропринт, 2011. 224 с.

6. Русаков В.Ф. Электричество и магнетизм: учебное пособие. Винница: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 236 с.

Лабораторна робота № 4

Вивчення загасаючих електричних коливань

Мета: дослідження загасаючих електричних коливань, вимір характеристик коливального контуру: періоду коливань T , логарифмічного декременту загасання λ , критичного опору контуру $R_{кр}$.

Устаткування: генератор сигналів спеціальної форми; мініблоки «Конденсатор», «Реостат», котушка індуктивності, цифровий осцилограф.

Теоретична частина

Коливальний контур - це електричний ланцюг (рис.1), що містить індуктивність L , ємність C і опір R .

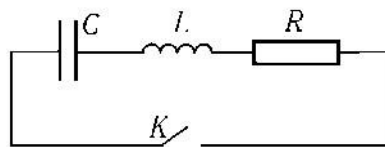


Рис. 1. Коливальний контур:

C - конденсатор, L - котушка індуктивності, R - активний опір, K - ключ.

Загальний вигляд установки показано на рис.6.

Якщо конденсатор зарядити зарядом q , то між пластинами конденсатора виникає різниця потенціалів $U = \frac{q}{C}$ і електричне поле з енергією

$$W_E = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}.$$

При замиканні ключа K контур стане замкнутим електричним колом і в ньому під дією електричного поля виникне електричний струм

$$I(t) = C \frac{dU}{dt},$$

і конденсатор почне розряджатися. Цей струм створює магнітне поле з енергією $W_B = L \frac{I(t)^2}{2}$, вектор індукції якого перетинає площину котушки, утворюючи потік $\Phi(t) = \vec{B}(t) \cdot \vec{S}$. За законом Біо-Лапласа-Савара індукція B

пропорційна струму $\Phi = L \cdot I$. Тоді за законом Фарадея на кінцях котушки виникає електрорушійна сила

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{SdB}{dt} = -L \frac{dI}{dt},$$

яка називається електрорушійною силою самоіндукції. Ця ЕРС направлена проти напруги на конденсаторі (на це вказує знак мінус). При замиканні ключа К струм в контурі спочатку зростає від 0 до I_{\max} ($\frac{dI}{dt} > 0$), а потім починає зменшуватися (конденсатор розряджається ($\frac{dI}{dt} < 0$)), а ЕРС самоіндукції (оскільки знак мінус) спочатку перешкоджає зростанню струму, але перед закінчення розрядки конденсатора (коли струм зменшується) підтримує струм в первісному напрямку ($\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}$).

Таким чином енергія електричного поля конденсатора переходить в енергію магнітного поля котушки, яка потім переходить знову в енергію електричного поля (завдяки явищу самоіндукції), і процес буде повторюватися. Тобто, виникають коливання напруги, заряду і струму. При протіканні струму в контурі частина енергії електричного струму

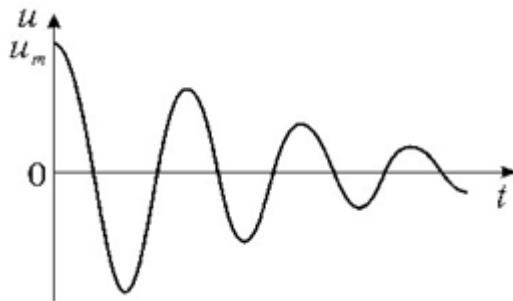


Рис.2.

перетворюється в теплову енергію $Q = RI^2$, яка виділяється в опорах R котушки і з'єднувальних провідників. Тому коливання загасають, їх амплітуда з часом зменшується. На рис. 2 показаний графік зміни напруги $U = q/C$ на обкладках конденсатора з плином часу.

Закон зміни напруги на конденсаторі має вигляд

$$U(t) = U_m \cdot e^{-\delta t} \cos(\omega t + \alpha), \quad (1)$$

де $U(t)$ - миттєве значення напруги; U_m - максимальна амплітуда напруги; ω - циклічна частота загасаючих коливань, t - час від початку розрядки, α - початкова фаза; δ - коефіцієнт загасання, який залежить від опору і індуктивності контуру (котушки):

$$\delta = R/2L. \quad (2)$$

Циклічна частота ω загасаючих коливань визначається параметрами ланцюга - її індуктивністю L , ємністю C і активним опором R :

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \quad (3)$$

де ω_0 - власна частота контуру:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4)$$

Період загасаючих коливань

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2}} \quad (5)$$

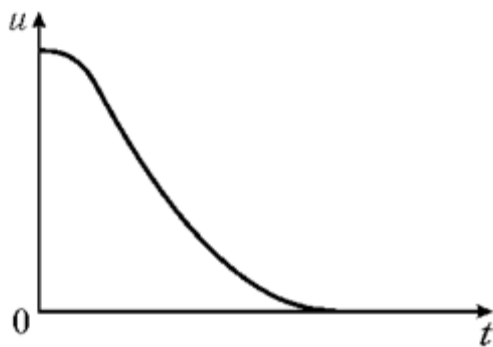


Рис. 3. Графік аперіодичного розряду

більший, ніж період незагасаючих $T_0 = 2\pi / \omega_0$ і, як випливає з формул (2) – (5), відрізняється від нього тим сильніше, чим більше величина коефіцієнта затухання δ . При $\delta \ll \omega_0$ період загасаючих коливань $T = \frac{2\pi}{\sqrt{LC}}$ майже співпадає з періодом незагасаючих коливань T_0 . При збільшенні коефіцієнта загасання δ період коливань T зростає, прагнучи до нескінченності

при $\delta = \omega_0$. Це означає, що коливання в ланцюзі змінюються аперіодичним розрядом конденсатора (рис.3). Опір контуру, при якому виникає такий розряд, називають критичним. Величина такого опору, згідно з умовою $\delta = \omega_0$ і з урахуванням формул (2), (4), визначається виразом

$$R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (6)$$

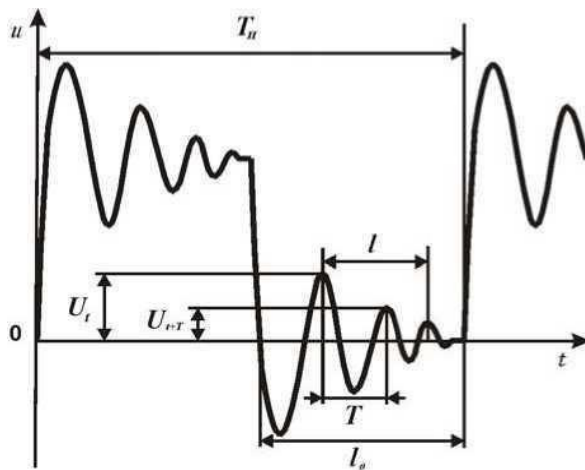
Загасання коливань характеризують величиною логарифмічного декременту загасання

$$\lambda = \ln (U_t / U_{t+T}), \quad (7)$$

де U_t і U_{t+T} - амплітуди напруг в моменти часу, що відрізняються на період. Відповідно до закону коливань (1) маємо $\lambda = \delta T$ (8)

Метод вимірювань

Для спостереження загасаючих коливань напругу U з обкладок конденсатора коливального контуру подають на вхід Y осцилографа. Конденсатор підключають до генератора сигналів спеціальної форми



(налаштованого на видачу уніполярних імпульсів). Протягом першої половини періоду напруга U на конденсаторі дорівнює електрорушійній силі джерела. Через половину періоду коливань напруга $U = 0$ В. В контурі починаються вільні (затухаючі) загасаючі коливання. Осцилограма цих коливань показана на рис. 4.

Рис. 4. Осцилограма загасаючих коливань.

Вимірювання параметрів загасаючих коливань

В роботі треба знайти характеристики загасаючих коливань: логарифмічний декремент загасання λ , період загасаючих коливань T , коефіцієнт загасання δ і критичний опір $R_{кр.}$.

Амплітуди напруги на конденсаторі U_t і U_{t+T} (див. Рис. 4), необхідні для розрахунку логарифмічного декременту λ за формулою (7), можна виміряти в поділках шкали Y осцилографа. Для вимірювання періоду загасаючих коливань T проводять попереднє калібрування осі часу осцилографа за відомим періодом T_i уніполярних імпульсних коливань. При цьому визначають ціну поділки осі X як відношення $m = T_i / 2\ell_0$. В результаті вимірюваний період загасаючих коливань

$$T = \frac{m\ell}{n} = \frac{T_i\ell}{2n\ell_0}, \quad (9)$$

де ℓ_0 - число поділок, відповідне відрізку часу, рівному половині періоду коливань T_i (див. рис. 4); n - ціле число повних коливань на відрізку ℓ осі X . Таким чином, для знаходження коефіцієнта загасання δ необхідно виміряти дві

послідовні (через період) амплітуди загасаючих коливань U_t і U_{t+T} , та їх період T (через ℓ і ℓ_0).

За допомогою формули (8) визначають експериментальне значення коефіцієнта загасання δ . Критичний опір контуру $R_{кр}$ знаходять дослідним шляхом, спостерігаючи зміну виду залежності $U(t)$ при збільшенні активного опору контуру R . Ознакою виходу на режим аперіодичного розряду конденсатора є отримання кривої $U(t)$, яка не містить коливань (див. Рис. 3).

Опис установки

Схема електричного кола представлена на рис.5.

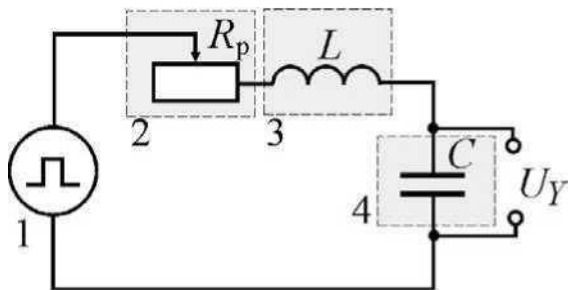


Рис. 5. Електрична схема електричного кола:

1 - генератор сигналів спеціальної форми (уніполярні імпульси форми "П"); 2 - мініблок «Реостат» з опором R ; 3 - котушка індуктивності L ; 4 - мініблок «Конденсатор»; U_y – сигнал, який подається на вхід Y осцилографа.

Досліджуваний коливальний контур складається з послідовно з'єднаних котушки (з відомою індуктивністю L і активним опором R_k), реостата R_p і конденсатора відомої ємності C (C_1 або C_2). Напругу U_y з конденсатора коливального контуру подають на вхід Y осцилографа. Масштабна сітка, нанесена на його екрані, дозволяє вимірювати амплітуду і період згасаючих коливань. На осцилограмі $U(t)$ спостерігають також перехід від коливань до аперіодичного розряду конденсатора. Для його досягнення збільшують опір контуру за допомогою реостата. Генератор сигналів спеціальної форми 1 призначений для отримання уніполярних імпульсів з метою надання електричної енергії коливальному контуру.

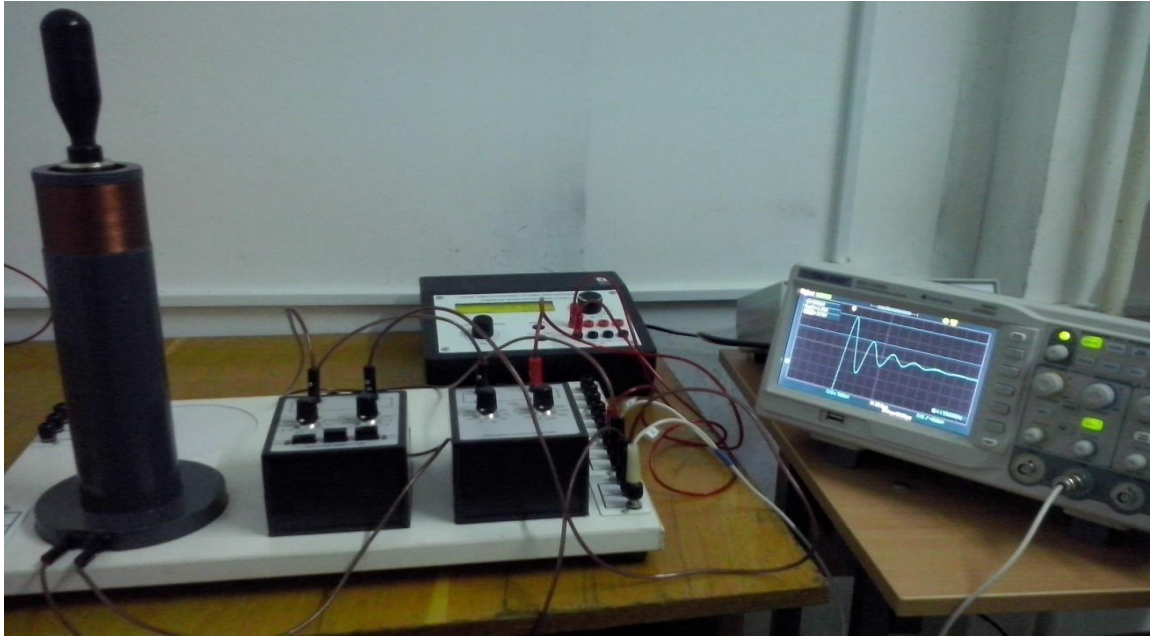


Рис.6 Лабораторна установка

Порядок виконання роботи

Виконання вимірювань

1. Складіть електричне коло, наведене на рис.5. На місце конденсатора C встановіть конденсатор з відомою ємністю $C_1 = 0.1\text{мкФ}$. Для стійкого зображення синхронізуйте осцилограф з тим каналом, на який подаєте сигнал (наприклад, CH2-для Oy). Встановіть опір реостата R_p рівним 0 кОм .

2. Увімкніть осцилограф (з дозволу викладача) і дочекайтеся його завантаження.

Калібрування установки

3. Увімкніть (з дозволу викладача) перемикачем «Мережа» живлення блоку генератора напруги. Кнопкою «Режим» на панелі блоку генератора спеціальної форми виберіть уніполярні імпульси («Меандр»), ручкою установки частоти встановіть частоту сигналу $f = 200\text{ Гц}$ ($T_1 = 0,005\text{ с}$).

4. На осцилографі отримаєте осцилограму вигляду, показаного на рис.4, встановлюючи амплітуду імпульсів ручкою регулювання амплітуди сигналу генератора. Стале зображення кривої забезпечується регулюванням осцилографа і синхронізацією, а необхідні розміри осцилограми можна задати за допомогою ручок «Horizontal» (Ox) і «Vertical» (Oy). При цьому, змінюючи підсилення по осі X , добийтеся, щоб відрізок ℓ_0 зайняв майже всю сітку екрану.

5. Запишіть в табл.1 наступні параметри контуру: L_k - індуктивність котушки; C - ємність конденсатора; R_k - активний опір котушки, ℓ_0 (в поділках).

$$L_k = 0.68 \text{ мГн} \pm 10\% \quad R_k = 4.8 \pm 0.05 \text{ Ом.}$$

Таблиця 1

C мкФ	L_k мГн	R_k Ом	ℓ_0 м	ℓ м	n	U_t В	U_{t+T} В	$R_{кр.}$ Ом
$C_1 = 0,1$	0,68	4,8						
$C_2 =$								

Вимірювання параметрів коливального контура

6. За допомогою координатної сітки екрану виміряйте довжину ділянок ℓ , ℓ_0 .

7. Проведіть вимірювання амплітуд U_t і U_{t+T} (для більш точного їх відліку переміщайте вимірювану ординату на центральну лінію екрану), визначте число повних коливань n на ділянці ℓ . Результати цих вимірювань запишіть у таблицю 1.

8. Збільшуючи опір реостата R_p , спостерігайте зміну загасання коливань і перехід осцилограми від виду на рис. 2 до виду, показаному на рис. 3. Мінімальний опір ланцюга, при якому отримана осцилограма виду рис.3, є $R_{кр} = R_k + R_p$. Запишіть значення $R_{кр.}$ в табл.1.

9. Замість конденсатора C_1 , встановіть конденсатор $C_2 = 0.33 \text{ мкФ}$ і повторіть пп. 3-8.

10. Вимкніть кнопками «Мережа» живлення блоку генераторів напруги і блоку мультиметрів.

Обробка результатів вимірювань

1. За даними табл. 1 для кожного значення ємності обчисліть розрахункові (р) і експериментальні (е) величини логарифмічного декременту λ , коефіцієнта загасання δ , періоду коливань T і критичного опору контуру $R_{кр.}$. Використовуйте формули, номери яких вказані в табл. 2, призначеної для запису результатів розрахунку.

Таблиця 2.

C, мкФ	λ	$\delta, \text{с}^{-1}$		T, с		$R_{кр.}, \text{Ом}$	
		p	e	p	e	p	e
Номери формул	(7)	(2)	(8)	(5)	(9)	(6)	$R_k + R_p$
$C_1 = 0,1$							
$C_2 = 0,33$							

Примітка. Зверніть увагу, що експериментальні значення коефіцієнта загасання більше, ніж розрахункові, через істотних втрат енергії на перемагнічування осердя котушки.

2. У висновку по роботі зробіть аналіз отриманих даних:

а) вкажіть характерні зміни осцилограми і параметрів коливань при зміні ємності контуру;

б) опишіть зміни залежності $U(t)$ у міру збільшення активного опору ланцюга;

в) порівняйте отримані експериментальні значення величин T і $R_{кр}$ з розрахунковими.

Контрольні питання

1. За яким законом змінюються при розряді конденсатора в коливальному контурі, що містить R, L, C, наступні величини: а) напруга на конденсаторі; б) заряд обкладок конденсатора; в) струм в ланцюзі?

2. Які формули показують, як залежать від параметрів коливального контуру наступні характеристики коливань: а) циклічна частота і період загасаючих коливань; б) коефіцієнт загасання коливань; в) критичне опір контуру.

3. При зміні яких параметрів контуру, що містить R, L, C: а) зближуються значення періодів згасаючих і незатухаючих коливань; б) змінюється коефіцієнт загасання коливань; в) змінюється критичний опір контуру?

4. Що відбувається в коливальному контурі при опорі, більшому критичного значення, тобто при виконанні умови $\delta > \omega_0$?

5. Які величини вимірюють за допомогою осцилограми коливань для визначення: а) періоду загасаючих коливань; б) логарифмічного декременту загасання коливань?
6. Які величини використовують для калібрування осі Х осцилографа?
7. Як визначають експериментальне значення критичного опору контуру?
8. Який вид приймає осцилограма $U(t)$ при досягненні $R_{кр}$?
9. Яке призначення мають наступні елементи електричного кола: а) генератор напруги спеціальної форми; б) реостат?
10. Який параметр коливального контуру змінюють в роботі, щоб отримати аперіодичний розряд конденсатора?
11. З яких елементів електричного кола можна подати напругу на вхід Y осцилографа для спостереження загасаючих коливань?
12. За якими формулами визначають: а) експериментальне значення періоду коливань T ; б) експериментальне значення коефіцієнта загасання коливань δ ; в) розрахункові (теоретичні) значення величин T , δ і $R_{кр}$?
13. Поясніть процес виникнення загасаючих коливань.

Рекомендована література

1. Ахиезер А.И. Общая физика. Электрические и магнитные явления: справочное пособие. Киев: Наук. думка, 1981. 472 с.
2. Барановський В.М. Бережний П.В. Горбачук І.Т та ін. Загальна фізика. Лабораторний практикум. Навчальний посібник. За загальною редакцією Горбачука І.Т. К.: Вища школа, 1992. 509 с.
5. Кучерук І.М. Горбачук І.Т. Луцик П.П. Загальний курс фізики. Навчальний посібник, Т. 2. Електрика і магнетизм. К.: Техніка, 2001. 452 с.
6. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. М.: Наука, 1983. Т. 3. 688 с.
7. Детлаф А. А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2002. 718с.
1. Чебаненко А.П. Курс загальної фізики. Підручник, Т. 3. Електрика і магнетизм. Одеса: Астропринт, 2011. 224 с.
2. Русаков В.Ф. Электричество и магнетизм: учебное пособие. Винница: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 236 с.

Лабораторна робота № 5

Взаємна індукція двох соленоїдів

Мета: експериментально визначити коефіцієнт взаємної індукції двох соленоїдів та порівняти результат з розрахованим теоретично.

Приладдя: генератор сигналів спеціальної форми, мініблок “Соленоїди”, два мультиметри.

Теоретична частина

Соленоїд зі струмом I_1 створює навколо себе магнітне поле \vec{B}_1 . Якщо поблизу цього соленоїду розмістити інший соленоїд, то з ним виявиться зчепленим деякий магнітний потік Φ_2 (рис. 1). Цей магнітний потік, як показує дослід та теорія, пропорційний величині струму в першому соленоїді (рис. 1).

$$\Phi_2 = M_{21} I_1$$

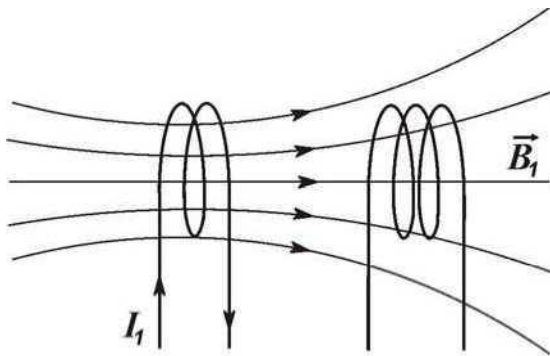


Рис. 1. Лінії індукції магнітного поля соленоїда

Коефіцієнт пропорційності M_{21} між магнітним потоком Φ_2 , який проходить через поперечний переріз другого соленоїду, та струмом I_1 , що тече в першому соленоїді, називається *коефіцієнтом взаємної індукції* другого соленоїда з першим.

Дослідимо коефіцієнт взаємної індукції на прикладі двох соленоїдів, осі яких співпадають. Один з них (короткий) L_k поміщений всередину довгого соленоїда L_d у його середині, як показано на рис. 2.

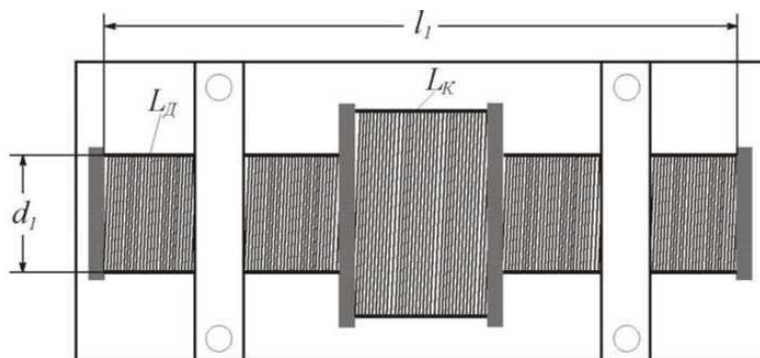


Рис. 2. Схема розташування двох соленоїдів

Довгий соленоїд ($\ell_1 \gg d_1$) створює в середній його частині (де розміщено короткий соленоїд) практично однорідне магнітне поле, вектор індукції якого дорівнює:

$$B_1 = \frac{\mu\mu_0 N_1}{\ell_1} I_1 \quad (1)$$

де N_1 - кількість витків довгого соленоїда, ℓ_1 - його довжина.

Магнітний потік через перетин $S_1 = \pi d_1^2/4$ довгого соленоїда (і відповідно через перетин короткого) дорівнює:

$$\Phi_1 = B_1 \cdot S_1 \quad (2)$$

Оскільки короткий соленоїд розташований посередині довгого соленоїда і їх площі перетинів співпадають, то магнітний потік, зчеплений з коротким соленоїдом Φ_2 , буде дорівнювати

$$\Phi_2 = \Phi_1 N_2 = \frac{\mu\mu_0 N_1}{\ell_1} S_1 I_1 N_2 \quad (3)$$

де N_2 - кількість витків короткого соленоїда.

Тоді, коефіцієнт взаємної індукції другого соленоїда з першим соленоїдом дорівнює:

$$M_{21} = \frac{\Phi_2}{I_1} = \frac{\mu\mu_0 N_1 N_2}{\ell_1} S_1 \quad (4)$$

В нашому випадку $\mu = 1$ (повітря). Якщо через довгий соленоїд пропустити змінний струм:

$$I_1 = I_{01} \cos \omega t \quad (5)$$

(де $\omega = 2\pi f$ - циклічна частота струму), то магнітний потік, зчеплений з коротким соленоїдом буде змінним:

$$\Phi_2 = M_{12} I_{01} \cos 2\pi f t \quad (6)$$

і, відповідно, в ньому буде наводитися електрорушійна сила індукції

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Phi_2}{dt} = M_{21} I_{01} 2\pi f \sin 2\pi f t \quad (7)$$

Амплітуда цієї е.р.с.

$$\varepsilon_{max} = 2\pi f M_{21} I_{01}, \quad (8)$$

де I_{01} - амплітуда змінного струму в довгому соленоїді.

Електровимірювальні прилади (в тому числі і мультиметри) вимірюють діючі значення струму та напруги (по осцилографу – амплітудне) тому:

$$U_2 = \frac{\varepsilon_{max}}{\sqrt{2}}, \quad I_1 = \frac{I_{01}}{\sqrt{2}}. \quad (9)$$

Враховуючи це, з (8) та (9) отримуємо:

$$U_2 = M_{21} 2\pi f I_1. \quad (10)$$

Відповідно:

$$M_{21} = \frac{U_2}{2\pi f I_1}.$$

Таким чином, для заданої частоти f , вимірюючи струм I_1 в довгому соленоїді та напругу U_2 , яка виникає на кінцях короткого соленоїда, можна експериментально визначити M_{21} .

Опис установки

Електрична схема установки наведена на рис.3. Живлення довгого соленоїда 3 здійснюється від генератора сигналів спеціальної форми 1. Струм в колі вимірюється мультиметром 2. Е.р.с. взаємоіндукції, яка виникає в короткому соленоїді 4, вимірюється осцилографом 5. Монтажна схема установки приведена на рис. 4.

1 – генератор сигналів спеціальної форми;
2 – мультиметр (режим змінний (\sim) A: 200 mA, входи COM(–) та mA(+));

3 – довгий соленоїд з індуктивністю L_D ;

4 – короткий соленоїд з індуктивністю L_K ;

5 – осцилограф, як вимірювач амплітуди напруги;

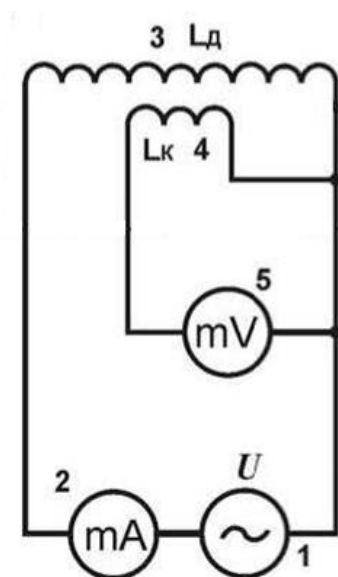


Рис. 3. Електрична схема

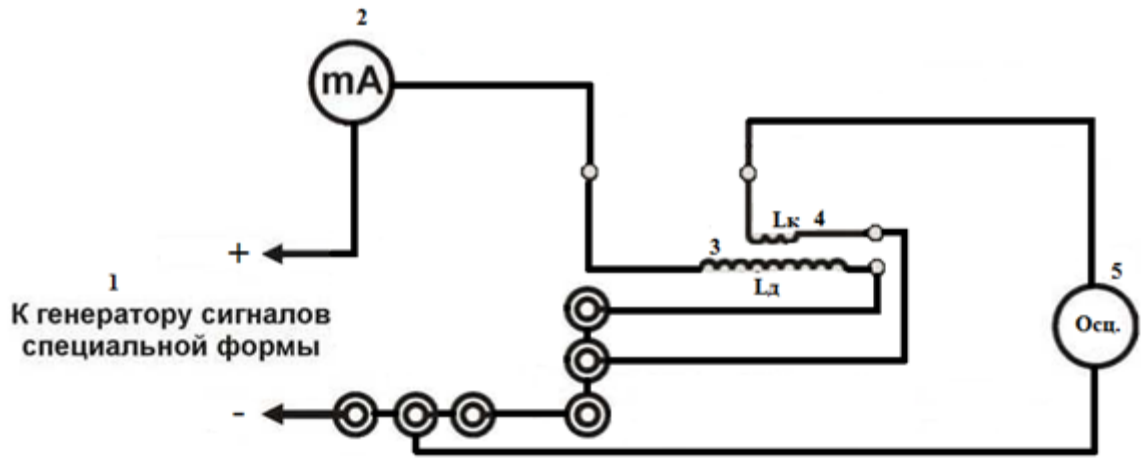


Рис. 4 Монтажна схема

Порядок виконання роботи

Загальний вигляд установки показано на рис.5. В роботі необхідно знайти коефіцієнт взаємної індукції M_{12} .

1. Увімкніть (з дозволу викладача) кнопками «Мережа» живлення блоку генераторів напруги, мультиметр, осцилограф. Встановіть на генераторі сигнал синусоїдальної форми кнопкою «Режим».
2. В таблицю запишіть параметри N_1 , N_2 , ℓ_1 , d_1 .

Таблица 1

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ $N_1 =$, $N_2 =$, $\ell_1 =$ м, $d_1 =$ м, $S_1 =$ м ²			
$f, \text{Гц}$	I_1, mA	$U_2, \text{В}$	$M_{312}, \text{Гн}$
1000	20		
1000	30		
1000	40		
1000	50		
1000	60		
1000	70		
3000	20		
3000	30		
3000	40		
3000	50		
3000	60		
3000	70		
5000	5		
5000	10		
5000	15		
5000	20		
5000	25		

5000	30		
$M_T = \dots \Gamma\text{H}$		$\langle M_E \rangle = \dots \Gamma\text{H}$	



Рис. 5. Загальний вигляд установки

3.Зберіть електричну схему за монтажною схемою, як показано на рис. 4. Встановіть необхідні режими вимірювання мультиметра 2 та осцилографа 5 (рис. 3).

4.Ручкою установки частоти встановіть частоту сигналу $f_1 = 1000 \text{ Гц}$; виміряйте напругу U_2 на короткому соленоїді за допомогою осцилографа для вказаних в таблиці значень струму I_1 (20, 30, 40, 50, 60, 70mA), по отриманій залежності $U_2 = f(I_1)$ знайти методом найменших квадратів коефіцієнт взаємної індукції M_{21} та його похибку. Результат вимірювань та розрахунків занесіть в таблицю 1.

5.Проведіть подібні вимірювання та розрахунки для інших струмів та частот (3000 Гц, 5000 Гц), які вказані в таблиці.

6.За формулою (4) розрахуйте теоретичне значення коефіцієнта магнітної індукції M_T .

7.Порівняйте між собою значення експериментального M_E та теоретичного M_T коефіцієнта взаємної індукції. Зробіть висновки.

Контрольні питання

1. Що таке коефіцієнт взаємної індукції?
1. В яких одиницях вимірюється коефіцієнт взаємної індукції?
3. Що таке магнітний потік?
4. В чому полягає явище електромагнітної індукції?
5. Сформулюйте закон Фарадея для електромагнітної індукції.
6. Що таке діюче значення струму та напруги?
7. Від чого залежить коефіцієнт взаємної індукції?

Рекомендована література

1. Барановський В.М. Бережний П.В. Горбачук І.Т та ін. Загальна фізика. Лабораторний практикум. Навчальний посібник. За загальною редакцією

- Горбачука І.Т. К.: Вища школа, 1992. 509 с.
2. Кучерук І.М. Горбачук І.Т. Луцик П.П. Загальний курс фізики. Навчальний посібник, Т. 2. Електрика і магнетизм. К.: Техніка, 2001. 452 с.
 3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. М.: Наука, 1983. Т. 3. 688 с.
 4. Ахиезер А.И. Общая физика. Электрические и магнитные явления: справочное пособие. Киев: Наук. думка, 1981. 472 с.
 5. Чебаненко А.П. Курс загальної фізики. Підручник, Т. 3. Електрика і магнетизм. Одесса: Астропринт, 2011. 224 с.
 6. Русаков В.Ф. Электричество и магнетизм: учебное пособие. Винница: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 236 с

Лабораторна робота № 6

Вивчення явища електрорушійної сили самоіндукції

Мета: вивчення явища самоіндукції, форми струму та ЕРС в котушці при різних формах вхідної напруги.

Приладдя: велика котушка з середньою точкою, осердя, магазин опорів, генератор звукової частоти, цифровий осцилограф.

Теоретична частина

Уявімо, що по деякому замкнутому контуру тече струм, сила якого дорівнює I . Як відомо, струм створюватиме в навколишньому просторі магнітне поле. Силкові лінії цього поля також перетинатимуть і сам контур та будуть створювати магнітний потік через цей контур. За законом Біо-Савара-Лапласа

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \int \frac{I[d\vec{\ell} \times \vec{r}]}{r^3},$$

модуль вектора магнітної індукції \vec{B} у будь-якій точці простору прямо пропорційний силі струму, який створює дане поле. Відповідно, повний магнітний потік Ψ (потокозчеплення) через контур, буде також прямо пропорційний струмові:

$$\Psi = L \cdot I \quad (1)$$

де L – коефіцієнт пропорційності, який називається *індуктивністю* контуру.

Індуктивність контуру залежить від форми та розмірів контуру та магнітних властивостей середовища, в якому знаходиться контур.

Розмірність потокозчеплення, як і магнітного потоку, Вебер. З (1) випливає, що індуктивність чисельно дорівнює потозчепленню, яке перетинає контур при силі струму в контурі 1 А. Одиниця індуктивності в системі СІ називається Генрі (Гн): $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб/А} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{с}$.

Магнітну індукцію довгої котушки (соленоїда) довжиною ℓ , площею поперечного перерізу S та кількістю витків N можна визначити, застосовуючи формулу закону Біо – Савара - Лапласа:

$$B = \frac{\mu\mu_0 N}{\ell} I \quad (2)$$

де μ_0 – магнітна стала, μ – відносна магнітна проникність середовища всередині котушки. Тоді магнітний потік через соленоїд з площею поперечного перерізу S дорівнює

$$\Phi = BS = \frac{\mu\mu_0 NS}{\ell} I,$$

а потокозчеплення:

$$\Psi = N\Phi = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{\ell} I.$$

З врахуванням (1), маємо:

$$L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{\ell}. \quad (3)$$

Строго кажучи, формула (3) виражає індуктивність ділянки соленоїда з дуже великою довжиною ℓ . Звісно, реальні соленоїди мають скінченну довжину та індуктивність реального соленоїда менша. На практиці це враховується введенням коефіцієнта k , значення якого менше одиниці та залежить від співвідношення між довжиною ℓ соленоїда та його радіусом R

$$L = k \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{\ell}. \quad (4)$$

Як відзначалося, ЕРС індукції виникає в контурі незалежно від причин, які викликають зміну магнітного потоку, що перетинає контур. При зміні струму в контурі зміниться магнітний потік, який перетинає цей контур, і це призведе до виникнення в контурі ЕРС індукції. *Виникнення ЕРС індукції в провідному контурі при зміні струму, що тече по ньому, називається явищем самоіндукції.* Величину ЕРС самоіндукції знайдемо, якщо в формулу закону електромагнітної індукції Фарадея:

$$\varepsilon_s = -\frac{d\Phi}{dt}$$

замість Φ підставимо вираз (1) для Ψ :

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}. \quad (5)$$

Припускається, що форма та розміри контуру не змінюються, інакше формула стане складнішою. Знак мінус в (5) означає, що ЕРС самоіндукції напрямлена таким чином, щоб протидіяти зміні струму в контурі (правило Ленца для ЕРС самоіндукції). Інкаше кажучи, струм I_s , який створюється ЕРС самоіндукції, напрямлений протилежно напрямку струму в контурі I , якщо струм I зростає ($\frac{dI}{dt} > 0$) (рис. 1, а). Якщо ж

струм I спадає, струм I_s співпадає за напрямком з I (рис. 1, б).

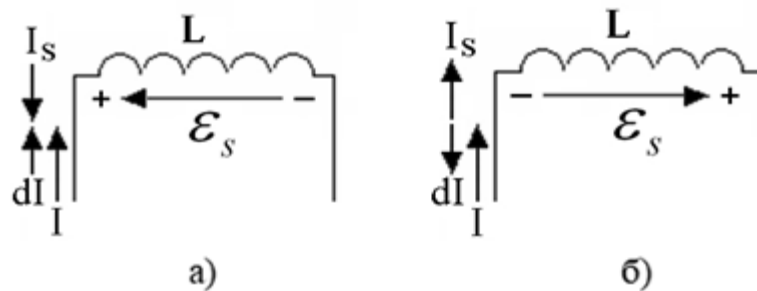


Рис.1 Напрямки струмів та ЕРС в соленоїді.

Порядок роботи

Загальний вигляд установки показано на рис.3.

В роботі необхідно змалювати з екрана осцилографа осцилограми графіків напруг для різних форм напруг генератора.

1. Зберіть схему (рис. 2б).

2. Котушку L_1 та магазин опорів встановіть на піддон. В магазині встановіть опір достатній для отримання нормальної амплітуди сигналу (але не менше 10 Ом). На екрані цифрового осцилографа сигнали повинні бути: на каналі 1 (500 mV – 1 V) та на каналі 2 (100 – 500 mV) для отримання адекватної картини.

3. Подайте напругу з генератора звукових частот *синусоїдальної* форми частотою порядку 200 Гц (натиснути кнопку Режим – синусоїда, потім Старт). При цьому спостерігайте на екрані осцилографа зсув фази сигналу ЕРС (канал 2) відносно сигналу струму в котушці (канал 1). Замалюйте отримані осцилограми. Натисніть кнопку Стоп.

4. Подайте напругу з генератора звукових частот *прямокутної* форми частотою 200 Гц (натисніть кнопку Режим – Меандр, потім Старт). При цьому спостерігайте на екрані форму струму в котушці (канал 1) та форму ЕРС в котушці (канал 2). Замалюйте отримані осцилограмми. Натисніть Стоп.

5. Подайте напругу з генератора звукових частот *трикутної* форми частотою 200 Гц. При цьому спостерігайте форму струму в котушці (канал 1) та форму ЕРС в котушці (канал 2). Замалюйте осцилограми. Натисніть Стоп.

6. Повторіть досліди пп. 3-5 вводючи всередину котушки осердя. Зафіксуйте отримані картини.

7. Порівняйте картинки на екрані осцилографа у випадку котушки з осердям та без нього, виявіть залежність індуктивності котушки від магнітної проникності середовища (магнітної проникності осердя).



Рис. 3. Загальний вигляд лабораторної установки

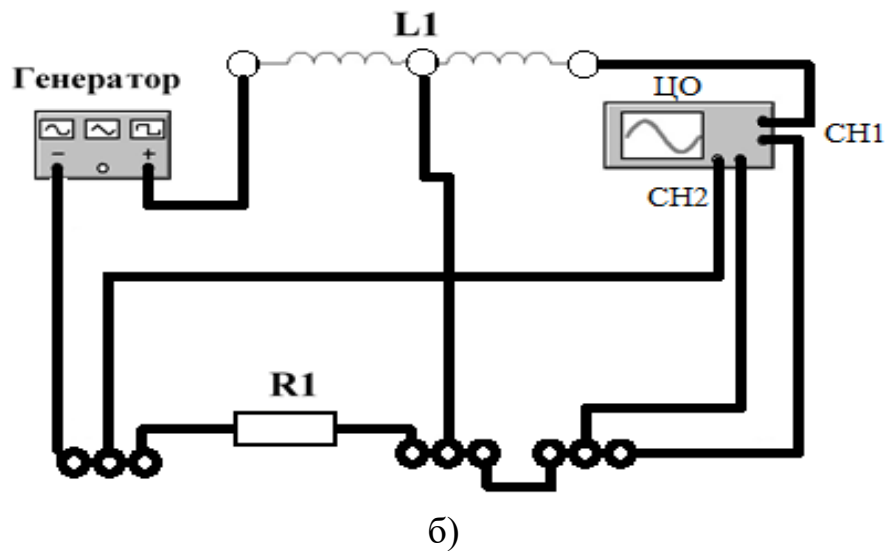
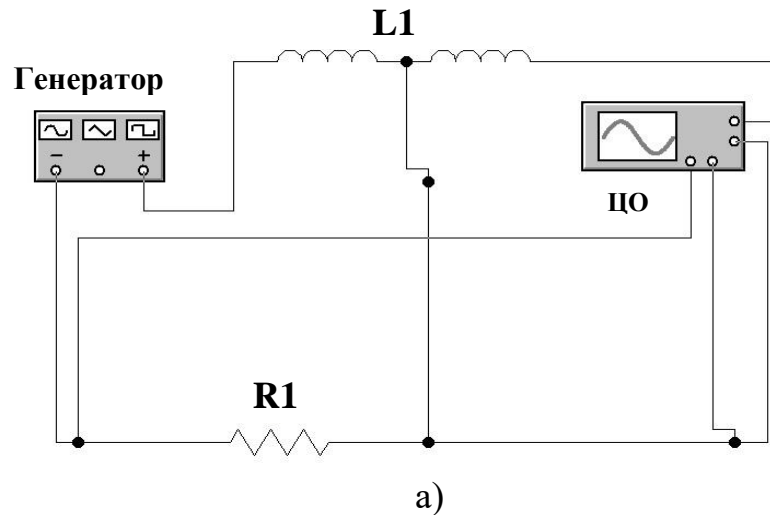


Рис. 2 Принципова схема: а) та схема з'єднань: б)

Контрольні питання

1. Що таке потік магнітної індукції?
2. Сформулюйте закон електромагнітної індукції Фарадея та правило Ленца.
3. Що таке явище самоіндукції та взаємної індукції?
4. Що таке індуктивність та від чого залежить величина індуктивності котушки?
5. Чому при замиканні та розмиканні електричного кола величина напруги на котушці різна?
6. Чим визначається тривалість зростання та спадання ЕРС в колі з індуктивністю?

Рекомендована література

1. Барановський В.М. Бережний П.В. Горбачук І.Т та ін. Загальна фізика.

- Лабораторний практикум. Навчальний посібник. За загальною редакцією Горбачука І.Т. К.: Вища школа, 1992. 509 с.
2. Кучерук І.М. Горбачук І.Т. Луцик П.П. Загальний курс фізики. Навчальний посібник, Т. 2. Електрика і магнетизм. К.: Техніка, 2001. 452 с.
 3. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: ВШ, 2007, с. 221–233.
 4. Наркевич И.И., Волмянский Э.И., Лобко С.И. Физика. Мн.: Новое знание, 2004, с. 135.
 5. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: ВШ, 2007, с. 328–340.
 6. Савельев И.В. Курс физики. В 3-х т. Т. 2, М.: «Наука», 1989, с. 196–211.
 7. Чебаненко А.П. Курс загальної фізики. Підручник, Т. 3. Електрика і магнетизм. Одесса: Астропринт, 2011. 224 с.
 8. Русаков В.Ф. Электричество и магнетизм: учебное пособие. Винница: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 236 с

Лабораторна робота № 7

Вивчення явища резонанса в електричних колах

Мета: експериментальне отримання резонансної кривої, вимірювання індуктивності та ємності резонансним методом.

Приладдя: генератор сигналів спеціальної форми, котушка індуктивності, мініблоки “Конденсатор” та “Опір”, мультиметр.

Теоретична частина

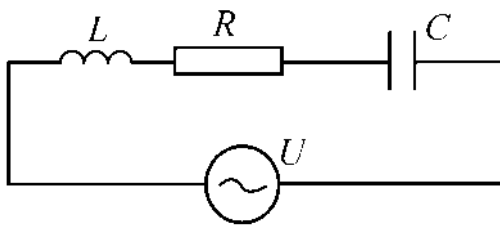


Рис.1 Послідовне з'єднання L, R, C

Резонансом називають явище зростання амплітуди сталих вимушених коливань при певній частоті зовнішньої сили, яка близька до власної частоти системи. Електричні резонанси спостерігаються в коливальному контурі – електричному колі, яке складається з котушки індуктивності L з

активним опором R та конденсатора ємності C . Для підтримки незагасаючих коливань в контурі, вводять джерело змінної напруги $U = U_m \cos \omega t$. Розглянемо два види резонансів в електричному колі: резонанс напруг та резонанс струмів.

Явище резонансу напруг відбувається в колі послідовно з'єднаних котушки індуктивності та ємності (рис. 1).

Запишемо для контуру друге правило Кірхгофа:

$$U_L + IR + U_C = U_m \cos \omega t,$$

де IR – падіння напруги на активному опорі R , U_C – напруга на конденсаторі $U_C = \frac{1}{C} \int I dt$, U_L – напруга на котушці індуктивності L (ЕРС самоіндукції) $U_L = L \frac{dI}{dt}$, $U = U_m \cos \omega t$ – зовнішня напруга, яка прикладається до кола. Отримуємо диференціальне рівняння вимушених коливань струму I в колі:

$$IR + \frac{1}{C} \int I dt + L \frac{dI}{dt} = U_m \cos \omega t, \text{ або}$$

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dI}{dt} + \frac{1}{LC} I = -\omega U_m \sin \omega t.$$

Розв'язуючи це рівняння, отримаємо вираз для струму в колі (рис.1.)

$$I(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi + \pi/2) . \quad (1)$$

Амплітуда вимушених коливань струму I_m в цьому рівнянні залежить від параметрів контуру та циклічної частоти зовнішньої напруги ω :

$$I_m = \frac{U_m}{|Z|} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} , \quad (2)$$

де U_m - амплітуда зовнішньої напруги, Z – повний опір змінному струму (імпеданс кола), X – реактивний опір контура;

$$X = X_L + X_C; \quad X_L = i\omega L; \quad X_C = \frac{1}{i\omega C} .$$

Як показує рівняння (2), можна підібрати таку частоту, щоб $\omega_0 L = 1/\omega_0 C$. Ця частота $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ називається резонансною (власною) частотою контура. При цьому повний опір кола буде мінімальним: $Z_{min} = R$, а амплітуда струму в контурі – максимальною. Таке явище називають *резонансом напруг*: оскільки напруги на індуктивності та ємності однакові ($U_L = U_C$, бо опори однакові) та коливаються в *протифазі*, то їх сума дорівнює нулю, а падіння напруги U_R максимальне та дорівнює зовнішній напрузі U_m .

Залежності $I_m = \varphi(\omega)$ для різних R (графіки резонансних кривих) приведені на рис. 2, їх називають резонансними кривими. Згідно умови резонансу ($|X_L| = |X_C|$) значення резонансної частоти співпадає з власною частотою контуру ω_0 :

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0 \quad (3)$$

Ширина резонансної кривої залежить від *добротності* коливального контуру:

$$Q = \frac{\pi}{\lambda} \cong \frac{\sqrt{L}}{R}$$

де λ - *логарифмічний декремент* загасання. Добротність коливального контуру – це відношення енергії, накопиченої в індуктивності котушки L , до енергії розсіяної на активному опорі R . Оскільки при послідовному з'єднанні

L і R струм протікає через L і R однаковий, то $Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{L}{R\sqrt{LC}} = \frac{\sqrt{L/C}}{R}$.

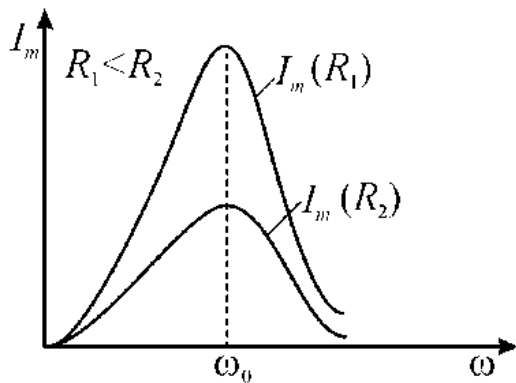


Рис. 2 Резонансні криві

Чим менша величина R , тим різкіше проявляється резонанс, на графіку залежності $I_m(\omega)$ виникає резонансний пік (див. рис. 2).

Резонанс струмів спостерігається в колі, яке складається з паралельно увімкнених ємності та індуктивності (рис. 3). Якщо активний опір контуру R дорівнює нулю, то при резонансній

частоті $\omega_{\text{рез}} = 1/\sqrt{LC}$ у відповідності з умовою $X_L = X_C$ та законом Ома, маємо:

$$I_L = \frac{U}{|X_L|}; I_C = \frac{U}{|X_C|};$$

тобто струми в паралельних частинах кола однакові ($I_L = I_C$), але їх коливання відбуваються в протифазі. При цьому в контурі циркулює значний струм, а в підвідних проводах струм I знижується до нуля. Це явище називають *резонансом струму*.

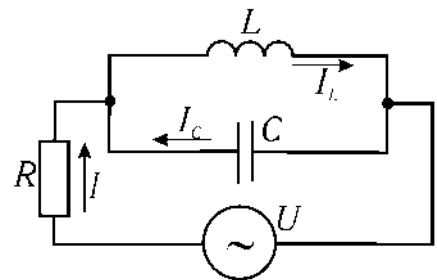


Рис. 3. Резонанс струмів

Метод вимірювань

Змінюючи частоту зовнішнього джерела напруги, яка прикладається до коливального контуру, та вимірюючи при цьому струм або пропорційне струмові падіння напруги на активному опорі U_R , можна побудувати резонансну криву $U_R = \varphi(f)$.

У випадку послідовного з'єднання ємності та індуктивності при резонансній частоті спостерігаються максимуми напруги на опорі R (бо буде максимальний струм, див. формулу (2)), а напруга на ділянці LC мінімальна.

Таким чином, по положенню максимуму резонансної кривої $U_R = \varphi(f)$ можна визначити значення резонансної частоти. Формула (3) дозволяє по знайдений частоті $f_{рез}$ визначити індуктивність коливального контуру L_x , якщо відомо значення ємності C_0 :

$$L_x = \frac{1}{C_0 \omega_{0рез}^2} \quad (4)$$

Замінивши конденсатор з відомою ємністю на конденсатор з невідомою ємністю C_x в контурі з тією ж індуктивністю L та вимірявши резонансну частоту $\omega_{рез}$, можна визначити ємність конденсатора C_x за формулою:

$$C_x = C_0 \left(\frac{f_{0рез}}{f_{xрез}} \right)^2 \quad (5)$$

При паралельному з'єднанні конденсатора та котушки індуктивності, резонанс в колі можна виявити по мінімальній напрузі на опорі R в електричному колі або по максимальній напрузі на ділянці LC . Резонансна частота також співпадає з власною частотою коливального контуру ω_0 .

Електричне коло (див. рис. 4а) з послідовно з'єднаними елементами L та C призначене для вивчення резонансу напруг, а коло з паралельно з'єднаними L та C (рис. 4б) – для резонансу струмів.

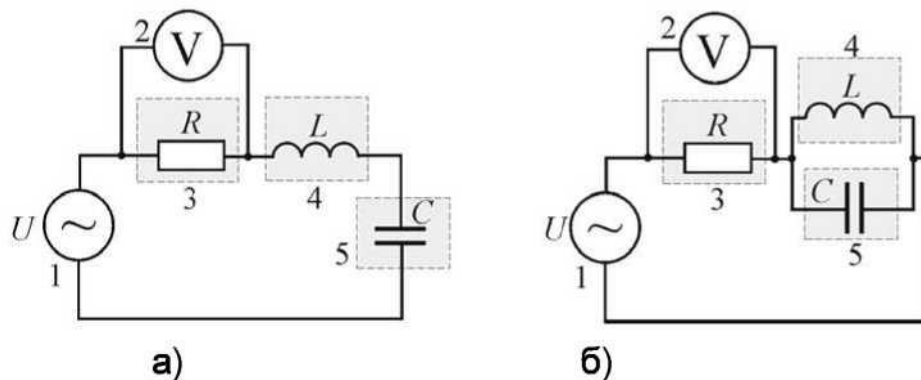
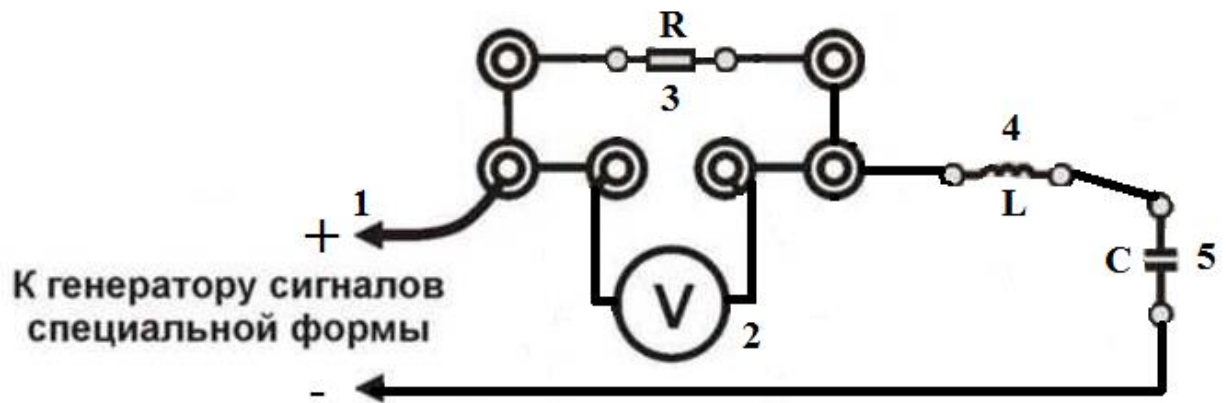
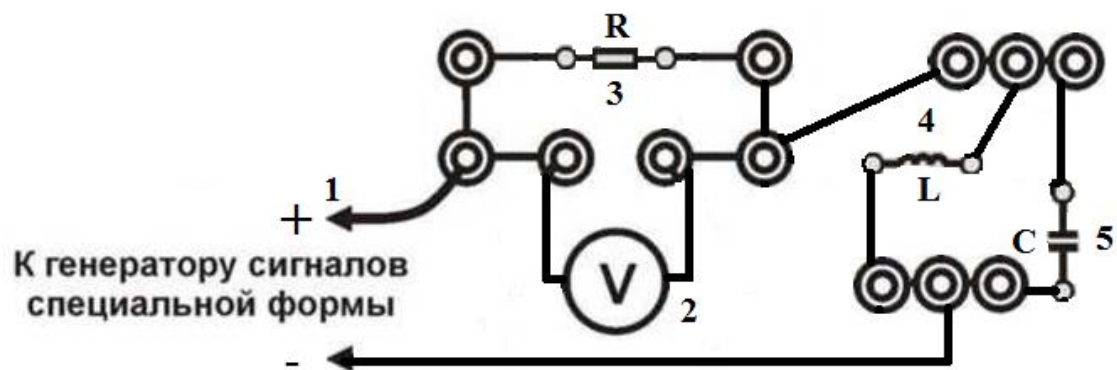


Рис. 4 Електричне коло для резонансу напруг (а) та резонансу струмів (б)

- 1 - генератор сигналів спеціальної форми;
- 2 – мультиметр (режим $\sim V$ 2В, входи COM(a) і $V\Omega(+)$);
- 3 – мініблок «ОПР» з опором $R = 20$ Ом;
- 4 – Катушка з індуктивністю L_x ;
- 5 – мініблок «Конденсатор» ємністю C_0 або C_x .



а)



б)

Рис. 5 Монтажні схеми до рис. 4а та 4б відповідно

Падіння напруги U_R на опорі R вимірюють мультиметром 2.

В якості джерела зовнішньої змінної напруги застосовують генератор напруги спеціальної форми 1.

Порядок виконання роботи

Виконання вимірювань

1. Зберіть по монтажній схемі, яка приведена на рис. 5 електричне коло (рис. 4а), яка складається з послідовно з'єднаного конденсатора відомої ємності C_0 (це значення занесіть в таблицю) та невідомої індуктивності L_x .

2. Увімкніть кнопками "Мережа" (з дозволу викладача) живлення блока генераторів напруги та блоку мультиметрів. Ручкою установки частоти встановіть початкову частоту $f = 50$ Гц. З'єднайте незадіяний в схемі мультиметр (режим $V \sim 2$ В, входи COM(-), $V\Omega(+)$) з вихідними гніздами генератора та ручкою «установки рівня» встановіть напругу на виході генератора $1 \div 2$ В.

Збільшуючи частоту f вихідного сигналу генератора, виміряйте залежність напруги на опорі R контура від частоти $U_R = \varphi(f)$, (треба взяти приблизно 30 значень частоти, при максимальній частоті U_R буде дорівнювати приблизно початковому значенню напруги ($1 \div 2$ В)), зробіть заміри два рази, результати вимірювань запишіть в таблицю, побудуйте графік $U_R = \varphi(f)$, знайдіть максимальну напругу на активному опорі U_R та відповідну їй частоту $f_{\text{рез}}$. Для двох вимірів $u_R = \varphi(f)$, знайдіть середнє значення резонансної частоти $f_{\text{рез}}$ та її похибку.

Таблиця 1

	Послідовне з'єднання L_X и C_0				Паралельне з'єднання L_X и C_0	
	$R = \text{Ом}, L_X = \text{мГн}$					
	$C_0 = \text{мкФ}$ $f_{\text{рез0}} = \text{Гц}$		$C_X = \text{мкФ}$ $f_{\text{хрез}} = \text{Гц}$		$C = \text{мкФ},$ $L_X = \text{мГн}$	
№	$f, \text{Гц}$	$U_R, \text{В}$	$f, \text{Гц}$	$U_R, \text{В}$	$f, \text{Гц}$	$U_R, \text{В}$
1						
.....						
30						

2. Вимкніть кнопками “Мережа” живлення блока генераторів напруги та мультиметр. Замініть конденсатор C в коливальному контурі на C_X (невідомий) та повторіть вимірювання по пп. 2, 3, для отримання ще однієї резонансної кривої, знайдіть резонансну частоту $f_{\text{хрез}}$, та за формулою (5) розрахуйте C_X .

3. Підключіть мультиметр паралельно ділянці кола $L_X C_X$. Змінюючи частоту генератора в тому ж інтервалі, спостерігайте поблизу резонансної частоти $f_{\text{рез}}$ мінімальне значення напруги U_{LC} .

4. Вимкніть кнопками “Мережа” живлення блока генераторів напруги та мультиметр.

5. Зберіть електричне коло (рис. 4б), яке складається з паралельно з'єднаних конденсатора (це значення занесіть в таблицю) та невідомої індуктивності L_X . Виконайте п.2 та проведіть вимірювання U_R в тому ж частотному діапазоні, що і при послідовному з'єднанні. Результати вимірювань запишіть в таблицю для побудови графіка $u_R = \varphi(f)$.

6. Вимкніть кнопками “Мережа” живлення блока генераторів напруги та мультиметр.

Обробка результатів вимірювань

1. За даними таблиці побудуйте на одному графіку дві резонансних криві

$U_R = \varphi(f)$. Відмітьте значення резонансних частот контуру по положенню максимуму та мінімуму кривих $U_R = \varphi(f)$.

2. За величиною резонансної частоти $f_{\text{рез}}$ для контура з відомою ємністю C_0 знайдіть за формулою (4) індуктивність котушки L :

$$L_X = \frac{1}{C_0 \omega_{0\text{рез}}^2} = \dots \text{ Гн.}$$

За другою частотою $f_{X\text{рез}}$ та формулою (5) розрахуйте ємність C_X :

$$C_X = C_0 \left(\frac{f_{0\text{рез}}}{f_{X\text{рез}}} \right)^2 = \dots \text{ мкФ.}$$

Результати обчислень запишіть в таблицю.

3. У висновку проведіть аналіз отриманих даних:

а) опишіть зміни залежності $U_R = \varphi(f)$ при зміні ємності коливального контуру;

б) порівняйте частоти, які відповідають максимуму резонансної кривої $U_R = \varphi(f)$ при послідовному з'єднанні конденсатора та індуктивності та мінімуму кривої $U_R = \varphi(f)$ при паралельному підключенні конденсатора та індуктивності.

Контрольні питання

1. Запишіть закон зміни струму в колі при вимушених коливаннях.
2. Чим визначається частота та амплітуда вимушених коливань?
3. Яку ЕРС викликають вимушені коливання?
4. За якої умови спостерігається резонанс в коливальному контурі при вимушених коливаннях?
5. Яка величина повного опору контуру та струму в ньому у випадку резонансу напруг (послідовного резонансу)?
6. Що характерно для величини струму I та величини напруг U_{LC} , U_R при резонансі напруг в коливальному контурі?
7. Як пояснити, що:
 - а) при резонансі напруг струм в контурі максимальний;
 - б) при резонансі струмів в під'єднуваних до коливального контуру проводах тече невеликий струм?
9. Від яких величин залежить «висота» (амплітуда) резонансного піку $I = \varphi(f_{\text{рез}})$?
10. Яку форму мають резонансні криві $U_R = \varphi(f)$, $U_{LC} = \varphi(f)$: а) при резонансі

напруг; б) при резонансі струмів?

11. До якої ділянки коливального контуру потрібно підключити мультиметр для отримання резонансної кривої з максимумом (або з мінімумом) у випадках:

а) послідовного з'єднання елементів L та C ;

б) паралельного з'єднання L та C ?

12. Яким чином в даному коливальному контурі можна змінити: а) частоту вимушених коливань; б) резонансну частоту контуру?

13. Які параметри коливань в контурі зміняться, якщо змінити частоту коливань генератора?

14. Яким шляхом в роботі досягають отримання резонансів? Що служить ознакою досягнення резонансу?

15. З якою метою в роботі будують графік $U_R = \varphi(f)$? Як по ньому визначити резонансну частоту контуру?

16. Які дослідні дані застосовують для визначення величин: а) індуктивності контуру L ; б) ємності контуру C_x ?

Рекомендована література

1. Кучерук І.М. Горбачук І.Т. Луцик П.П. Загальний курс фізики. Навчальний посібник, Т.2. Електрика і магнетизм. К.: Техніка, 2001. 452 с.
2. Барановський В.М. Бережний П.В. Горбачук І.Т та ін. Загальна фізика. Лабораторний практикум. Навчальний посібник. За загальною редакцією Горбачука І.Т. К.: Вища школа, 1992. 509 с.
3. Ахиезер А.И. Ахиезер И.А Электромагнетизм и электромагнитные волны: Учеб. Пособие. М.: Радио, 1985. 504 с.
4. Детлаф А. А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высшая школа, 2002. 718 с.
5. Трофимова, Т.И. Курс общей физики: Учеб. Пособие. М.: Высшая школа, 2006. §§121,123,130.
6. Чебаненко А.П. Курс загальної фізики. Підручник, Т. 3. Електрика і магнетизм. Одеса: Астропринт, 2011. 224 с.
7. Русаков В.Ф. Электричество и магнетизм: учебное пособие. Винница: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 236 с



Рис.6 – Загальний вид установки

Лабораторна робота № 8

RC- контур на змінному струмі

Мета: вивчити процеси, які відбуваються в RC колі при змінному струмі.

Приладдя: магазин ємностей, магазин опорів, генератор звукової частоти 1, цифровий осцилограф.

Теоретична частина

Електричний струм в конденсаторі представляє собою сукупність процесів його зарядження та розрядження – накопичення та віддача енергії електричним полем між обкладками конденсатора.

В колі змінного струму, конденсатор буде заряджатися до певного максимального значення, поки струм не змінить напрямок на протилежний. В моменти амплітудного (максимального) значення напруги на конденсаторі, струм в ньому буде дорівнювати нулю. Таким чином, напруга на конденсаторі та струм в ньому будуть мати розходження за часом в четверть періода.

В результаті струм в колі буде обмежений падінням напруги на конденсаторі, що створює реактивний опір змінному струму, причому цей реактивний опір обернено пропорційний швидкості зміни струму (частоті) та ємності конденсатора.

Якщо прикласти до конденсатора напругу U , миттєво потече струм від максимального значення, і поступово зменшуючись до нуля. В цей час напруга на його виводах буде зростати від нуля до максимуму. Значить, напруга на

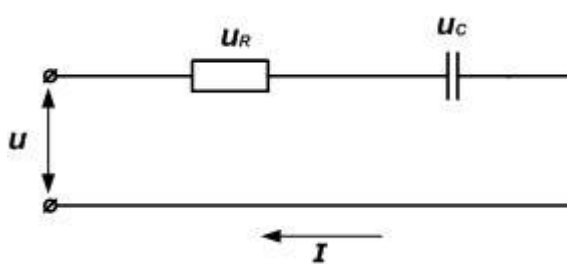


Рис. 1 RC-коло

обкладках конденсатора по фазі відстає від струму на кут 90° . Такий зсув фаз називають від'ємним.

Розглянемо послідовне RC-коло, яке складається з послідовно з'єднаних резистора та конденсатора (рис. 1).

Нехай напруга на зажимах кола дорівнює $u = U_m \sin \omega t$. (1)

За другим законом Кірхгофа цю ж напругу можна визначити, як суму падіння напруг на резисторі та конденсаторі:

$$u_R + u_C = u, \quad (2)$$

де
$$u_R = iR, \quad u_C = \frac{1}{C} \int i dt. \quad (3)$$

Тоді вираз для i можна переписати наступним чином:

$$iR + \frac{1}{C} \int i dt = U_m \sin \omega t \quad \text{або} \quad \frac{di}{dt} + \frac{i}{RC} = \frac{\omega U_m}{R} \cos \omega t. \quad (4)$$

Після розв'язання цього диференціального рівняння отримаємо вираз для струму в колі:

$$i = I_m (\sin \omega t - \theta). \quad (5)$$

Підставляючи i у вираз (4) та виконуючи інтегрування, отримаємо:

$$I_m R (\sin \omega t - \theta) + I_m \frac{1}{\omega C} \left(\sin \omega t - \theta - \frac{\pi}{2} \right) = U_m \sin \omega t. \quad (6)$$

Напруга на резисторі дорівнює:

$$u_R = I_m R \sin(\omega t - \theta) = U_{mR} \sin(\omega t - \theta). \quad (7)$$

Напруга на конденсаторі:

$$u_C = I_m \frac{1}{\omega C} \sin \left(\omega t - \theta - \frac{\pi}{2} \right) = U_{mC} \sin \left(\omega t - \theta - \frac{\pi}{2} \right). \quad (8)$$

Як видно з (8), (5) напруга на конденсаторі відстає від струму на кут $\pi/2$.

Закон Ома підказує, що $1/\omega C$ – реактивний (ємнісний) опір для синусоїдального струму:

$$|X_C| = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}. \quad (9)$$

Зі зменшенням частоти ємнісний опір конденсатора збільшується. При постійному струмі реактивний опір дорівнює нескінченності, так як частота (змінного струму) дорівнює нулю.

Зсув фаз в послідовному RC - колі можна визначити за формулою:

$$\theta = \arctg \left(-\frac{X_C}{R} \right). \quad (10)$$

Модуль повного опору RC - кола:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} \right)^2}. \quad (11)$$

Амплітудне значення струму:

$$I = \frac{U}{|Z|} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\frac{1}{\omega C})^2}}.$$

Порядок виконання роботи

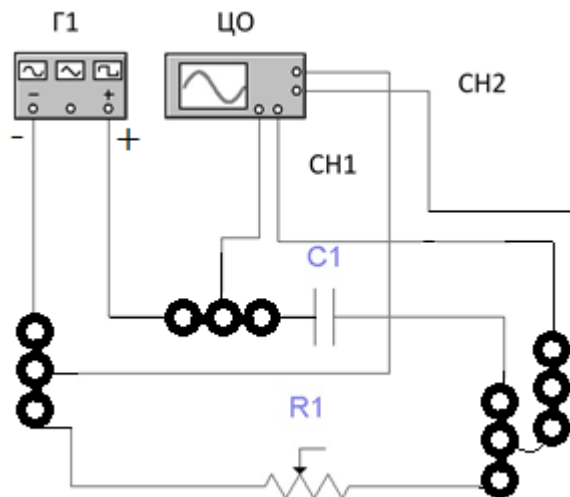


Рис. 2 Схема з'єднання елементів RC – кола

Дослід 1

1. Зберіть схему, яка показана на рис. 2.
2. Встановіть у магазині опорів R_1 значення порядку 50 Ом, на генераторі 1 частоту $f = 100$ Гц синусоїдальної форми, а в магазині ємностей C значення $C_1 = 1$ мкФ.
3. Спостерігайте на екрані осцилографа два сигнали синусоїдальної форми, один сигнал з опору R_1 , другий – з ємності C_1 , вони зсунуті за фазою на $\pi/2$ один відносно іншого.
4. Зарисуйте дану осцилограму, виміряйте значення амплітуди напруги U_c осцилографом і запишіть в таблицю 1.
5. Виконайте дії пп. 2–3 змінюючи значення C_i від 1.5 мкФ до 9 мкФ, перемикаючи ручку в магазині ємностей.
6. Для кожного значення ємності C_i виміряйте осцилографом амплітуду U_c і запишіть в таблицю 1. Зверніть увагу на характер зміни амплітуди сигналу.

Дослід 2.

1. Встановіть в магазині ємностей яке-небудь фіксоване значення C , наприклад, 5.5 мкФ ($R_1 = 50$ Ом).

2. Змінюючи частоту f генератора 1 в межах від 100 Гц до 1000 Гц через 100 Гц, виміряйте значення напруги на конденсаторі U_c і запишіть в таблицю 1. Зверніть увагу на характер зміни амплітуди сигналу.

За результатами вимірювань побудуйте графіки $U_c = \varphi(X_c)$, $U_c = \varphi(f)$, $X_c = \varphi(f)$.

Таблиця 1

Дослід 1 $f = 100$ Гц, $R = 50$ Ом		Дослід 2 $C = 5,5$ мкФ, $R = 50$ Ом	
C_i , мкФ	U_c , В	f , Гц	U_c , В
1		100	
1.5		200	
2.2		300	
3.3		400	
4.7		500	
5.5		600	
6.8		700	
8		800	
9		900	

Контрольні питання

1. Запишіть формули законів Ома та Кірхгофа для електричних кіл змінного струму.
2. Яким чином здійснюється послідовне з'єднання елементів в електричному колі?
3. Запишіть формули для визначення індуктивного та ємнісного опорів.
4. Запишіть формули для визначення активної, реактивної та повної потужності кола.
5. Чому дорівнює кут зсуву фаз між напругою та струмом на активному, індуктивному та ємнісному елементах?
6. Чому змінюється амплітуда напруги U_c при зміні частоти і зміні ємності?

Рекомендована література

1. Кучерук І.М. Горбачук І.Т. Луцик П.П. Загальний курс фізики. Навчальний посібник, Т. 2. Електрика і магнетизм. К.: Техніка, 2001. 452 с.
2. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. М: Высшая школа, 1983, §§ 5,6,11.

3. Барановський В.М. Бережний П.В. Горбачук І.Т та ін. Загальна фізика. Лабораторний практикум. Навчальний посібник. За загальною редакцією Горбачука І.Т. К.: Вища школа, 1992. 509 с.
4. Ахиезер А.И. Общая физика. Электрические и магнитные явления: справочное пособие. Киев: Наук. думка, 1981. 472 с.
5. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М: Высшая школа, 1983, §48.
6. Чебаненко А.П. Курс загальної фізики. Підручник, Т. 3. Електрика і магнетизм. Одесса: Астропринт, 2011. 224 с.
7. Русаков В.Ф. Электричество и магнетизм: учебное пособие. Винница: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 236 с

Лабораторна робота № 9

Спосіб вимірювання частоти і фази невідомого сигналу за допомогою фігур Лісажу

Мета: вивчити спосіб вимірювання частоти і фази сигналів за допомогою фігур Лісажу, отримати навички роботи з цифровим осцилографом.

Прилади та обладнання: генератори сигналів 1 і 2, цифровий осцилограф.

Теоретична частина

Розглянемо спосіб експериментального визначення частоти і фази невідомого сигналу за допомогою фігур Лісажу, якщо відомі параметри сигналу еталонного генератора. Сутність цього методу полягає в наступному. Досліджуваний сигнал з невідомою частотою ω_y подається на вхід «Y», а сигнал з відомою частотою ω – на вхід «X». При цьому генератор розгортки повинен бути відключений. Тоді промінь на екрані осцилографа буде викреслювати деяку складну двовимірну криву, вид якої істотно залежить від співвідношення частот ω_y і ω . Зображення на екрані осцилографа, одержувані при різних співвідношеннях фаз і частот гармонічних сигналів, називаються фігурами Лісажу.

Якщо це відношення частот ω_y і ω сигналів дорівнює відношенню двох цілих чисел, які не сильно відрізняються від одиниці (тобто $\omega/\omega_y = 1, 1/2, 2, 2/3, 3/2, 3, 1/3$ і т. д.), то фігура Лісажу приймає порівняно простий вигляд. За формою фігури Лісажу можна визначити відношення частот коливань. Для цього необхідно вписати фігуру Лісажу в прямокутник шляхом зміни амплітуд сигналів.

Нехай m – кількість точок дотику фігури Лісажу з горизонтальною стороною прямокутника (або точок перетину прямої з фігурою Лісажу), а n – відповідна кількість точок дотику з вертикальною стороною (або точок перетину). Тоді за повний період відбулося m коливань з частотою ω_y і n коливань з частотою ω , тобто:

$$\frac{n}{\omega} = \frac{m}{\omega_y} \rightarrow \frac{\omega_y}{\omega} = \frac{m}{n}. \quad (1)$$

За формулою (1) можна знайти невідому частоту ω_y . Подамо напруги U_x і U_y на вхід «X» і «Y» осцилографа. Зміщення електронного променя по горизонталі і вертикалі визначається виразами:

$$x(t) = x_0 \cos \omega t; y(t) = y_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (2)$$

де φ – зсув фаз між напругою U_x і U ; x_0 і y_0 – амплітуди напруг U_x і U , помножені на коефіцієнти підсилення відповідних каналів. Складемо дані коливання, попередньо виключивши параметр – час t : $\frac{x(t)}{x_0} = \cos \omega t$.

$$\frac{y(t)}{y_0} = \cos \omega t \cdot \cos \varphi - \sin \omega t \cdot \sin \varphi = \frac{x(t)}{x_0} \cdot \cos \varphi - \sqrt{1 - \left(\frac{x(t)}{x_0}\right)^2} \cdot \sin \varphi. \quad (4)$$

Звідси отримаємо:

$$\left[\frac{x(t)}{x_0} \cdot \cos \varphi - \frac{y(t)}{y_0} \right]^2 = \sin^2 \varphi \cdot \left(1 - \frac{x^2(t)}{x_0^2} \right). \quad (5)$$

Після тригонометричних перетворень, виходить рівняння кривої другого порядку, що представляє собою рівняння еліпса, описуваного електронним променем на екрані осцилографа:

$$\frac{x^2}{x_0^2} + \frac{y^2}{y_0^2} - 2 \frac{xy}{x_0 y_0} \cdot \cos \varphi = \sin^2 \varphi. \quad (6)$$

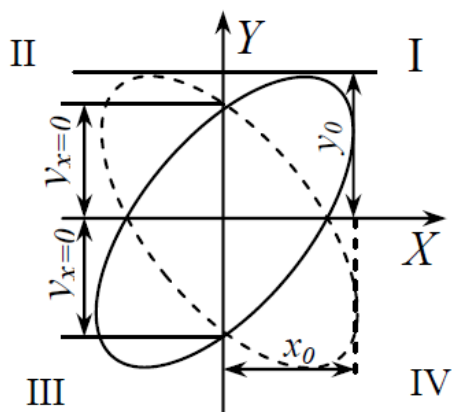


Рис.1. Фігура Лісажу

Орієнтація осей еліпса щодо координатних осей X і Y в загальному випадку довільна і залежить як від різниці фаз φ , так і від амплітуд коливань (рис.1).

Щоб отримати канонічне рівняння еліпса виду $\frac{x^2}{x_0^2} + \frac{y^2}{y_0^2} = 1$, необхідно систему координат повернути на деякий кут γ . Визначимо цей кут. Перетворення декартових координат на площині при повороті системи координат на кут γ має вигляд:

$$\begin{aligned} x &= x' \cos \gamma - y' \sin \gamma \\ y &= x' \sin \gamma + y' \cos \gamma \end{aligned} \quad (7)$$

Підставивши (7) в (6) і виконавши відповідні перетворення, отримаємо:

$$x'^2 \left(\frac{\frac{\cos \gamma}{x_0^2} - \frac{\sin 2\gamma}{x_0 y_0} \cos \varphi + \frac{\sin^2 \gamma}{y_0^2}}{\sin^2 \varphi} \right) + y'^2 \left(\frac{\frac{\sin^2 \gamma}{x_0^2} + \frac{\sin 2\gamma}{x_0 y_0} + \frac{\cos \gamma}{y_0^2}}{\sin^2 \varphi} \right) + 2 \frac{x' y'}{x_0 y_0} \left(\frac{\frac{x_0^2 - y_0^2}{2 x_0 y_0} \sin 2\gamma - \cos \varphi \cos 2\gamma}{\sin^2 \varphi} \right) = 1 \quad (8)$$

Прирівнюючи коефіцієнти в дужках, відповідно, до $\frac{1}{x^2}$, $\frac{1}{y^2}$ і 0, отримуємо зв'язок між кутом γ , амплітудами сигналів і кутом φ :

$$\operatorname{tg} 2\gamma = 2 \frac{x_0 y_0}{x_0^2 - y_0^2} \cos \varphi.$$

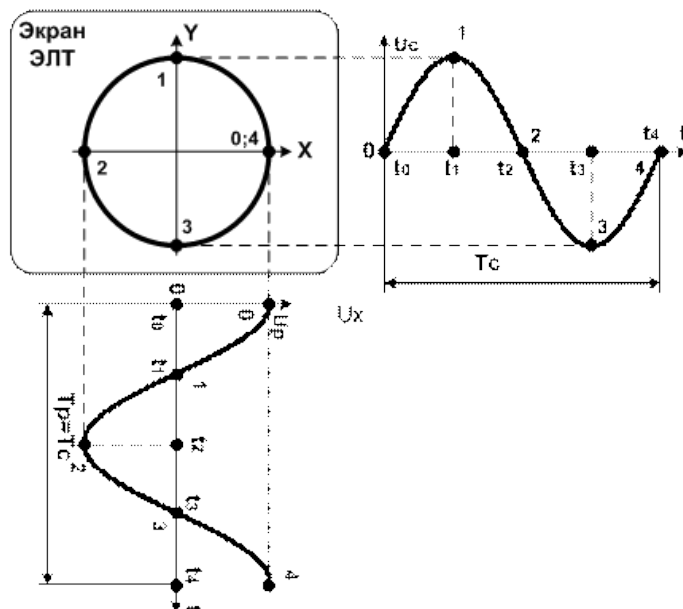


Рис.2. Зображення на екрані осцилографа

При цьому осі еліпса збігаються з осями координат x' і y' , а його півосі дорівнюють відповідним амплітудам. Таким чином, для визначення амплітуд x_0 і y_0 потрібно виміряти довжину відрізків, показаних на рис.1. При $\varphi = 0$ еліпс вироджується в пряму, що перетинає квадранти I і III екрану осцилографа.

Позитивні і негативні значення на екрані осцилографа не можна відрізнити, вони відрізняються тільки

напрямоком руху світлового променя, що описує еліпс. Як можна визначити різницю фаз φ ? Якщо на Y і X подати відповідно напруги U_y і U_x синусоїдальної форми з однаковою амплітудою із зсувом фаз 90° або 270° , то на екрані за один період коливань вийде зображення кола (рис.2).

Моментом часу t_0 , t_1 і т.д. будуть відповідати напруги сигналів U_y і U_x , відмічені точками 0,1 і однойменні точки на екрані осцилографа. Таким чином, крапка, що світиться буде переміщатися на екрані проти годинникової стрілки, описуючи коло. Якщо на пластини подати напруги, що збігаються по фазі,

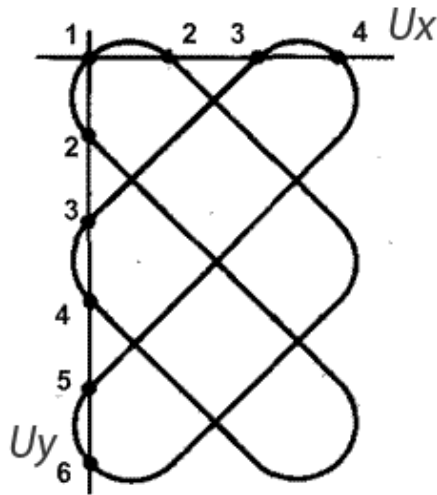


Рис.3. Фігура Лісажу при співвідношеннях частот 2/3

то на екрані вийде зображення прямої лінії з нахилом 45° . При зсуві фаз в 180° – така ж лінія, але з нахилом в протилежну сторону. При зсуві фаз в 45 або 135° на екрані вийде зображення еліпса, велика вісь якого нахилена по відношенню до горизонтальної осі.

По фігурі, отриманої на екрані, визначають співвідношення частот. Припустимо, що на екрані отримана фігура, показана на рис.3.

Для визначення співвідношення частот проводять горизонтальну і вертикальну прямі, які перетинають фігуру. (При цьому через точки перетину ліній самої фігури ці прямі проходити не повинні). Кількість точок перетину ліній фігури в горизонтальному напрямі відповідає кількості змін напруги U_x , а в вертикальному – кількості змін напруги U_y . В даному випадку відношення частот $4:6 = 2:3$.

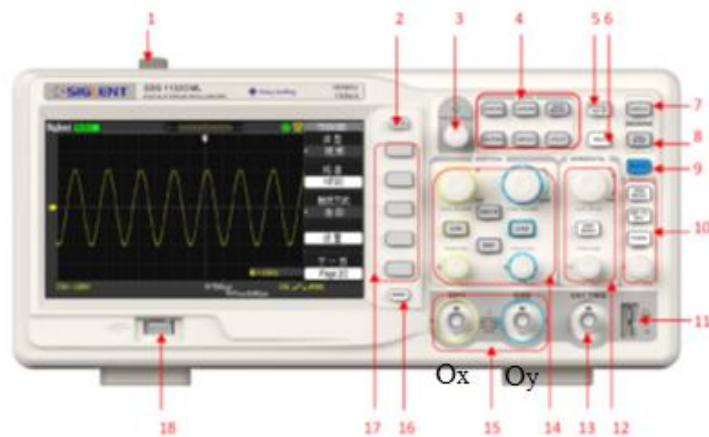


Рис.4. Цифровий осцилограф

На рис.4 зображено: 1 – «мережа», 2 – меню, 3 – інтенсивність, 4 – функціональні кнопки, 5 – установка по замовчуванню, 6 – допомога, 7 – крок, 8 – запуск / зупинка розгортки, 9 – автоналаштування, 10 – блок синхронізації, 11 – зовнішні підключення, 12 – блок розгортки по горизонталі (O_x), 13 – зовнішня синхронізація, 14 – розгортка по вертикалі (O_y), 15 – сигнальні входи 1 і 2 (осцилограми відповідають кольору), 16 – друк, 17 – кнопки навігації по меню, 18 – usb порт (більш докладний опис осцилографу міститься у інструкції до нього).



Рис.5 – Зовнішній вигляд лабораторної установки

Порядок роботи

1. Включити (з дозволу викладача) генератор 1, генератор 2 і осцилограф перемикачем «Сеть».
2. На цифровому осцилографі (рис.4), після його завантаження, для роботи необхідні такі кнопки: 1) «Auto» 9; 2) «Display» з блоку 4 (функціональні кнопки) для установки режиму Y/X замість стандартного Y/T; 3) ручки вертикальної розгортки блоку 14 для установки необхідного значення В/поділку по Oy , щоб сигнали відображалися коректно; 4) ручки горизонтальної розгортки з блоку 12 для установки значення с/поділку по Ox . (Зазвичай налаштування не потрібне, більшість установок робиться автоматично при натисканні на «Auto»).
2. На вхід Ox осцилографа подати синусоїдальну напругу від генератора 1 потрібної частоти (від 450Гц до 10кГц).
3. На вхід Oy – синусоїдальну напругу від генератора 2 деякої довільної частоти (від 450Гц до 10кГц).
4. Змінюючи частоту генератора 2, не змінюючи при цьому частоту першого генератора, отримати стійкі нерухомі фігури Лісажу для співвідношення частот 1:1, 1:2, 1:3, 2:3, 1:4.
5. Замалювати отримані фігури, розрахувати співвідношення частот, пояснити результат.
6. Вимкнути прилади по завершенні роботи.

Контрольні питання

1. Принцип роботи осцилографа, для чого він призначений?
2. Як виміряти амплітуду і частоту сигналу за допомогою осцилографа?
3. У чому полягає метод фігур Лісажу для вимірювання частоти гармонічного сигналу?
4. Як визначити частоту коливань за методом фігур Лісажу?
5. Як визначити різницю або відношення амплітуд коливань за методом фігур Лісажу?

6. Як повинні співвідноситися $x_0, y_0, \omega_1, \omega_2, \varphi_1, \varphi_2$, щоб від двох коливань $x(t) = x_0 \cos(\omega_1 t + \varphi_1)$ та $y(t) = y_0 \cos(\omega_2 t + \varphi_2)$ отримати фігуру Лісажу у вигляді: а) прямої, б) еліпса, в) кола?

Рекомендована література

1. Кучерук І.М. Горбачук І.Т. Луцик П.П. Загальний курс фізики. Навчальний посібник, Т. 2. Електрика і магнетизм. К.: Техніка, 2001. 452 с.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. М.: Наука, 1983 Т. 3. 688 с.
3. Барановський В.М. Бережний П.В. Горбачук І.Т та ін. Загальна фізика. Лабораторний практикум. Навчальний посібник. За загальною редакцією Горбачука І.Т. К.: Вища школа, 1992. 509 с.
4. Ахиезер А.И. Общая физика. Электрические и магнитные явления: справочное пособие. Киев: Наук. думка, 1981. 472 с.
5. Гольдин Л.Л. Лабораторные занятия по физике. М.: Наука, 1983. 704 с.
6. Чебаненко А.П. Курс загальної фізики. Підручник, Т. 3. Електрика і магнетизм. Одеса: Астропринт, 2011. 224 с.
7. Русаков В.Ф. Электричество и магнетизм: учебное пособие. Винница: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 236 с

Лабораторна робота № 10

Перехідні процеси в RL -колі

Мета: дослідити перехідні процеси в RL -колі.

Приладдя: котушка індуктивності, магазин опорів, генератор сигналів, цифровий осцилограф.

Теоретична частина

Перехідні процеси виникають в електричному колі при переході від одного встановленого режиму до іншого, в результаті різного роду комутацій.

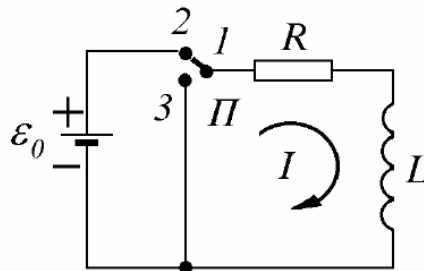


Рис. 1 Схема RL -кола

Нехай в момент часу $t = 0$ до RL -кола підключили джерело з ЕРС, що дорівнює ε_0 (перемикач Π в положенні 2). Застосуємо закон Ома для ділянки кола, вважаючи, що на рис. 1 вказано позитивний напрямок струму:

$$\varepsilon_0 - L \frac{di}{dt} = iR. \quad (1)$$

Розділюючи змінні, запишемо (1) у вигляді

$$dt = \frac{L di}{\varepsilon_0 - Ri}. \quad (2)$$

Проінтегрувавши (2) з врахуванням початкових умов ($i = 0$ при $t = 0$), отримаємо:

$$i(t) = \frac{\varepsilon_0}{R} \left(1 - e^{-\frac{tR}{L}} \right).$$

Якщо в момент часу $t = T$ перемикач Π перевести в положення 3 (вимкнути джерело ЕРС від кола, тоб-то, в рівнянні (2) $\varepsilon_0 = 0$), отримаємо для $t > T$:

$$i(t) = i(T) \cdot e^{-\frac{(t-T)R}{L}}$$

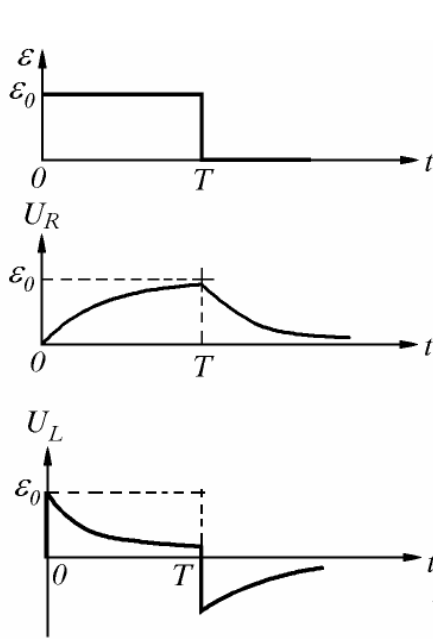


Рис.2. Часова залежність напруги на опорі і котушці

Константа $\tau = \frac{R}{L}$ має розмірність часу та характеризує швидкість зміни струму в електричному колі. Ця константа називається сталою часу RL -кола. Наведемо формули залежностей падіння напруги на резисторі $U_R(t) = i(t) \cdot R$ та на котушці індуктивності $U_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$ від часу:

1) при $t \leq T$

$$U_R(t) = \varepsilon_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$U_L(t) = \varepsilon_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

2) при $t > T$

$$U_R(t) = U_R(T) \cdot e^{-\frac{t-T}{\tau}}$$

$$U_L(t) = (U_L(T) - \varepsilon_0) \cdot e^{-\frac{t-T}{\tau}}$$

Графіки залежностей $\varepsilon(t)$, $U_L(t)$, а також падіння напруги на опорі (наприклад, резисторі) $U_R(t)$ представлені на рис. 2.



Рис. 3 Загальний вигляд лабораторної установки

Порядок виконання роботи

1. Зберіть схему, яка показана на рис. 4.

2. Встановіть в магазині опорів $R_1 = 10$ Ом, на генераторі кнопкою “Режим” виберіть “Меандр”, ручкою “Частота” встановіть частоту f_1 порядку 100 Гц, натисніть “Старт”.
3. Спостерігайте на екрані осцилографа два сигнали: на каналі 1 (CH1) сигнал, який подається з генератора, а на каналі 2 (CH2) сигнал, який пропорційний силі струму в котушці U_{maxi} . Виміряйте осцилографом амплітуду напруги U_{max} на котушці без осердя, потім – на котушці з осердям для R_1 , результати вимірювання записати в таблицю 1.
4. Змінюючи значення опору контуру R_i через 10 Ом, виміряти осцилографом напруги U_i на котушці без осердя і з осердям, результати вимірювань записати в таблицю 1. Зверніть увагу на зміну напруги на котушці з осердям і без осердя.

Таблиця 1

R_i , Ом	L_i без осердя	L_i з осердям
	U_{1maxi} , В	U_{2maxi} , В
10		
20		
30		
40		
50		
60		
70		
80		
90		

5. Побудуйте графіки залежності $U_1(R)$ та $U_2(R)$ за методом найменших квадратів, де $U_1(R)$ напруга на котушці без осердя, $U_2(R)$ напруга на котушці з осердям.

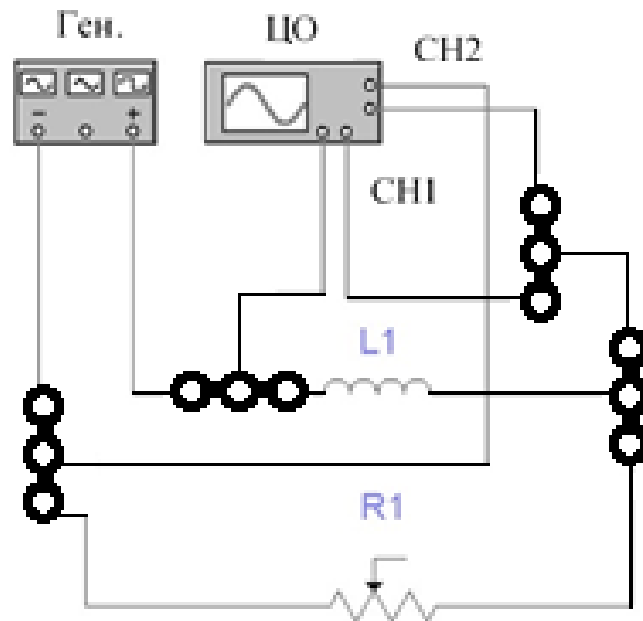


Рис. 4 Схема з'єднань R і L
Контрольні питання

1. Чому дорівнює стала часу τ RL-кола? Сформулюйте її фізичний зміст.
2. Як графічно знайти значення τ ?
3. Як зміниться форма напруги $U_R(t)$ при збільшенні R в 2 рази?
4. Яким чином здійснюється послідовне, паралельне з'єднання елементів в електричному колі?
5. Чому буде дорівнювати напруга U_L при $t = \tau$?

Рекомендована література

1. Барановський В.М. Бережний П.В. Горбачук І.Т та ін. Загальна фізика. Лабораторний практикум. Навчальний посібник. За загальною редакцією Горбачука І.Т. К.: Вища школа, 1992. 509 с.
2. Ахиезер А.И. Общая физика. Электрические и магнитные явления: справочное пособие. Киев: Наук. думка, 1981. 472 с.
3. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм. М: Высшая школа, 1983, §48.
4. Калашников С.Г. Электричество. М: Наука, 1985, § 74.
5. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. М: Высшая школа, 1983, §§ 5,6,11.
6. Чебаненко А.П. Курс загальної фізики. Підручник, Т. 3. Електрика і магнетизм. Одесса: Астропринт, 2011. 224 с.
7. Русаков В.Ф. Электричество и магнетизм: учебное пособие. Винница: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 236 с

Лабораторна робота № 11

Вимірювання сталої часу електричного кола, яке містить опір та ємність

Мета: вивчити закон зміни напруги при розряді конденсатора, визначити сталу часу RC -кола та його опір R .

Приладдя: джерело постійної напруги (регульоване), секундомір, мультиметр, міні блоки “Ключ” та “Конденсатор”.

Теоретична частина

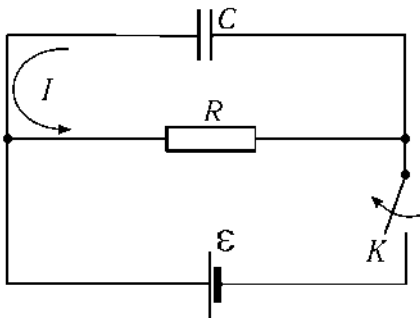


Рис. 1 Розрядження конденсатора

При зарядженні або розрядженні конденсатора, в колі (рис. 1) тече електричний струм, що змінюється. Якщо цей струм I змінюється не надто швидко і так, що в кожний момент часу величина I однакова в усіх точках контуру, то для миттєвих значень I справедливі закони постійного струму. Такі струми називаються квазістаціонарними.

Струм в контурі довжиною ℓ буде квазістаціонарним, якщо він встановлюється практично миттєво, тобто якщо час його встановлення, що дорівнює ℓ/c ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість розповсюдження електромагнітного поля, електромагнітної хвилі) набагато менший за τ – характерний для даного кола час зміни струму. У випадку зміни струму за експоненціальним законом величина τ називається сталою часу кола – час, за який струм змінюється в $e = 2.71$ раз. А у випадку електричних коливань умова квазістаціонарності струмів: $\ell/c < T$, де T – період коливань.

Метод вимірювань

У даній роботі вимірювання сталої часу RC -кола базується на вивченні процесу розрядження конденсатора через опір R . При цьому у колі (рис. 1) тече електричний струм (знак мінус вказує на процес розрядження)

$$I = -\frac{dQ}{dt}, \quad (1)$$

де Q – заряд конденсатора, пропорційний напрузі U на його обкладинках

$$Q = CU, \quad (2)$$

де C – ємність конденсатора. Згідно закону Ома квазістаціонарний струм

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3)$$

Із співвідношень (1), (2), (3), виходить диференціальне рівняння, яке описує зміну напруги конденсатора з часом t :

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{U}{RC}.$$

Розділимо в цьому рівнянні змінні та розв'яжемо його інтегруванням від початкового моменту $t = 0$ (напруга U_0) до поточного моменту t (напруга U):

$$\int_{U_0}^U \frac{dU}{U} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt.$$

В результаті отримаємо залежність напруги конденсатора від часу (рис. 2):

$$U = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \quad \text{або} \quad U = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (4)$$

де τ – стала часу кола, яке містить ємність та опір

$$\tau = RC. \quad (5)$$

Пролінеаризуємо залежність (4) шляхом логарифмування:

$$\ln U = \ln U_0 - \frac{1}{\tau} t. \quad (6)$$

Графік цієї лінійної залежності представлений на рис. 2.

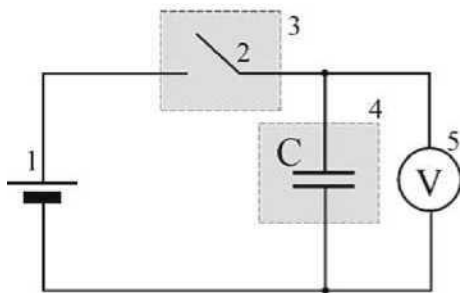


Рис. 3 Електрична схема

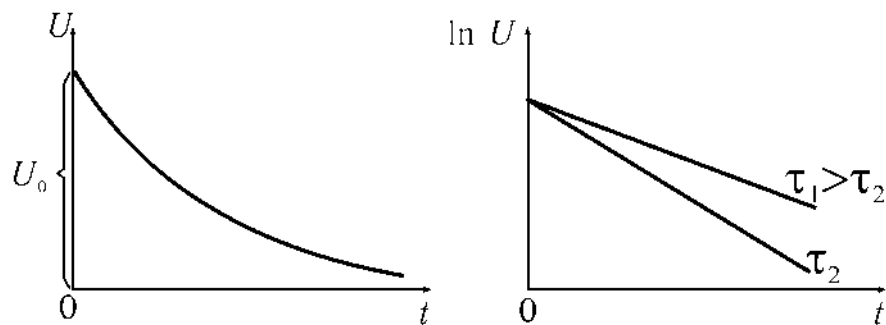


Рис. 2 Залежність напруги на конденсаторі та її натурального логарифму від часу

Опис установки

Електрична схема установки показана на рис. 3, монтажна схема – на рис. 4.

- 1 – регульоване джерело постійної напруги (0...+60В);
- 2, 3 – ключ (розрив кола);
- 4 – міні блок "Конденсатор";
- 5 – мультиметр (режим $V = 20\text{ В}$, входи COM(-), V Ω (+))

Конденсатор C заряджається до напруги U_0 від джерела постійної напруги 1. Потім ключ 2 (коло) розмикають, і конденсатор починає розряджатися через підключений до нього вольтметр 5, який має великий вхідний опір R . По вольтметру 5 можна слідкувати за поточним значенням напруги на конденсаторі, яке змінюється за встановленим вище законом (4).

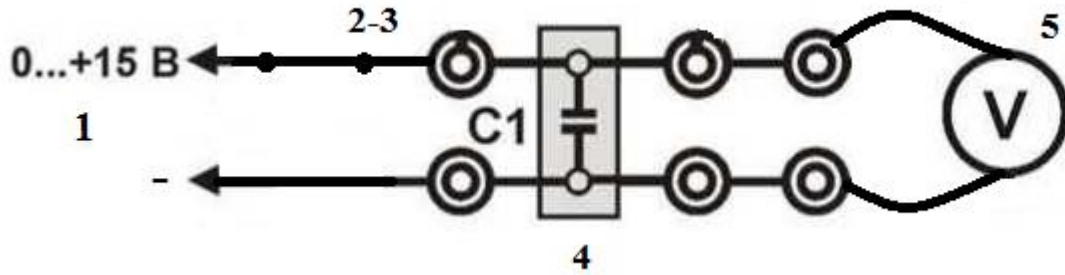


Рис. 4 Схема з'єднань елементів кола

Порядок виконання роботи

Виконання вимірювань

- 1.Зберіть електричну схему за схемою з'єднань, яка приведена на рис. 4.
- 2.Увімкніть кнопками «мережа» живлення джерела постійної напруги та мультиметр.
- 3.Ручкою установки напруги "0...60 В" (на джерелі постійної напруги) встановіть на конденсаторі напругу 10В.
- 4.Вимкніть конденсатор від регульованого джерела постійної напруги (розімкнувши коло) та по мірі розрядження конденсатора через кожні 5 секунд записуйте покази вольтметра в таблицю 1.
- 5.Під'єднайте паралельно до конденсатора C_1 другий конденсатор C_2 (натиснувши кнопку на блоці конденсаторів) та повторіть вимірювання пп.3-4 для паралельно з'єднаних конденсаторів $C_{\text{парал}}$.
- 6.Вимкніть кнопками «Мережа» живлення джерела постійної напруги та мультиметр.

Таблиця 1

$t, \text{с}$	$C_1 =$ мкФ		$C_{\text{парал}} =$ мкФ	
	$U_1, \text{В}$	$\ln U_1$	$U_{\text{парал}}, \text{В}$	$\ln U_{\text{парал}}$
0				
5				
10				
15				
20				
25				
30				
35				
40				
45				
50				

55				
----	--	--	--	--

Обробка результатів вимірювань

1. Розрахуйте та запишіть в таблицю ємність конденсатора $C_{\text{парал}}$ за формулою для паралельного з'єднання:

$$C_{\text{парал.}} = C_1 + C_2 = \dots \text{мкФ.}$$

2. На одному полі креслення побудуйте графіки залежності $U_1 = f(t)$ та $\ln U_1 = f(t)$ для конденсатора C_1 , а на другому $U_{\text{парал}} = f(t)$ та $\ln U_{\text{парал}} = f(t)$ для конденсатора $C_{\text{парал}}$, розміщуючи вісь U з лівої сторони, а вісь $\ln U$ – з правої.
3. Визначте за графіками $\ln U_1 = f(t)$ та $\ln U_{\text{парал}} = f(t)$ кутові коефіцієнти k_1 та $k_{\text{парал}}$ лінійних залежностей та сталі часу електричного кола
4. $\tau_1 = -\frac{1}{k_1}$ та $\tau_2 = -\frac{1}{k_{\text{парал}}}$ для кожного значення ємності.
5. Розрахуйте опір вольтметра R за формулою (5) для кожного значення ємності:

$$R_1 = \frac{\tau_1}{C_1} = \dots \text{Ом}, \quad R_{\text{парал.}} = \frac{\tau_2}{C_{\text{парал}}} = \dots \text{Ом.}$$

6. Оцініть відносну похибку вимірюваних величин:

$$\sigma_{R1} = \sqrt{\sigma_{C1}^2 + \sigma_{k1}^2} \cong \sigma_{k1} \quad \text{та} \quad \sigma_{R1} = \sqrt{\sigma_{C_{\text{парал}}}^2 + \sigma_{k_{\text{парал}}}^2} \cong \sigma_{k_{\text{парал}}},$$

де σ_{k1} і $\sigma_{k_{\text{парал}}}$ – похибки кутових коефіцієнтів.

7. У висновку до роботи зробіть аналіз отриманих експериментальних залежностей та оцініть точність методу визначення сталої часу.

Контрольні питання

1. Який струм називають квазістаціонарним? Сформулюйте умову квазістаціонарності електричного струму.
2. Які фізичні закони та формули застосовуються для отримання залежності напруги від часу при розрядженні конденсатора?

3. За яким законом з часом змінюються наступні величини при розрядженні конденсатора: 1) заряд обкладинки, 2) напруга конденсатора, 3) струм в RC -колі?
4. Яку величину називають сталою часу електричного кола і що вона показує?
5. Як пов'язана стала часу RC -кола з параметрами цього кола?
6. Вкажіть режим роботи мультиметра при проведенні вимірювань: вимірювана величина, режим та входи для підключення приладу.
7. Яке призначення має джерело живлення в досліджуваному електричному колі?
8. З якою метою в роботі будують графік залежності $\ln U = f(t)$?
9. Яким чином можна показати, що дослідна залежність є експоненціальною?
10. Як експериментально визначити сталу часу кола, яке містить опір R та ємність C ?
11. Яким способом в даній роботі вимірюють опір вольтметра?
12. Які формули застосовують в роботі для визначення наступних величин: а) сталої часу електричного кола, б) опір мультиметра?
13. Як оцінюють в роботі похибку визначення сталої часу?

Рекомендована література

1. Барановський В.М. Бережний П.В. Горбачук І.Т та ін. Загальна фізика. Лабораторний практикум. Навчальний посібник. За загальною редакцією Горбачука І.Т. К.: Вища школа, 1992. 509 с.
2. Трофимова, Т.И. Курс общей физики: Учеб. Пособие. М.: Высшая школа, 2006. §§ 79,84,85.
3. Ахиезер А.И. Общая физика. Электрические и магнитные явления: справочное пособие. Киев: Наук. думка, 1981. 472 с.
4. Чебаненко А.П. Курс загальної фізики. Підручник, Т. 3. Електрика і магнетизм. Одеса: Астропринт, 2011. 224 с.
5. Русаков В.Ф. Электричество и магнетизм: учебное пособие. Винница: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 236 с



Рис.5 Загальний вигляд лабораторної установки

Лабораторна робота № 12

Вимушені електричні коливання в контурі, який містить індуктивність

Мета: дослідити залежності електричного опору та індуктивності контуру від частоти змінного струму.

Приладдя: мініблок “Котушка зі з’ємним осердям”, мініблок “Опір”, генератор сигналів спеціальної форми, мультиметр, осцилограф.

Теоретична частина

Вимушені електричні коливання відбуваються в контурі під дією змінної напруги. Якщо в електричне коло, яке містить котушку з індуктивністю L , ввімкнути змінну ЕРС

$$\varepsilon = \varepsilon_m \cos \omega t ,$$

то в колі, крім ЕРС ε , буде наводитися ЕРС самоіндукції

$$\varepsilon_S = -L \frac{dI}{dt} .$$

Струм в такому контурі коливається з тією ж частотою ω , що і прикладена ЕРС, але відстає по фазі на φ :

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi) .$$

Амплітуда струму I_m пропорційна амплітуді ЕРС:

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{|Z|} , \quad (1)$$

де $|Z|$ – модуль повного опіру контуру змінного струму (імпеданс контуру)

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} , \quad (2)$$

R – активний опір кола; $|X_L| = \omega L$ – індуктивний опір кола; L – індуктивність соленоїда; $\omega = 2\pi f$ – циклічна частота змінного струму; f – частота струму.

Індуктивність характеризує властивість контуру *створювати власне потікозчеплення* та дорівнює магнітному потоку Φ_m зчепленому з контуром при одиничному струму в контурі:

$$\Phi_m = LI.$$

Індуктивність контуру залежить від його розмірів, форми та магнітної проникності середовища μ , яка оточує контур. Наприклад, величина індуктивності довгого соленоїда:

$$L = \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{\ell}, \quad (3)$$

де μ_0 – магнітна стала; N – кількість витків соленоїда; S – площа поперечного перерізу сердечника соленоїда; ℓ – довжина середньої осьової лінії сердечника.

Індуктивність соленоїда з феромагнітним сердечником залежить ще від струму I , який тече в обмотці. Це впливає з того, що магнітна проникність феромагнетиків μ залежить від напруженості магнітного поля H , яка визначається струмом в соленоїді:

$$H = \frac{IN}{\ell}.$$

Метод вимірювань

В даній роботі, вимірювання повного опору кола Z базується, згідно закону Ома (1), на вимірюваннях діючих значень змінного струму I та напруги U :

$$Z = \frac{U}{I}. \quad (4)$$

Згідно виразу (2) у випадку малої величини активного опору (як правило, $R \ll Z$) повний опір соленоїда співпадає з індуктивним опором:

$$Z = \omega L. \quad (5)$$

Це дозволяє визначити індуктивність за формулою

$$L = \frac{Z}{\omega} = \frac{1}{2\pi f} \frac{U}{I}, \quad (6)$$

вимірюючи опір котушки змінного струму відомої частоти f .

Напруга, яка вимірюється на обмотці соленоїда, у відповідності з

виразами (4) та (5) залежить від частоти змінного струму:

$$U_L = IZ = I\omega L . \quad (7)$$

Залежність $U_L = f(\omega)$, яка отримується при фіксованому значенні струму I , за формою співпадає з залежністю $Z = f(\omega)$ та є лінійною, якщо індуктивність соленоїда L постійна (не залежить від частоти). У такому випадку величину L визначають експериментально за кутовим коефіцієнтом прямої $U_L = f(\omega)$, який дорівнює $k = IL$. Згідно формули (3), це відповідає постійному значенню магнітної проникності μ , що характерно для неферомагнітних середовищ.

Для соленоїда з феромагнітним осердям (як відзначалося) індуктивність залежить від сили струму, який тече по обмотці. Вид цієї залежності можна встановити експериментально, визначаючи індуктивний опір соленоїда при різних струмах.

Таким чином, вимірюючи напругу на обмотці соленоїда при протіканні змінного струму різної частоти (при фіксованій величині діючого значення I), можна експериментально визначити індуктивність соленоїда та її частотну залежність.

Опис установки

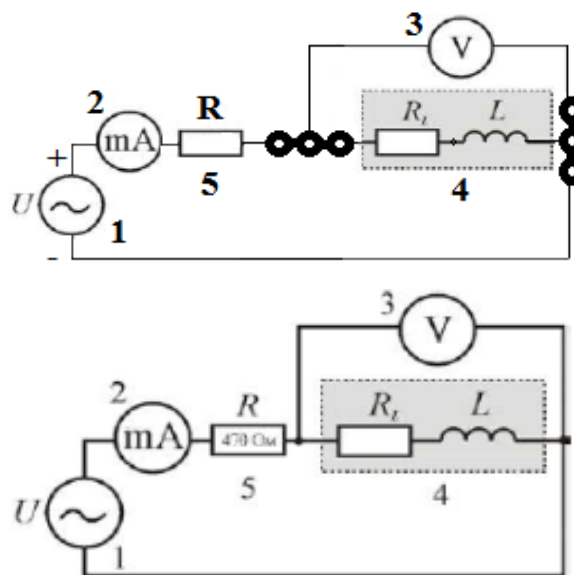


Рис.1 Монтажна та електрична схема

- 1 – генератор сигналів спеціальної форми;
- 2 – мультиметр (режим $A \sim 200 \text{ mA}$, входи COM(–), mA(+));

3 – цифровий осцилограф;

4 – котушка зі з'ємним осердям з індуктивністю L та опором R ;

5 – мініблок «Опір» ~ 470 Ом.

Котушка 4, яка має індуктивність L та опір R і мультиметр 2, з'єднані послідовно, підключають до генератора сигналів спеціальної форми 1. Напругу на котушці вимірюють цифровим осцилографом 3.

Порядок виконання роботи:

Вправа 1. Дослідження залежності повного опору Z від частоти

1. Зберіть електричне коло за схемою (рис. 1), підключивши малу котушку без осердя.
2. Увімкніть (з дозволу викладача) кнопками “Мережа” живлення генератора, осцилографа, мультиметра. Встановіть на генераторі “Сінусоїда” кнопкою “Режим”.
3. За допомогою мультиметра виміряйте опір R_L котушки та запишіть його в таблицю 1.
4. Ручкою “Частота” встановіть максимальне значення частоти 4 кГц. За допомогою ручки “Рівень” встановіть значення струму в колі в межах від 2 до 7 мА (по мультиметру 2 в режимі ~ 200 мА). При цьому фіксованому значенні струму, змінюючи частоту сигнала від 4 кГц до 0.8 кГц з кроком 200 Гц, вимірюйте та записуйте в таблицю 1 для кожного значення f напругу U_{Lm} на котушці, яке спостерігається на осцилографі (діюча напруга для розрахунків: $U_d = U_{max}/\sqrt{2}$).

Увага. По мірі зміни частоти слід підтримувати заданий струм I , регулюючи його величину ручкою “Рівень”.

5. Встановіть в котушку осердя. Проведіть вимірювання, які описані в п.4. Струм I підбирайте (див. п.4) при частоті 200 Гц. Вимірювання проводити від 200 до 40 Гц з кроком 10 Гц. Результати вимірювань запишіть в таблицю 1.
6. Вимкніть вимірювальні прилади та генератор.

Вправа 2. Дослідження залежності індуктивності соленоїда від струму

1. Для дослідження котушки без сердечника застосовується те саме електричне коло, що і у вправі 1. Для дослідження котушки з осердям застосовується електричне коло без додаткового резистора R .

2. Підключіть котушку L без осердя. Увімкніть (з дозволу викладача) кнопками “Мережа” живлення генератора сигналів та вимірювальних приладів. Ручкою установки частоти на генераторі встановіть частоту сигналу порядку 1..3 кГц.
3. Змінюючи (ручкою “Рівень” на генераторі) силу струму I від 1 mA до 16 mA з кроком $\sim 1 mA$, запишіть в табл. 2 для кожного значення струму напругу U на котушці.
4. Вимкніть прилади. Встановіть осердя в котушку L . Зберіть схему без резистора R . Увімкніть прилади кнопкою “Мережа”. Встановіть частоту $\sim 50...70$ Гц ручкою установки частоти. Проведіть вимірювання по п.3 для довільних значень струму до 50 mA ! Результати занесіть в таблицю 2.
5. Вимкніть вимірювальні прилади та генератор сигналів, обробляйте отримані результати.

Таблиця 1

Котушка $R_L =$ Ом							
без осердя				з феромагнітним осердям			
$I =$ mA				$I =$ mA			
$f, Гц$	U, B	$Z, Ом$	$L, Гн$	$f, Гц$	U, B	$Z, Ом$	$L, Гн$

Таблиця 2

Котушка без осердя				Котушка з осердям		
$f =$ $Гц$				$f =$ $Гц$		
I, mA	U, B	$Z, Ом$	$L, Гн$	U, B	$Z, Ом$	$L, Гн$

Обробка результатів вимірювань **Вправи 1**

1. Розрахуйте для котушки індуктивності без осердя, з осердям повний опір змінному струму Z за формулою (4)

$$Z = \frac{U}{I} = \dots \text{Ом}$$

та індуктивність за формулою (6)

$$L = \frac{1}{2\pi f} \frac{U}{I} = \dots \text{Гн}.$$

Результати розрахунків запишіть в табл.1.Порівнюючи R_L та Z , впевніться в справедливості наближення $R_L \ll Z$ для робочих формул (5), (6), (7). Виконайте це для обох котушок.

2. Побудуйте графіки залежностей $Z = f(\omega)$ для обох коутшок.

3. У висновку:

а) порівняйте залежності повного опору Z від частоти двох соленоїдів – з осердям та без нього;

б) відмітьте особливості залежності індуктивності від частоти для двох соленоїдів.

Обробка результатів вимірювань Вправи 2

1. Розрахуйте значення Z та L за формулами (4) та (6) для обох котушок. Результати розрахунків занесіть до табл. 2.

2. Побудуйте графіки залежності $L = f(I)$. Зробіть висновки.

Контрольні питання

1. Запишіть закон зміни струму в колі при вимушених коливаннях.
2. Чим визначається частота та амплітуда вимушених коливань?
3. Яка ЕРС викликає вимушені коливання?
- 4 .Які ЕРС діють в коливальному контурі при вимушених коливаннях? Запишіть вираз для ЕРС самоіндукції.
5. Що характеризує та від яких величин залежить індуктивність кола?
6. Від яких параметрів залежить повний опір контуру змінного струму?
7. Чим пояснюється залежність індуктивності соленоїда з осердям від частоти струму?
8. На чому базується вимірювання повного опору кола Z в даній роботі?
9. Який характер має залежність $U(\omega)$, яка отримана при фіксованому значенні струму I у випадку соленоїда без осердя?
10. Який прилад застосовується в роботі в якості джерела змінного струму?
11. З якою метою в роботі визначається активний та повний опір котушки індуктивності?
- 12 .Яким способом визначають в даній роботі індуктивність котушки з осердям та без нього? Запишіть розрахункові формули.

Рекомендована література

1. Барановський В.М. Бережний П.В. Горбачук І.Т та ін. Загальна фізика.

- Лабораторний практикум. Навчальний посібник. За загальною редакцією Горбачука І.Т. К.: Вища школа, 1992. 509 с.
2. Ахиезер А.И. Общая физика. Электрические и магнитные явления: справочное пособие. Киев: Наук. думка, 1981. 472 с.
 3. Детлаф А.А. Яворский Б.М. Курс физики М.: Высшая школа, 1989. §§25,28.
 4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Электричество. М.: Наука, 1983. Т. 3. 688 с.
 5. Чебаненко А.П. Курс загальної фізики. Підручник, Т. 3. Електрика і магнетизм. Одесса: Астропринт, 2011. 224 с.
 6. Русаков В.Ф. Электричество и магнетизм: учебное пособие. Винница: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 236 с

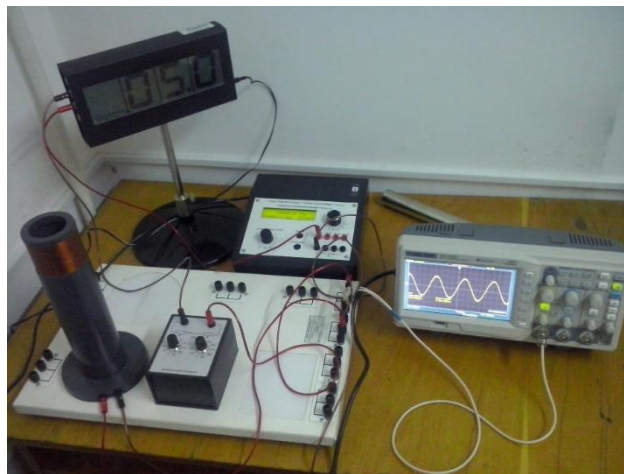


Рис.2 Загальний вигляд установки

ОПТИКА

Лабораторна робота № 1

Вимірювання фокусних відстаней лінз і моделювання оптичних приладів

Мета роботи: Побудова зображення предметів за допомогою оптичної системи. Моделювання складних оптичних систем.

Приладдя: Оптична лава з набором рейтерів, позитивні лінзи №: 5,6 негативна лінза №13, екран з сіткою координат, освітлювач з матовим склом-сіткою.

Теоретична частина

Одним з основних понять в оптиці є поняття оптичного променя як прямої лінії, яка бере свій початок від джерела світла, вона вважається нескінченно тонкою, а довжина хвилі - нескінченно малою. Розрахунок ходу променів через межу різних середовищ здійснюється за законами геометрії з урахуванням законів заломлення і відбиття оптичних променів, звідси і назва «геометрична оптика», в цьому випадку немає необхідності в знаннях природи світла. У геометричній оптиці вивчаються ідеальні оптичні системи, для яких виконані дві умови: 1) гомоцентричність, тобто будь-який світловий пучок, що виходить з однієї точки, знову збирається в точку після проходження системи; 2) зображення, отримане системою, геометрично подібне предмету, тобто немає спотворень форми предмета. Однак, в дійсності спотворення форми предмета існують, для їх пояснення і усунення необхідно враховувати природу світла. Ця частина оптики, де виникає необхідність врахування природи світла як електромагнітних хвиль, отримала назву фізичної оптики з її законами (закони Бугера, Планка, Стефана - Больцмана, Віна та інших) і явищами (інтерференція, поляризація, $\lambda(n)$ і т. ін.).

Основні закони геометричної оптики

Експериментально відкриті такі закони геометричної оптики:

- в однорідному середовищі світловий промінь поширюється прямолінійно;
- закон оборотності ходу променів – промінь, спрямований в зворотньому напрямку, проходить по тому ж шляху, що і прямий промінь;
- незалежність світлових променів;
- закон заломлення променя при перетині межі двох середовищ з показниками заломлення n_1 і n_2 : падаючий і заломлений промені лежать в

одній площині з перпендикуляром, встановленим до межі поділу в точці падіння променя, а кут падіння φ_1 і заломлення φ_2 задовольняють рівняння $\sin \varphi_1 \cdot n_1 = \sin \varphi_2 \cdot n_2$, де кути відраховуються від перпендикуляра;

– закон відбиття світла – падаючий і відбитий промені лежать в одній площині, а кут падіння дорівнює куту відбиття.

Лінзи використовуються для отримання зображення предмета, зміни напрямку ходу променя для концентрації енергії випромінювання. Нагадаємо основні характеристики тонких (ідеальних) збираючих лінз. Лінія, яка проходить через центри кривини поверхонь лінзи, називається головною оптичною віссю, а точка перетину оптичної осі з лінзою називається оптичним центром лінзи. Промені, які проходять через оптичний центр, не заломлюються. Промені, паралельні оптичній осі, перетинаються в одній точці на оптичній осі двоопуклої лінзи, ця точка називається фокусом лінзи, а відстань між фокусом і оптичним центром називається фокусною відстанню, вона традиційно позначається літерою f . Промені, що поширюються під кутом до оптичної осі, перетинаються в точці, що *лежить у фокальній площині*. Ця площина проходить через фокус і перпендикулярна оптичній осі. Промінь "С", який проходить через оптичний центр лінзи, паралельний падаючому променю «М» називається побічним променем. Він використовується для визначення ходу променів, що падають під кутом до оптичної осі. Тонкою лінзою називається така лінза, у якій відстань між поверхнями, які обмежують її, значно менше фокусної відстані f .

Розглянемо будову деяких найпростіших оптичних приладів, в яких використані лінзи.

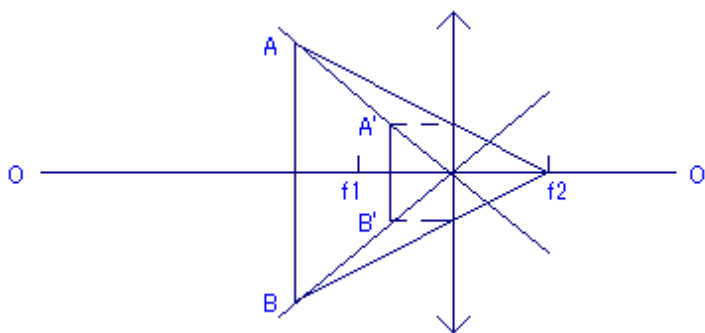


Рис. 1. Хід променів у лупі

1. Лупа (рис.1) – збираюча лінза з короткою фокусною відстанню, яка використовується для зображення предмета прямим і збільшеним. Збільшення лупи γ дорівнює відношенню розмірів зображення AB і предмета $A'B'$, що приблизно

дорівнює відношенню відстані найкращого зору L до фокусної відстані лінзи f .

$$\gamma = \frac{AB}{A'B'} \approx \frac{L}{f},$$

де $L \approx 25$ см, при $f = 1, 2 \dots 5$ см, $\gamma \approx 20 \dots 4$.

2. Зорова труба Кеплера (рис.2) – це оптична система, що складається з двох збираючих лінз – об'єктива L_1 і окуляра L_2 . Зазвичай (при спостереженні нескінченно віддалених предметів) зорова труба налаштовується так, щоб задній фокус об'єктива збігався з переднім фокусом окуляра. У цьому випадку будь-який паралельний пучок, що входить в об'єктив, вийде з окуляра також у вигляді паралельного пучка. Така оптична система називається телескопічною. Збільшення γ зорової труби Кеплера називають відношенням, яке дорівнює

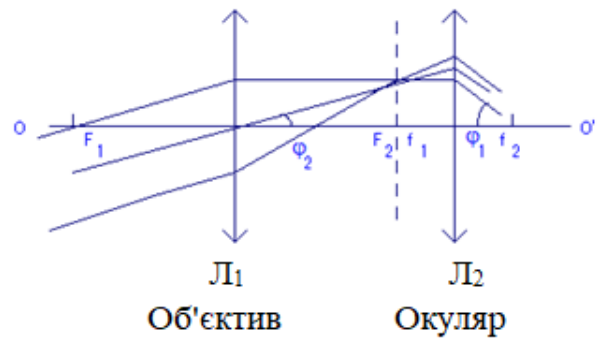


Рис. 2. Хід променів у зоровій трубі Кеплера

$$\gamma = \frac{tg\varphi_1}{tg\varphi_2}, \quad (1)$$

де φ_1 і φ_2 кути, утворені паралельним пучком, який входить і виходить паралельним пучком з головною оптичною віссю (рис.2). Пропонується самостійно показати, що

$$\gamma = \frac{f_1}{f_2}, \quad (2)$$

де f_1 і f_2 фокусні відстані об'єктива і окуляра. Видно, що для великого збільшення потрібно, щоб об'єктив був довгофокусним, а окуляр – короткофокусним. З рис.2 видно, що в зоровій трубі Кеплера зображення буде перевернутим.

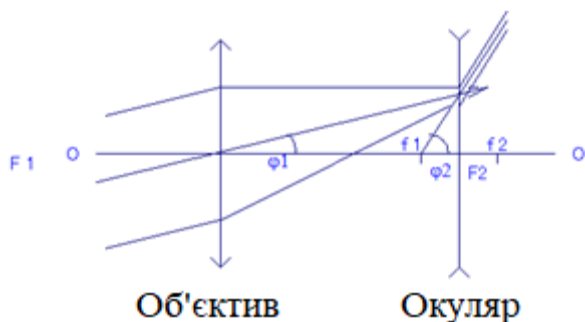


Рис. 3. Хід променів у зоровій трубі Галілея

3. Зорова труба Галілея (рис. 3) – це оптична система, у якій окуляр є розсіюючою лінзою. Якщо фокуси об'єктива і окуляра збігаються, то труба Галілея також є телескопічною.

Збільшення зорової труби Галілея таке ж, як і труби Кеплера. На відміну від труби Кеплера, труба

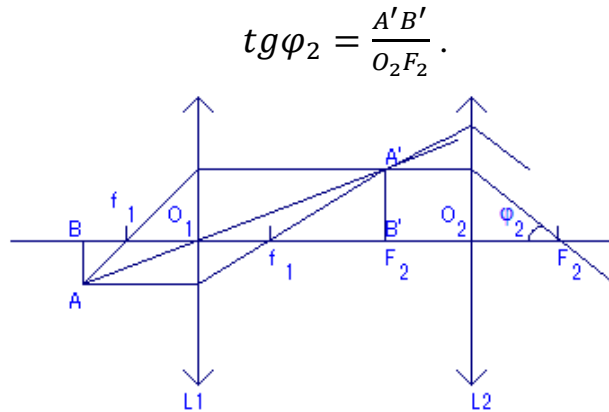


Рис. 4 Хід променів у мікроскопі

де O_2F_2 - фокусна відстань окуляра. Самостійно показати, що

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{AB \cdot F_2 O_1}{F_2 O_2 \cdot BO_1}. \quad (3)$$

Збільшенням мікроскопа називають відношення $\gamma = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1}$, де φ_1 – кут, під яким предмет AB видно неозброєним оком з відстані найкращого зору ($L = 25$ см); Тоді

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{AB}{L}.$$

Якщо ввести довжину тубуса мікроскопа як відстань ℓ між об'єктивом і окуляром $\ell = O_1O_2 = O_1F_2 + O_2F_2$ то, використовуючи формулу лінзи

$$\frac{1}{O_1B} + \frac{1}{O_1F_2} = \frac{1}{f},$$

отримаємо такий вираз для коефіцієнта збільшення:

$$\gamma = \frac{L(\ell - f_1 - F_2)}{f_1 F_2}. \quad (4)$$

В даному наближенні враховано, що обидві лінзи - короткофокусні.

Хід роботи

Центрування лінз. Перед виконанням вправ необхідно центрувати систему. Мета центрування – розташувати оптичні елементи (джерело світла, лінзи, екран) по висоті так, щоб пучок світла від освітлювача зміг

пройти всі лінзи і досягти екрану. Центрування починають з того, що рейтер з екраном присувають впритул до віконця освітлювача і регулюють висоту екрану так, щоб центр світлової плями збігався з центром екрана. Після цього відсувають екран на відстань близько 1 м і між ним і освітлювачем поміщають збираючу лінзу, яка досліджується. Пересуваючи рейтер з лінзою, отримують на екрані зображення сітки освітлювача. Після цього регулюють висоту лінзи так, щоб центр зображення сітки збігався з центром екрана. Описаним способом необхідно від'юстувати всі збираючі лінзи, які використовуються в роботі. Для юстування негативних лінз, встановлюють рейтер із вже від'юстованою позитивною лінзою, рейтер з негативною лінзою поміщають між екраном і позитивною лінзою. Переміщаючи їх уздовж оптичної лави, намагаються отримати зображення на екрані сітки освітлювача. Після цього регулюють висоту негативною лінзи.

Вправа 1.

Визначення фокусної відстані збиральної лінзи

1. Для визначення фокусної відстані збиральної лінзи встановити прилади на оптичній лаві згідно рис. 5 Предметом служить сітка на матовому склі освітлювача.

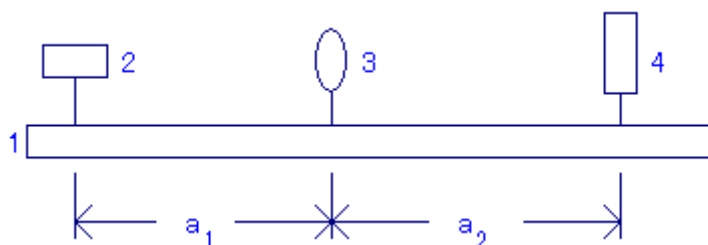


Рис. 5. Розташування оптичних елементів

1 – оптична лавка, 2 – освітлювач, 3 – лінза, 4 – екран.

2. Переміщаючи екран, отримати чітке зображення предмета на ньому. Виміряти відстані a_1 і a_2 за допомогою лінійки на оптичній лаві.

3. Повторити вимірювання п'ять разів, змінюючи відстань a_1 . Рекомендується отримувати як збільшені, так і зменшені зображення на екрані.

4. Підставити знайдені значення a_1 і a_2 у формулу лінзи $\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} = \frac{1}{f}$ і розрахувати фокусну відстань лінзи.

5. Знайти середнє значення фокусної відстані лінзи \bar{f} .

6. Розрахувати похибку як для прямих вимірювань.

7. Знайти відносну похибку вимірювань. Результат представити у вигляді:

$$f = \overline{f} \pm \sigma_f.$$

Вправа 2

Визначення фокусної відстані збиральної лінзи методом Бесселя

Оптична схема визначення фокусної відстані позитивної лінзи методом Бесселя показана на рис.6.

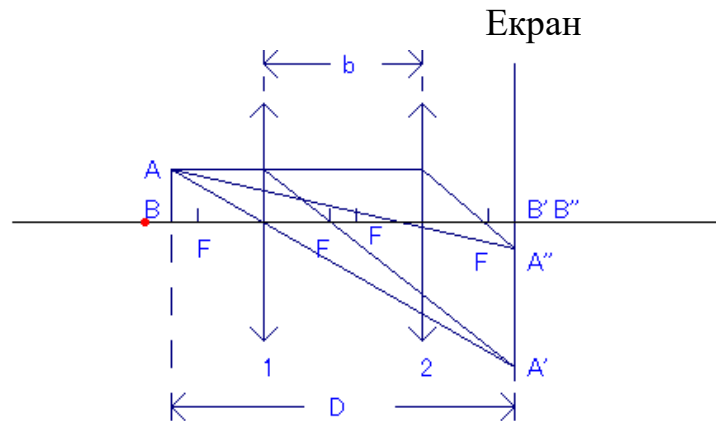


Рис. 6. Хід променів у схемі метода Бесселя

1. Встановлюють освітлювач і екран на протилежних кінцях оптичної лави.
2. Розташувати лінзу на оптичній лаві так, щоб на екрані вийшло чітке збільшене зображення предмета. Предметом як і раніше служить сітка на матовому склі освітлювача (AB).
3. Визначити положення лінзи X_1 на лаві і виміряти відстань D від сітки освітлювача до екрану.
4. Не змінюючи положення предмета і екрана, перемістити лінзу ближче до екрану так, щоб на екрані вийшло чітке зменшене зображення предмета (сітка освітлювача). Визначити нове положення лінзи X_2 і виміряти відстань між цими двома положеннями лінзи $X_1 - X_2 = b$.
5. Повторити вимірювання п'ять разів, змінюючи відстань між освітлювачем і екраном (при цьому, пам'ятаючи, що $D > 4F$).
6. Розрахувати фокусну відстань лінзи за формулою: $F_i = \frac{D^2 - b_i^2}{4D}$.
7. Знайти середнє значення фокусної відстані лінзи \overline{F} .
8. Розрахувати похибку як для прямих вимірювань.
9. Знайти відносну похибку вимірювань. Результат представити як $F = \overline{F} \pm \sigma_F$. Порівняти отриманий результат з отриманим у вправі 1.

Вправа 3

Визначення фокусної відстані тонкої негативної лінзи

Фокусну відстань негативної лінзи не можна визначити безпосередньо, маючи лише освітлювач і лінзу, оскільки негативна лінза не може дати дійсного зображення сама по собі. Тому для визначення фокусної відстані негативної лінзи використовується допоміжна позитивна лінза (рис.7). Ідея методу полягає в наступному: нехай світло від джерела S збирається позитивною лінзою L_1 в точці S' , яка збігається з фокусом негативної лінзи L_2 . У цьому випадку, очевидно, на виході з L_2 буде паралельний пучок променів. Якщо розглядати цей пучок через зорову трубу T , встановлену на нескінченність, то ми побачимо чітке зображення предмета S (сітки освітлювача). Завдання, отже, зводиться до вимірювання відстані між лінзою L_2 і зображенням предмета S' , яке і буде фокусною відстанню негативної лінзи.

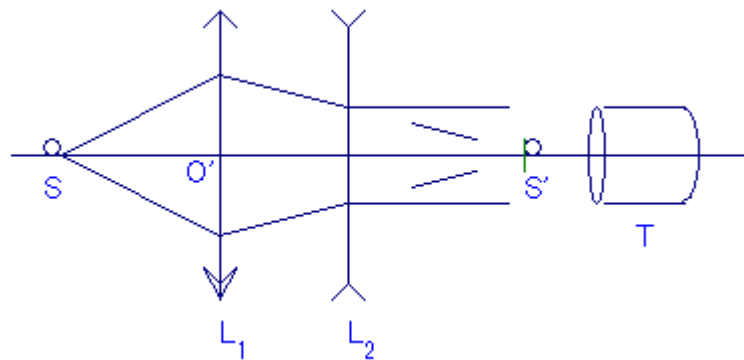


Рис. 7. Схема вимірювання фокусної відстані негативної лінзи

Збирають схему згідно рис.7, причому в якості S використовують сітку освітлювача, як L_1 – лінзу 5, в якості L_2 – досліджувану лінзу №13, а в якості T – екран. Вибирають таке положення лінз L_1 і L_2 , при яких видно чітке зображення сітки освітлювача S на екрані. Записують положення рейтера негативної лінзи L_2 . Потім прибирають з лави лінзу L_2 (не чіпаючи лінзи L_1), переміщаючи екран, намагаються отримати чітке зображення сітки освітлювача. Фіксують положення рейтера екрану. Різниця показів рейтера екрану і рейтера негативної лінзи і є фокусна відстань розсіюючої лінзи. Дослід необхідно виконати не менше трьох разів для різних положень лінз L_1 і L_2 відносно джерела S . Знайти середнє значення фокусної відстані негативної лінзи.

Вправа 4

Моделювання мікроскопа

В якості моделі мікроскопа використовують лінзи №5 і №6. На початку визначають фокусні відстані цих лінз за допомогою екрану. Потім встановлюють лінзу №5 (яка служить об'єктивом мікроскопа), так щоб її

відстань від сітки освітлювача була трохи більше її фокусної відстані. Отримують на екрані зображення сітки освітлювача. Потім замінюють екран лінзою-окуляром №6. Чіткість зображення регулюють переміщенням лінзи – окуляру уздовж оптичної лави. Розраховують збільшення мікроскопа за формулою:

$$\gamma = \frac{L(\ell - f_6 - f_5)}{f_6 f_5}$$

де $L = 25\text{см}$ – відстань найкращого зору, f_5 і f_6 – фокусні відстані лінз №5 і №6, ℓ – довжина тубуса мікроскопа, яка визначається як різниця показів рейтерів лінз №6 і №6.

Контрольні питання

1. Що називається ідеальною оптичною системою?
2. Як побудувати зображення, яке дається складною оптичною системою?
3. Вивести формули (1) і (2).
4. Вивести формулу (3).
5. Що називається збільшенням мікроскопа?
6. У чому перевага методу Бесселя для визначення фокусної відстані збиральної лінзи?
7. Показати, що якщо відстань між предметом і екраном перевищує $4f$, то зображення на екрані може бути отримано при двох різних положеннях лінзи.
8. Виведіть формулу (4) і оцініть можливість наближення, зробленого в ній.
9. Чим відрізняються зорові труби Кеплера і Галілея?
10. У чому перевага галілеївої труби?

Рекомендована література

1. Бордун О.М. Лах Х.Г. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з оптики. Вища школа. Львів. 2002. 35 с.
2. Гольдин Л.Л. Лабораторные занятия по физике. М.: Наука, 1983. 704 с.
3. Иверонова В.И. Физический практикум. Электричество и оптика. М.: Наука, 1968. 815 с.
4. Царенко О.М. Сальник І.В. Сірик Е.Л. Сазонова О.О. Лабораторний практикум з курсу загальної фізики. Час.4.Оптика. Кропивн. 2015. 86 с.
5. Мамалуй Ю.А., Сойка Е.Н. Лекции по оптике. Донецк: ДонГУ, 1998. 87 с.

Лабораторна робота № 2

Вивчення явища інтерференції за допомогою біпризми Френеля

Мета роботи: Визначення довжини світлової хвилі і вивчення інтерференційної схеми з біпризмою Френеля.

Приладдя: Лазер, короткофокусна лінза, регульована щілина, біпризма Френеля, екран. Загальний вигляд установки показано на рис. 4.

Опис схеми отримання інтерференції двох монохроматичних хвиль з біпризмою Френеля.

Біпризма Френеля використовується для поділу світлового променя на дві когерентні хвилі з різними фазами (за рахунок різної довжини шляху), які складаючись, створюють інтерференційну картину (сукупність світлих і темних смуг). Вихідним джерелом світла служить мале (точкове) монохроматичне джерело S (рис.1).

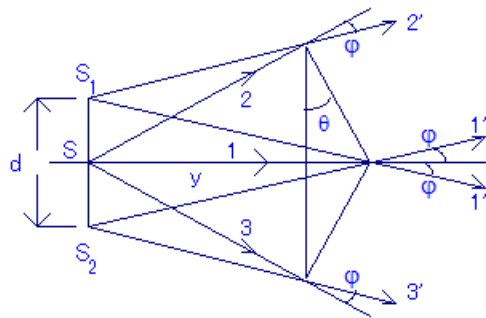


Рис. 1. Хід променів у лінзі Френеля

Розглянемо три промені 1,2,3, які виходять від джерела S . Промінь 1, потрапляючи на стик двох граней біпризми Френеля, розщеплюється на два промені $1'$ і $1''$ (від кожної грані) під кутом $\varphi = (n - 1)\theta$, а промені 2 і 3 заломлюються і дають промені $2'$ і $3'$. Як видно з рисунку, всі промені розходяться, тому вони дають два уявні джерела світла S_1 і S_2 . Відстань між цими уявними джерелами, як видно з рисунку №1 в основному залежить від відстані між джерелом S і призмою і дорівнює:

$$d = S_1 S_2 = 2y \sin \varphi = 2y(n - 1)\theta. \quad (1)$$

Для зручності побудови інтерференційної картини можна розглядати додавання монохроматичних хвиль від цих уявних джерел.

Пучки від цих двох уявних джерел частково перекриваються, утворюючи зону інтерференції з кутовою шириною 2φ , яка називається апертурою пучків, що перекриваються (рис.1), тобто в основному інтерферують хвилі, які поширюються в центрі (поблизу променя 1). Інтерференційна картина спостерігається на екрані у вигляді інтерференційних смуг – максимумів і мінімумів інтенсивності. Відстань між сусідніми максимумами (мінімумами) називається шириною інтерференційної смуги Δx . Результат додавання коливань, які прийшли від двох когерентних джерел в довільну точку на екрані M (рис.2), залежить від різниці ходу $\Delta = r_2 - r_1$.

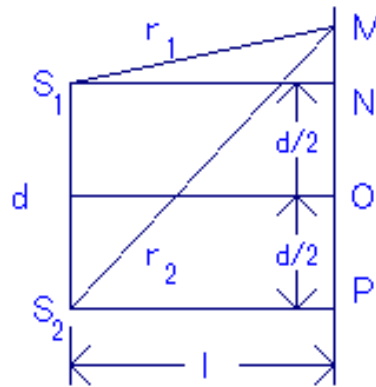


Рис.2. Схема складання двох променів, які вийшли з біпризми Френеля

На рис. 2 не показана біпризма Френеля. Електромагнітні хвилі, які виходять з точок S_1 і S_2 запишемо так:

$S_1 = a \cos(\omega t - kr_1)$, $S_2 = a \cos(\omega t - kr_2)$. Тоді результуюча хвиля буде дорівнювати

$$S = S_1 + S_2 = (2a \cos k(r_2 - r_1)/2) \cos \left(\omega t - \frac{k(r_2 + r_1)}{2} \right) = A \cos(\omega t - kr);$$

де $A = 2a \cos k\Delta/2$, $\Delta = r_2 - r_1$.

Інтенсивність хвилі пропорційна квадрату амплітуди хвилі

$$I \approx A^2 \approx 4a^2 \cos^2 \frac{k\Delta}{2}.$$

При $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ і $\Delta = \pm 2m\lambda$ інтенсивність хвиль буде максимальною $I = I_{\max}$, а при $\Delta = \pm (2m+1)\lambda/2$ – мінімальною, де m – будь-яке ціле число, яке визначає порядок інтерференції. В точці O (рис.2) різниця ходу $\Delta = 0$, тобто $I = I_{\max}$. Для визначення різниці ходу Δ вважаємо, що в точці M спостерігається

наступний максимум. Значить, різниця ходу для променів від джерел S_1 і S_2 , що потрапляють в т. M , кратно цілій довжині хвилі $\Delta = \lambda$. Розраховуємо різницю ходу (дивись рис. 2).

$$\Delta = r_2 - r_1 = \sqrt{\ell^2 + \left(\Delta x + \frac{d}{2}\right)^2} - \sqrt{\ell^2 + \left(\Delta x - \frac{d}{2}\right)^2},$$

де d - відстань між уявними джерелами випромінювання, $\Delta x = OM$, ℓ - відстань від джерела до зображення на екрані. Оскільки $d \ll \ell$, то

$$\sqrt{\ell^2 + \left(\Delta x + \frac{d}{2}\right)^2} \approx \ell \left(1 + \frac{\left(\Delta x + \frac{d}{2}\right)^2}{2\ell^2}\right), \text{ тоді}$$

$$\Delta = \lambda = \frac{d\Delta x}{\ell}. \quad (2)$$

Звідси легко знайти Δx , або, знаючи d , Δx , ℓ , визначити λ .

Опис установки

Всі деталі установки встановлюються на оптичній лаві, яка забезпечена відліковою лінійкою (рис.3), де БПФ – біпризма Френеля, δx - ширина смуги інтерференції.

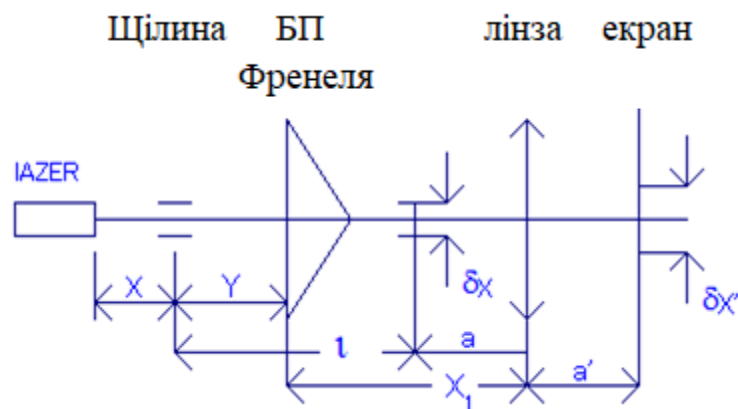


Рис. 3. Схема для вимірюваних величин

На одному краю лави закріплюється He-Ne лазер, який дає паралельні пучки світла. Для отримання серії точкових джерел використовується регульована щілина. Далі на лаві розташовується БП Френеля із заломлюючим кутом $\theta = 4.4 \cdot 10^{-3}$ рад, зроблена зі скла К-8 з показником заломлення $n = 1,5183$. Оскільки отримана інтерференційна картина дуже дрібна, що не

дозволяє з достатньою точністю визначити $\Delta x/2$ (на рисунку позначено δx), то для отримання збільшеного зображення, на лаві розташовується короткофокусна лінза з фокусною відстанню $f = 35\text{мм}$. На екрані виходить збільшене зображення інтерференційної картини з шириною смуги $\delta x'$. Из рис.3 видно, що:

$$l = x_1 + y - a \quad (3)$$

де l – відстань між джерелом (РЩ) і інтерференційною картиною δx . Відстань a від лінзи до інтерференційної смуги шириною δx , можна розрахувати за формулою лінзи:

$$a = \frac{a'f}{a' - f}, \quad (4)$$

де a' – відстань від лінзи до зображення, f – фокусна відстань лінзи. Збільшення $\delta x'$ (зображення) лінзою шириною δx (предмет) можна знайти з ходу променів лінзи:

$$\delta x = \delta x' \frac{f}{a' - f}. \quad (5)$$

Для знаходження відстані між сусідніми максимумами Δz потрібно порахувати число інтерференційних максимумів N на екрані, які поміщуються на 2–3 см довжини екрану $\delta x'$ поділити на N :

$$\Delta z = \frac{\delta x'}{N}$$

Хід роботи

Визначення довжини хвилі лазера

1. Провести налагодження установки так, щоб відстань від вихідного вікна лазера до площини щілини була 5–10 см. Біпризма Френеля встановлюється на відстані 20–30 см від щілини так, щоб ребро її тупого кута було паралельно щілині і на одній оптичній осі. За біпризмою на відстані 50–70 см встановлюється лінза, а на краю лави екран. Центрують і налаштовують зібрану оптичну систему так, щоб промінь лазера потрапляв на щілину, грань призми і центр лінзи. Переміщуючи лінзу і біпризму отримують чітку інтерференційну картину вертикальних смуг. Після проведення вимірювань змінюють положення лінзи і біпризми і намагаються отримати нову виразну інтерференційну картину. На екрані була чітко видна інтерференційна картина з декількох смуг, розташованих симетрично відносно хрестовини шкали. Загальна ширина інтерференційної картини повинна бути не менше 4–6 см.

2. Виміряти ширину однієї смуги інтерференції Δz , взявши значення ширини декількох смуг ($\delta x'$) і поділивши її на число смуг (максимумів) (N).

3. Розрахувати за допомогою лінійки на оптичній лаві відстань a' від лінзи до зображення.

4. Розрахувати за даними на лінійці оптичної лави відстань від лінзи до біпризми БПФ і від біпризми до щілини (РЩ).
5. За формулами (4) і (5) розрахувати a і $\delta x'$.
6. За формулою (1) розрахувати відстань між уявними джерелами d . Необхідне для розрахунку значення u визначається безпосередньо лінійкою, n і θ дано.
7. Знайти l за формулою (3).
8. За формулою (2) обчислити довжину світлової хвилі. Порівняти отримане значення з табличним для He–Ne лазера, яке становить 633 нм.
9. Оцінити похибку вимірювання і основні джерела помилок.

Контрольні питання

1. Які умови максимуму і мінімуму інтерференції?
2. Як визначити відстань m -ної смуги від центральної?
3. Як визначити відстань між уявними джерелами?
4. Вивести формулу для розрахунку довжини хвилі.
5. Що таке кутова ширина зони інтерференції і як її визначити?
6. Чим визначається максимально можливе число смуг інтерференційної картини під час досліду з лазерним джерелом?
7. До чого призведе зміна коефіцієнта заломлення БП.

Рекомендована літератур

1. Бордун О.М. Лах Х.Г. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з оптики. Вища школа. Львів. 2002. 35 с.
2. Бутиков Е.И. Оптика. - М.: Высш.шк., 1986. 512 с
3. Мамалуй Ю.А., Сойка Е.Н. Лекции по оптике. Донецк: ДонГУ, 1998. 87 с.
4. Лабораторні роботи для студентів спеціальностей ФІА та МФ.
<https://elizlabs.com.ua>.
5. Загальна фізика. Лабораторний практикум. За редакцією Горбачук І.Т. К.:Вища школа.1992. 509 с.

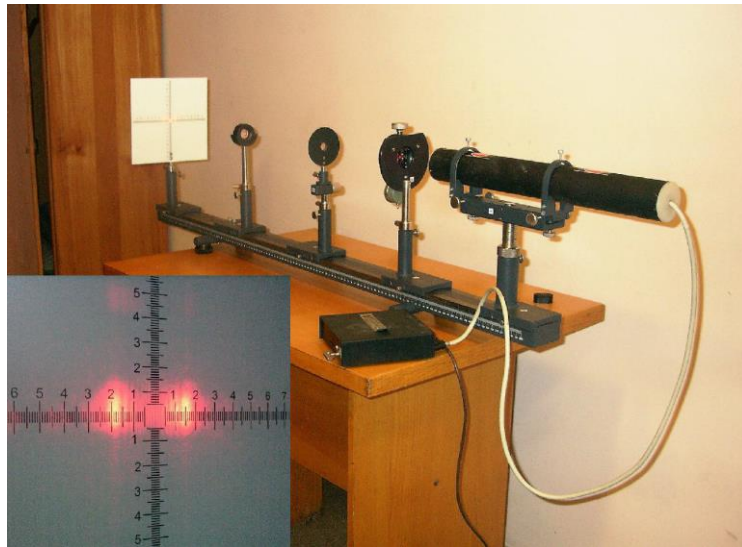


Рис.4 Загальний вигляд лабораторної установки

Лабораторна робота № 3

Визначення радіуса кривини лінзи за кільцями Ньютона

Мета роботи: Ознайомлення з методом вимірювання радіуса кривини сферичних поверхонь (метод кілець Ньютона).

Приладдя: Вимірювальний мікроскоп, плоско-опукла лінза з пластиною, ртутна лампа.

Вимірювання радіусів кривини сферичних поверхонь і перевірка їх форми – важлива і обов'язкова контрольна операція при виготовленні оптичних деталей. Відхилення поверхонь від заданої кривини призводить до спотворення зображення. У лабораторній практиці для вимірювання радіусів кривини сферичних поверхонь використовують метод кілець Ньютона. Метод заснований на інтерференції монохроматичних променів на клині, в результаті якої виходить інтерференційна картина, яка називається смугами рівної товщини. Розглянемо умови інтерференції на клині. З рис.1 видно, що в точці Р відбувається інтерференція двох хвиль I' і I'' , оптична різниця ходу між якими визначається геометричною різницею ходу: $(BC+CA)n - BD$, і стрибком фази на π для хвилі, відбитої від поверхні середовища більш оптично густішого (якщо клин скляний, то це хвиля I'). Тоді різниця ходу променів I' і I'' $\Delta = (BC+CA)n - (BD - \lambda/2)$. Врахуємо, що $BC \approx CA$, оскільки кут клина дуже малий. Тоді $BC = \frac{KC}{\cos\beta} = \frac{h}{\cos\beta}$, де h – товщина клина. Враховуючи, що одним середовищем є повітря з $n \approx 1$, то із закону заломлення випливає $\cos\beta = \frac{1}{n} \sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}$. Через малість кута клина кут $\gamma \approx \beta$. Тоді різниця ходу інтерферуючих променів дорівнюватиме:

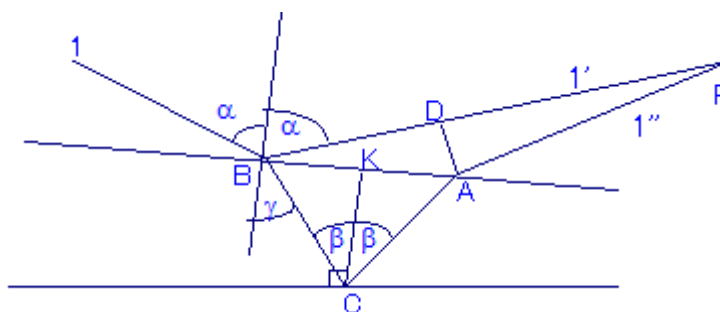


Рис. 1.

$$\Delta = \frac{2hn^2}{\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}} - BD + \frac{\lambda}{2}$$

З рисунку випливає, що $BD = BA \cdot \cos(90 - \alpha) = BA \cdot \sin \alpha = (BK + KA) \cdot \sin \alpha = (BC + CA) \cdot \sin \beta \cdot \sin \alpha = \frac{2h \sin \beta \cdot \sin \alpha}{\cos \beta}$. Після підстановки в формулу для Δ величини BD отримаємо вираз для різниці ходу променів I' і I'' :

$$\Delta = 2 \cdot h \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} + \frac{\lambda}{2}. \quad (1)$$

Умова максимуму інтенсивності в точці P , виходить з умови, що на Δ укладатиметься парне число напівхвиль: $\Delta = 2m(\lambda/2)$, де $m = 0, 1, 2$. Тоді отримаємо

$$2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = (2n - 1)\frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

Умова мінімуму інтенсивності - на різниці ходу променів Δ укладається непарне число півхвиль: $\Delta = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}$.

Звідси
$$2h\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} = 2m\frac{\lambda}{2} \quad (3)$$

З отриманих формул видно, що при паралельному пучку монохроматичного світла і незмінних λ і α , умови (2) і (3) виконуються при певних значеннях h . Отримані інтерференційні лінії є лініями рівної товщини.

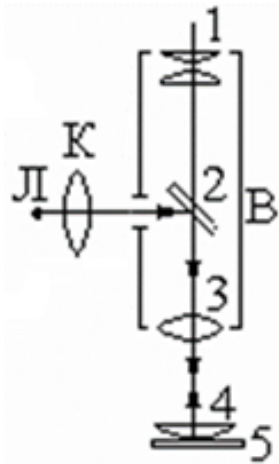


Рис.2. Схема досліду

Для спостереження кілець Ньютона використовується схема, наведена на рис.2.

Установка складається з мікроскопа B , у якого знятий один з окулярів і встановлена лампа освітлення для отримання кілець Ньютона. Окулярний мікромір забезпечений шкалою, яку видно одночасно з кільцями Ньютона. Ціна поділки шкали мікромітра складає 0.1 мм. Щоб визначити наближені розміри об'єкта (лінійні розміри і площу) потрібно користуватися перевідною таблицею 1, для відповідного збільшення, при якому проводяться вимірювання. Між окулярним мікрометром і об'єктивом 3 поміщений опак-ілюмінатор 2, тому що вимірювання проводяться у відбитому світлі. Опак-ілюмінатор є невеликою трубкою з боковим вікном, через яке проходить світло. В середині трубки, перед вікном, знаходиться напівпропускна скляна пластинка, яка за допомогою спеціальних гвинтів встановлюється під кутом 45° до осі мікроскопа. Опак-ілюмінатор освітлюється монохроматичним світлом. Для

цього необхідно джерело світла з лінійчатим спектром (в нашому випадку - ртутна лампа Л), конденсорна лінза К. Промені, що виходять з опакілюмінатора, утворюють паралельний пучок світла, який падає нормально на лінзу 4, а потім на плоскопаралельну пластинку 5. Клин, на якому відбувається інтерференція променів, утворений повітряним прошарком між лінзою 4 і пластинкою 5. При спостереженні за допомогою мікроскопа, в полі зору видно чергування темних і світлих кілець, що мають темний центр (рис.3).

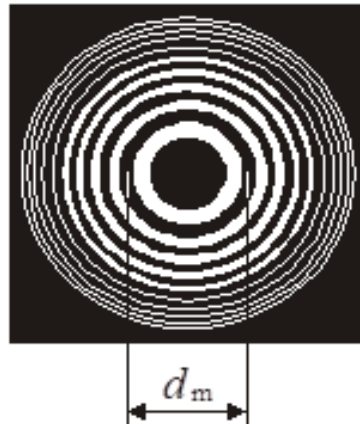


Рис.3. Кільця Ньютона

З (1) ясно, що при $\alpha = 0$, $n = 1$ різниця ходу дорівнює:

$$\Delta = 2h + \lambda/2. \quad (4)$$

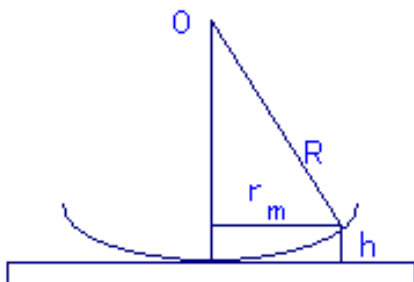


Рис. 4.

З геометричних міркувань (рис.4) можна отримати, що радіус m -го інтерференційного кільця пов'язаний з радіусом кривини лінзи R і товщиною клина h наступним чином:

$$R = \frac{r_m^2}{2h} + \frac{h}{2}.$$

Оскільки $R \gg h$, то $R = \frac{r_m^2}{2h}$. Тоді для темних кілець Ньютона (мінімум інтенсивності при $\Delta = (2m + 1) \cdot \lambda/2$ отримаємо $2h = m\lambda$, і підставляючи $h = \frac{r_m^2}{2R}$, знайдемо радіус m -го темного кільця:

$$r_m = \sqrt{mR\lambda}. \quad (5)$$

У цих формулах h – товщина клина, при якій задовольняються умови мінімуму і максимуму інтерференції. Зокрема, при $m = 0$, $r_m = 0$ (темна

центральна пляма). Чим більше m , тим менше відмінність між радіусами сусідніх кілець (r_{m+1} і r_m), тобто ближче один до одного кілець. На практиці вимірювання радіусів кілець починають з четвертого – п'ятого кільця. З формули (5) можна визначити R (або λ), але, оскільки внаслідок пружної деформації скла неможливо добитися ідеального зіткнення сферичної лінзи і плоскої пластинки в одній точці, то більш коректний результат вийде, якщо обчислювати R (або λ) за різницею радіусів

двох кілець r_m і r_n . Остаточна формула буде мати такий вигляд: $R = \frac{r_m^2 - r_n^2}{(m-n)\lambda}$,

для

розрахунків цей вираз зручніше переписати так:

$$R = \frac{(d_m - d_n)(d_m + d_n)}{4(m-n)\lambda}, \quad (6)$$

де d_m і d_n – діаметри кілець, m і n – відповідні їм номери кілець.

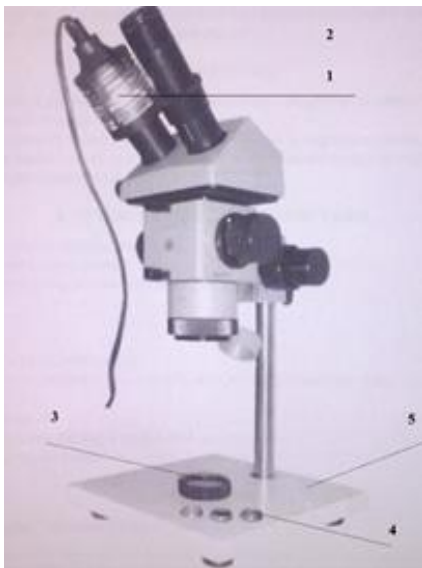


Рис.5 Загальний вид установки

Опис установки

На рис.5. показано загальний вигляд установки.

1 – освітлювач; 2 – окуляр з мікрометром; 3 – лінза, змонтована з пластиною; 4 – світлофільтри; 5 – предметний столик; При спостереженні за допомогою мікроскопа, в полі зору видно чергування темних і світлих кілець, що мають темний центр. Одночасно з кільцями Ньютона спостерігається окулярна шкала.

Хід роботи

Вправа 1. Визначення радіуса кривини лінзи

1. Включити освітлювач в мережу. Встановити червоний світлофільтр ($\lambda = 630$ нм). Помістити на столик мікроскопа лінзу, встановлену на пластинку 8.

2. Отримати гарну видимість кілець Ньютона. У центрі повинна спостерігатися темна пляма. Окулярна шкала при цьому повинна розташовуватися за діаметром кілець.

3. Виміряти діаметр першого темного кільця. Для цього треба зняти відліки N_1 і N_2 для діаметрально протилежних точок кільця (див. рис. 3.) за

поділками окулярної шкали. Діаметр кільця дорівнює різниці відліків, помноженої на ціну поділки окулярної шкали (див. Таблиця 1): $d = |N_1 - N_2| \times a$.

4. Виміряти діаметри п'яти темних кілець згідно п. 3.

5. Розрахувати радіус кривини лінзи за формулою (6) п'ять разів. Знайти середнє значення радіуса.

Вправа 2. Визначення довжини світлової хвилі

1. Замінити червоний світлофільтр на зелений (або інший за вказівкою викладача).

2. Виміряти діаметри п'яти темних кілець згідно п. 2, 3 вправи 1.

3. Розрахувати п'ять разів довжину світлової хвилі, використовуючи знайдене значення радіуса кривини лінзи і формулу (6). Знайти середнє значення довжини хвилі.

4. Розрахувати похибку як для прямих вимірювань.

5. Знайти відносну похибку вимірювань. Результат представити у вигляді: $\lambda = \bar{\lambda} \pm \sigma_{\lambda}$.

Таблиця 1

Заокруглені значення збільшень, нанесені на рукоятку барабана, крат	Одна поділка шкали 0,1 мм відповідає величині на об'єкті
0,6	0,17
1	0,1
2	0,05
4	0,025
7	0,014

Таблиця 2

Колір	Довжина хвилі в
Червоний	630±10
Жовтий	578±10
Зелений	546±10
Синій	435±10

Контрольні питання

1. Який принцип дії opak – ілюмінатора?
2. Як визначити ціну поділки окулярного мікрометра?
3. Як змінюються фази векторів \vec{E} і \vec{H} при відбитті від межі повітря – скло?

4. Які умови мінімуму і максимуму освітленості в інтерференційній картині?
5. Як залежить радіус m -того темного кільця від номера і від довжини хвилі?
6. Як визначити радіус кривини лінзи?
7. Як визначити діаметр плями зіткнення лінзи зі скляною пластинкою?

Рекомендована літератур

1. Бордун О.М. Лах Х.Г. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з оптики. Вища школа. Львів. 2002. 35 с.
2. Бутиков Е.И. Оптика. - М.: Высш.шк., 1986. 512 с
3. Мамалуй Ю.А., Сойка Е.Н. Лекции по оптике. Донецк: ДонГУ, 1998. 87 с.
4. Лабораторні роботи для студентів спеціальностей ФІА та МФ.
<https://elizlabs.com.ua>.
5. Загальна фізика. Лабораторний практикум. За редакцією Горбачук І.Т. К.:Вища школа.1992. 509 с.

Лабораторна робота № 4

Визначення коефіцієнта заломлення скляної пластини інтерференційним методом.

Мета роботи: Вивчення інтерференції від плоско-паралельної пластини.

Приладдя: лазер, екран з круглим отвором, плоско-паралельна пластинка.

Розглянемо інтерференцію світла на плоско-паралельній пластині від точкового монохроматичного джерела (рис.1).

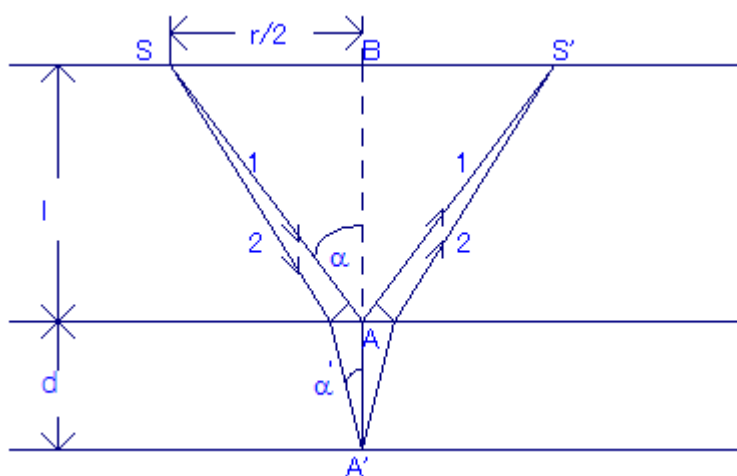


Рис. 1.

Нехай S знаходиться у площині екрану SBS' , паралельного пластині товщиною d . Відстань BA від пластини до екрана дорівнює l . В точку S' на екрані промені (1 і 2) від джерела можуть потрапити, відбиваючись від верхньої і нижньої сторін пластини. В результаті промені 1 і 2 інтерферують в точці S' , причому різниця ходу Δ між цими променями дорівнює:

$$\Delta = 2dn \cos \alpha' + \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

де α' – кут між заломленими в пластині променем 2 і нормаллю. Формула (1) отримана в наближенні, що кут падіння першого і другого променя приблизно однакові, (тобто інтерферують промені від точкового джерела з дуже малим кутом між променями). Враховуючи закон заломлення маємо:

$$\Delta = 2dn \sqrt{1 + \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}} + \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

В умовах експерименту екран і пластина досить віддалені один від одного, тому кути θ малі, з огляду на це, отримаємо:

$$\sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}} \approx \sqrt{1 - \frac{a^2}{n^2}} \approx 1 - \frac{a^2}{2n^2}. \quad (3)$$

$$\text{З рис.1. видно, що } \alpha = \frac{r}{2\ell}, \quad (4)$$

де $r = SS'$ – радіус інтерференційного кільця. Підставляючи (4) і (3) в (2), отримуємо вираз для різниці ходу:

$$\Delta = 2dn\left(1 - \frac{r^2}{8\ell^2 n^2}\right) + \lambda/2. \quad (5)$$

Умови спостереження темного кільця:

$$\Delta = (2m + 1) \lambda/2, \text{ де } m = 0, 1, 2, 3, \quad (6)$$

З (5) і (6) отримаємо вираз для радіуса m – того темного кільця:

$$r^2 = 8n^2 \ell^2 - \frac{4n\ell^2 m \lambda}{d}. \quad (7)$$

Незручність формули (7) полягає в тому, що номер m відраховується від далеких кілець (великі r), а в центрі картини m приймає максимальне значення M . Тому перенумеруємо кільця $m = M + 1 - j$, де $j = 1, 2, 3, \dots$ – номер темного кільця, починаючи відлік від центру картини (тобто точки S), після заміни m на M отримаємо:

$$r^2 = 8n^2 \ell^2 \left(1 - \frac{\lambda(M+1)}{2nd}\right) + \frac{4n\lambda\ell^2}{d} j. \quad (8)$$

З формули (8) видно, що залежність квадрата радіуса темного кільця від номера j є лінійна залежність з кутовим коефіцієнтом $\frac{4n\lambda\ell^2}{d}$. Ідея методу полягає в знаходженні експериментальної залежності r^2 від номера темного кільця j і розрахунку кутового коефіцієнта $\frac{4n\lambda\ell^2}{d}$ методом найменших квадратів. Формулу (8) можна представити у вигляді рівняння прямої $Y = aX + b$, де $Y = r^2$, $a = \frac{4n\lambda\ell^2}{d}$, тоді згідно методу найменших квадратів

$$a = \frac{\sum(j_i - \langle j \rangle)(r_i^2 - \langle r^2 \rangle)}{\sum(j_i - \langle j \rangle)^2} = \frac{4n\lambda\ell^2}{d}, \text{ звідси}$$

$$n = \frac{da}{4\lambda\ell^2}. \quad (9)$$

Тут j_i або (i) приймає значення 3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13, $\langle j \rangle = 8$.

Хід роботи

Визначення показника заломлення плоско – паралельної скляної пластини

1. На оптичну лаву встановити лазер Л, екран Э з лінзою і плоско – паралельну пластину П згідно Рис.2.

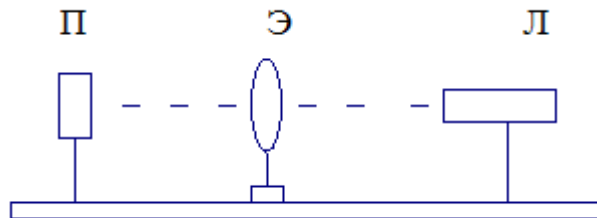


Рис. 2. Схема розташування приладів дослідження

2. Увімкнути лазер і юстуванням лазера, екрану і пластинки отримати на екрані Э інтерференційну картину з центром, що збігається з центром екрана. Якщо центр інтерференційної картини і екрану поєднати не вдасться, то необхідно, щоб центр картини лежав на одній з координатних осей екрану.

3. Починаючи з 3-го темного кільця, виміряти покази діаметрів (радіусів r_i) темних кілець по екрану (для цього слід для кожного кільця знайти дві координати перетину з тією координатною віссю, яка проходить через центр картини і знаходять радіуси кілець. Вимірювання слід зробити для 11 кілець.

4. Скласти таблицю залежності r_i^2 від номера кільця $i = 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13 \dots$ і за методом найменших квадратів знайти кутовий коефіцієнт a .

5. Коефіцієнт заломлення n пластини обчислити за формулою (9). Похибку результату оцінити самостійно. Робочі дані: довжина хвилі He–Ne лазера $\lambda = 633$ нм; товщина пластини $d = 1,62$ см.

Контрольні питання

1. Чому в даній роботі використовується лазер, а не звичайне джерело світла?
2. Навіщо потрібна лінза в екрані?

3. Чому інтерференційні лінії мають вигляд кола?
4. Вивести формулу (2). Який сенс доданка $\lambda/2$?
5. Вивести формулу (8).
6. Чи має значення номер темного кільця, від якого починається відлік?

Рекомендована література

1. Мамалуй Ю.А., Сойка Е.Н. Лекции по оптике. Донецк: ДонГУ, 1998. 87 с.
2. . Лабораторні роботи для студентів спеціальностей ФІА та МФ.
<https://elizlabs.com.ua>.
3. Загальна фізика. Лабораторний практикум. За редакцією Горбачук І.Т. К.:Вища школа.1992. 509 с.
4. Бордун О.М. Лах Х.Г. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з оптики. Вища школа. Львів. 2002. 35 с.
5. Бутиков Е.И. Оптика. - М.: Высш.шк., 1986. 512 с



Рис.3 Загальний вид установки

Лабораторна робота № 5

Вивчення поляризованого світла

Мета роботи: Вивчити способи отримання поляризованого світла.

Приладдя: Стопа Столетова, освітлювач, чорне дзеркало, фотоелемент, гальванометр.

Теоретична частина

Існують два типи хвиль: *поздовжні* і *поперечні*. Акустичні хвилі являють собою *поздовжні* механічні хвилі, в цих хвилях напрямок вектора зміщення частинок збігається з напрямком поширення хвилі. Світлові хвилі є прикладом *поперечних* хвиль, в них вектори \vec{E} і \vec{H} (вони взаємно перпендикулярні) коливаються в площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі (променю S). Джерелом світлових хвиль є збуджені атоми і молекули, що знаходяться в стані хаотичного руху і випускають хвилі з різними випадковими орієнтаціями пари векторів \vec{E} і \vec{H} , тобто всі напрямки цих векторів виявляються рівноправними, таке світло називають природним.

Але можливі такі випадки, коли орієнтація пари векторів \vec{E} і \vec{H} змінюється не хаотично, а підпорядковується деяким законам, таке світло називається *поляризованим*. Таким чином, явище поляризації має місце тоді, коли вектор електричної компоненти світлової хвилі \vec{E} здійснює впорядкований рух, тобто вид поляризації світлових хвиль визначається видом впорядкованого руху електричного вектора хвилі. Очевидно, що до поздовжніх хвиль поняття поляризації не застосовується.

Покажемо на елементарному прикладі деякі впорядковані рухи вектора \vec{E} . Розкладемо електричний вектор хвилі в декартовій системі координат (Рис. 1.):

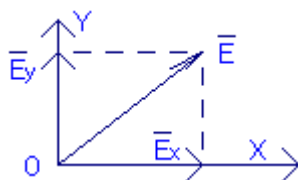


Рис. 1. Складові електричного вектора хвилі

$$\vec{E}_x = E_{x0} \sin \omega t$$

$$\vec{E}_y = E_{y0} \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

де E_{x0} , E_{y0} , ω , φ не залежать від часу. Ця система рівнянь (1) являє собою параметричний запис рівняння еліпса. Орієнтація еліпса відносно осей X , Y визначається відношенням амплітуд E_{x0}/E_{y0} і різницею фаз φ .

Якщо різниця фаз $\varphi = \pm k\pi$, де $k = 0, 1, 2, 3$, еліпс вироджується в пряму лінію, це буде лінійна поляризація, тобто кінець вектора \vec{E} буде рухатися по прямій, він не змінює своєї орієнтації. Площина (\vec{E}, \vec{S}) називається в цьому випадку площиною коливань вектора \vec{E} світлової хвилі.

Якщо різниця фаз $\varphi = \pm (2k + 1)\frac{\pi}{2}$, маємо еліпс, осі якого збігаються з осями X , Y це буде еліптична поляризація, кінець вектора \vec{E} описує еліпс.

Якщо $E_{x0} = E_{y0}$, еліпс перетворюється в коло, це буде кругова поляризація, кінець вектора \vec{E} описує коло. Таким чином розрізняють лінійну (плоску), еліптичну і кругову поляризацію. Найбільш загальним типом поляризації є еліптична.

Для отримання лінійно – поляризованого світла застосовують спеціальні оптичні пристрої – поляризатори. Напрямок коливань електричного вектора хвилі, яка пройшла через поляризатор, називається дозволеним напрямком поляризатора.

Розглянемо деякі методи отримання лінійно – поляризованого світла. Один з них – це отримання лінійно – поляризованого світла, відбитого від діелектричної пластини. Вектор \vec{E} світлової хвилі, падаючої на пластину і відбитої від пластини, розкладемо на два взаємно перпендикулярні напрямки. Виберемо один із напрямів у площині падіння променя (площина, що проходить через падаючий промінь і нормаль до поверхні, установлену в точці падіння), другий напрямок - перпендикулярно до площини падіння. Введемо позначення: E_i , $E_{i\perp}$ – складові амплітуди \vec{E} падаючої на пластину хвилі в площині падіння (E_i) і в площині, перпендикулярній до площини падіння ($E_{i\perp}$); E_r , $E_{r\perp}$ – те ж саме для відбитої хвилі; E_t , $E_{t\perp}$ – для заломлених. Відношення амплітуд E_r/E_i , $E_{r\perp}/E_{i\perp}$, E_t/E_i , $E_{t\perp}/E_{i\perp}$ визначаються формулами Френеля:

$$\frac{E_r}{E_i} = r = \frac{-tg(\varphi - \psi)}{tg(\varphi + \psi)}, \quad \frac{E_{r\perp}}{E_{i\perp}} = r_{\perp} = \frac{\sin(\varphi - \psi)}{\sin(\varphi + \psi)},$$

$$\frac{E_t}{E_i} = t = \frac{2 \sin \varphi \sin \psi}{\sin(\varphi + \psi) \cos(\varphi - \psi)}, \quad \frac{E_{t\perp}}{E_{i\perp}} = t_{\perp} = \frac{2 \sin \psi \cos \varphi}{\sin(\varphi + \psi)}, \quad (2)$$

Тут φ – кут падіння, ψ - кут заломлення. Степінь поляризації, відбитої і заломленої хвилі знаходиться з наступних співвідношень:

$$\Delta r = \frac{(r_{\perp}^2 - r^2)}{(r_{\perp}^2 + r^2)}, \quad (3)$$

$$\Delta t = \frac{(t_{\perp}^2 - t^2)}{(t_{\perp}^2 + t^2)}. \quad (4)$$

Кути φ і ψ пов'язані співвідношенням Снелліуса:

$$n = \frac{\sin \varphi}{\sin \psi}. \quad (5)$$

Якщо для довільного кута падіння φ $r \neq r_{\perp}$, $t \neq t_{\perp}$, то відбите і заломлене світло частково лінійно поляризоване. Але існує такий кут φ , для якого $r = 0$, в цьому випадку відбите світло буде повністю поляризоване. З формули (2) видно, $r = -\frac{tg(\varphi - \psi)}{tg(\varphi + \psi)} = 0$ при $tg(\varphi + \psi) = \infty$, тоді $\varphi + \psi = \pi/2$, що з урахуванням співвідношення (5) дає:

$$tg \varphi_B = n. \quad (6)$$

Кут φ_B , який задовольняє такий умові, називається кутом Брюстера. При падінні променя під кутом Брюстера відбите світло буде повністю лінійно поляризоване в площині, перпендикулярній площині падіння; з формули (3) видно, що $\Delta r = 1$. Частково поляризованим виявляється і заломлене світло. Степінь поляризації для нього, однак, завжди менше 1 навіть при падінні під кутом φ_B (біля 15% для звичайного скла). Підвищити степінь поляризації в цьому випадку можна, якщо повторно піддати світло, яке пройшло, кільком послідовним заломленням. Для цієї мети служить стопа Столетова – набір з 8–10 однакових скляних пластин, змонтованих в одній оправі. Якщо на такий набір пластин під кутом Брюстера падає природне світло, то і відбитий пучок, і той, що пройшов практично повністю лінійно поляризовані. При цьому інтенсивності обох рівні приблизно половині інтенсивності падаючого світла. Напрямок поляризації заломлених променів перпендикулярний напрямку поляризації відбитих: світло, яке пройшло через стопу Столетова поляризоване в площині падіння.

Другий спосіб отримання лінійно – поляризованого світла – заломлення світла в двопротенезаломлюючих кристалах. Деякі кристали мають властивість подвійного протенезаломлення (кварц, слюда, ісландський шпат). Заломлюючись в такому кристалі, світловий промінь ділиться на дві повністю лінійно поляризовані хвилі із взаємно перпендикулярними площинами

коливань. Одна з таких хвиль, що носить назву звичайної, поширюється в усіх напрямках з однаковою швидкістю. Отже, вона характеризується постійним значенням показника заломлення, що позначається n_o . Друга хвиля, яка називається незвичайною, поширюється в кристалі з різними швидкостями в залежності від напрямку поширення, і, отже, характеризується різними показниками заломлення. Значення показника заломлення незвичайної хвилі позначається n_e . У кожному двопротенезаломлюючому кристалі є один або два напрямки, поширюючись уздовж яких промінь не зазнає роздвоєння. Показники заломлення звичайної і незвичайної хвиль в такому напрямку рівні. Такі напрямки називаються оптичними осями кристала (позначаються OO). Якщо кристал має один напрямок, в якому $n_o = n_e$, він називається одновісним. В одновісних кристалах напрямок коливань вектора \vec{E} в звичайній хвилі перпендикулярний головному перерізу кристала, тобто площині, яка проходить через падаючий промінь і оптичну вісь, що проходить через точку падіння. Напрямок коливань \vec{E} в незвичайній хвилі лежить в площині головного перерізу. Якщо $n_o > n_e$ – кристал називається позитивним, якщо $n_o < n_e$ – негативним.

За допомогою двопротенезаломлюючих кристалів можна отримати лінійно-поляризоване світло, але для цього один з променів потрібно якимось чином прибрати, наприклад, поглинути. Це робиться кількома способами. Існують кристали, які мають різні коефіцієнти поглинання для звичайного і незвичайного променів. При достатній товщині пластинки, виготовленої з кристала, один з променів майже повністю гаситься. Такі пластинки називаються поляроїдами. Один з променів можна прибрати штучно. Наприклад, з ісландського шпату виготовляється призма Ніколя, яка пропускає тільки незвичайний промінь. Вона складається з довгого кристала $abcd$ (рис.2) ісландського шпату, розрізаного вздовж площини gf на дві частини, склеєні потім канадським бальзамом. Якщо природний промінь падає на одну з коротких граней призми Ніколя під кутом не більше 33° , то він завжди розділяється в кристалі на звичайну S_o і незвичайну S_e хвилі.

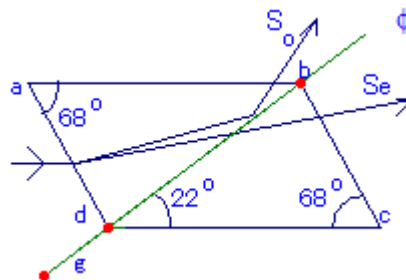


Рис.2. Хід променів в кристалі ісландського шпату

Незвичайна хвиля проходить через весь кристал, а звичайна, досягаючи канадського бальзаму, зазнає повне внутрішнє відбиття (показник заломлення канадського бальзаму менше показника заломлення ісландського шпату для звичайної хвилі, але більше показника заломлення для незвичайної). Всякий поляризатор може бути використаний для дослідження поляризованого світла, тобто в якості аналізатора. Для пояснення розглянемо схему (рис.3), де Π – поляризатор, A – аналізатор, O – джерело світла, S – напрямок поширення хвилі, 1 – дозволений напрямок поляризатора, 2 – дозволений напрямок аналізатора, \vec{E}_1 – вектор хвилі, що вийшла з поляризатора Π , \vec{E}_2 – вектор хвилі, що вийшла з аналізатора A .

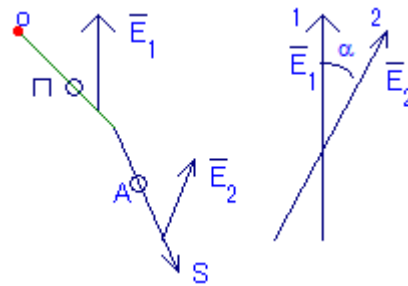


Рис.3. Схема виходу променів світла з кристала ісландського шпату

Аналізатор пропускає світло, поляризоване у напрямку 2, тобто ту частину світла, яка пройшло через поляризатор, для якого проекція вектора \vec{E} на напрямок 2 виражається формулою:

$$E_2 = E_1 \cos \alpha \quad (7)$$

де α – кут між напрямками 1 і 2. Для інтенсивностей світлової хвилі

$$I_2 = I_1 \cos^2 \alpha \quad (8)$$

Ця формула носить назву закону Малюса – при повороті аналізатора інтенсивність світла, що проходить, повинна змінюватися пропорційно $\cos^2 \alpha$.

Розглянемо методи отримання еліптично поляризованого світла. Еліптично поляризоване світло виходить при повному внутрішньому відбитті або проходженні лінійно – поляризованого світла через двопротенезаломлюючу пластинку певної товщини. Доцільно розглянути другий випадок. Пластинка вирізається так, щоб при нормальному падінні світла на неї показники заломлення для звичайного і незвичайного променів максимально відрізнялися. При цьому оптична вісь кристала лежить в площині

пластинки. Входячи в пластинку, промінь розділяється на два: звичайний і незвичайний:

$$\vec{E} = \vec{E}_o + \vec{E}_e \quad (9)$$

де \vec{E} – амплітуда падаючої хвилі, \vec{E}_o – амплітуда звичайної хвилі, \vec{E}_e – амплітуда незвичайної хвилі (рис.4). Тут o – напрямок коливань у звичайній, e – в незвичайній хвилі, α – кут між векторами \vec{E}_o і \vec{E}_e .

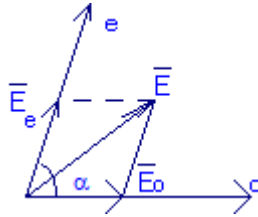


Рис.4. Розкладання \vec{E} хвилі на звичайну і незвичайну складові

Оскільки звичайний і незвичайний промені отримані з одного і того ж променя, то їх початкові фази однакові. При проходженні променя через пластинку фаза звичайної хвилі збільшується на: $\delta_o = \omega t = \omega \frac{d}{v} = \omega \frac{dn_o}{c}$, тут ω – частота коливань, t – час проходження хвилі через пластинку, d – товщина пластинки, c – швидкість світла у вакуумі, v – швидкість поширення хвилі в пластинці. Оскільки $\omega = 2\pi c/\lambda$, де λ – довжина хвилі в вакуумі, то

$$\delta_o = \frac{2\pi dn_o}{\lambda}. \quad (10)$$

Фаза незвичайної хвилі збільшиться при цьому на

$$\delta_e = \frac{2\pi dn_e}{\lambda}. \quad (11)$$

При виході з пластинки між звичайною і незвичайною хвилями набігає різниця фаз:

$$\Delta\delta = 2\pi d(n_o - n_e)/\lambda \quad (12)$$

Направимо вісь OX вздовж o , а OY – вздовж e . Хвиля, яка вийшла з пластинки має наступні величини компонент вектора \vec{E} : $\vec{E}_x = E_{xo} \sin \omega t$,

$$\vec{E}_y = E_{yo} \sin(\omega t + \varphi). \quad (13)$$

Ця формула описує еліптично – поляризовану хвилю (порівняйте з формулою (1)). Якщо $\Delta\delta = 2\pi$, то світло, яке виходить, поляризоване так само, як і те, що входить. Якщо $\Delta\delta = \pi$, світло поляризоване лінійно, причому напрямки E_{exit} і E_{enter} симетричні відносно осі OX (рис.5).

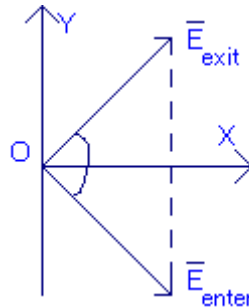


Рис.5. Напрями входячої і виходячої хвиль

При цьому $d(n_o - n_e) = \lambda/2$ і пластинка називається пластинкою в половину довжини хвилі. Якщо $\Delta\delta = \pi/2$, тобто $d(n_o - n_e) = \lambda/4$, пластинка називається пластинкою у чверть довжини хвилі. З формули (13) видно, що при цьому головні осі еліпса поляризації збігаються з напрямками o і e . Якщо $|E_{xo}| = |E_{yo}|$ (для цього потрібно, щоб $\alpha = 45^\circ$), то результуюча поляризація – кругова.

Методика експерименту і опис експериментальної установки

Установку збирають на оптичній лаві (рис.6). На одному кінці лави розташовують джерело світла (лампу розжарювання), яка підключається до регульованого джерела напруги, яке дозволяє плавно змінювати яскравість джерела світла.

1 – джерело світла (лампа розжарювання); 2 – регульоване джерело напруги; 3 – поляроїди; 4 – чорне дзеркало; 5 – фотореєструючий пристрій.

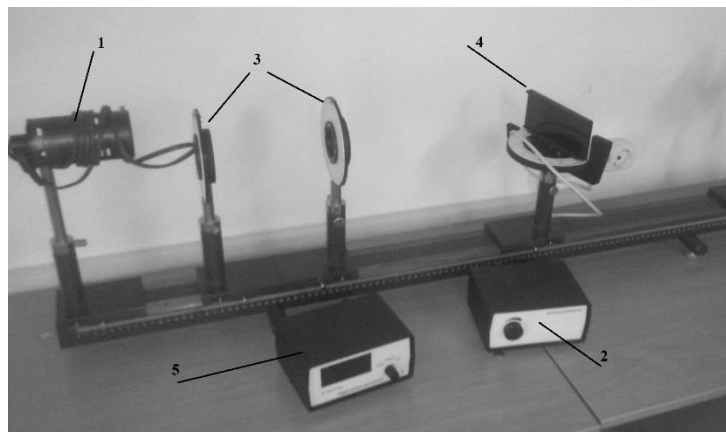


Рис.6 Загальний вигляд установки

В якості поляризатора використовують поляроїд, поміщений в оправу з лімбом для відліку кута повороту поляроїда навколо горизонтальної осі. В якості аналізатора в різних вправах використовують такий же поляроїд або чорне дзеркало. Чорне дзеркало укріплено на зовнішній частині горизонтального столика, яка може повертатися навколо вертикальної осі і нерухомої центральної частини столика. Поворот здійснюють за допомогою рифленого кільця на бічній поверхні столика. Центральна частина столика встановлена на стійці рейтера і може бути закріплена в ньому за допомогою затискного гвинта. Для вимірювання інтенсивності відбитого від чорного дзеркала світла використовується фоторезистор, який незалежно від столика також може повертатися навколо вертикальної осі. Кути повороту чорного дзеркала і фоторезистора відраховуються за допомогою лімба столика з ціною поділки шкали 1° . Для вимірювання інтенсивності світла, що пройшло через поляроїди, використовується фоторезистор, укріплений на окремому рейтері. Фоторезистор, який використовувався в процесі вимірювання підключають до фотореєструючого пристрою, який пов'язаний з шунтами для перемикання діапазону вимірювання струму.

Хід роботи

Вправа 1. Перевірка закону Малюса

1. Встановлюють на оптичній лаві прилади в наступній послідовності: джерело світла, два рейтери з поляроїдами і рейтер з фоторезистором. Перший поляроїд є поляризатором, другий – аналізатором.

2. Зсовують прилади до мінімально можливої відстані між ними і регулюють їх по висоті так, щоб центри вихідного вікна освітлювача, поляроїдів і тубуса фоторезистора (на малюнку не показаний) розташовувалися на одній горизонтальній прямій, паралельній до оптичної лави. Площини вихідного вікна освітлювача, поляроїдів і фоторезистора повинні бути перпендикулярні до оптичної лави.

3. Збільшують відстань між освітлювачем і фоторезистором до 80 – 100 см. Поляроїди встановлюють між ними довільно. Стрілку на оправі аналізатора поєднують з нулем шкали.

4. Підключають джерело світла до регулятора напруги, а фоторезистор до фотореєструючого пристрою. Регулятор напруги і фотореєструючий пристрій під'єднують до мережі з напругою 220 В.

5. Вмикають джерело світла натисканням кнопки "МЕРЕЖА" на панелі регулятора напруги. Обертанням ручки на панелі приладу регулюють яскравість джерела.

6. Вмикають у вимірювальне коло фоторезистор натисканням кнопки "МЕРЕЖА" на панелі фотореєструючого пристрою. Масштаб шкали фотореєструючого пристрою встановлюють поворотом ручки перемикачів діапазонів на панелі. В процесі вимірювання стежать за тим, щоб показання приладу не виходили за границі встановленого діапазону. При перевантаженні загоряється світлодіод «перевантаження».

7. Обертаючи поляризатор, намагаються отримати максимальну величину інтенсивності світла, яке пройшло через обидва поляроїди. Цьому відповідає максимальна величина фотоструму, I_{max} вимірюваного фотореєструючим пристроєм.

8. Встановлюють шкалу фотореєструючого пристрою так, щоб при максимальному фотострумі I_{max} покази приладу знаходилися в границях встановленого діапазону. Якщо необхідно, ще раз регулюють яскравість джерела світла і переміщують фоторезистор уздовж оптичної лави.

9. Обертаючи аналізатор навколо осі, зняти показання фотоструму через кожні 10° для всіх кутів від 0 до 360°

10. Побудувати графік залежності сили струму від кута повороту аналізатора $I = f(\alpha)$.

Вправа 2. Дослідження відбиття поляризованого і природного світла від межі діелектрика. Визначення показника заломлення діелектрика за кутом Брюстера.

Природне світло, що падає під кутом Брюстера на діелектрик, після відбиття стає лінійно поляризованим перпендикулярно площині падіння. При падінні під кутом Брюстера на діелектрик лінійно поляризованого в площині падіння світла, інтенсивність відбитої хвилі повинна дорівнювати нулю. Для визначення кута Брюстера необхідно зробити наступне:

1. На оптичній лаві встановлюють освітлювач, поляроїд і чорне дзеркало.
2. Підключають фоторезистор чорного дзеркала до фотореєструючого пристрою.

3. Вмикають в мережу джерело світла і фотореєструючий пристрій натисканням кнопок "МЕРЕЖА" на панелі приладів.

4. Звільнивши затискний гвинт на стійці рейтера зі столиком і чорним дзеркалом, повертають столик так, щоб мітка на центральній частині столика вказувала напрямок падаючого променя. Встановивши таким чином столик, фіксують його положення затискним гвинтом на стійці рейтера. При поєднанні нуля на лімбі з міткою на столику падіння променя на чорне дзеркало буде нормальним.

5. Поворотом навколо вертикальної осі встановлюють чорне дзеркало так, щоб промінь світла ковзав уздовж чорного дзеркала, при цьому кут падіння

променя на дзеркало дорівнює 90° . Повертають кронштейн з фоторезистором і встановлюють його так, щоб промінь, який ковзає вздовж чорного дзеркала, потрапляв на фоторезистор. При цьому показання фотореєструючого пристрою буде максимальним і не буде залежати від кута повороту поляроїда.

6. Встановлюють чорне дзеркало так, щоб падаючий на нього промінь світла становив $\varphi = 80^\circ$ з нормаллю до його поверхні. При цьому поділ лімба, рівний 80° , має перебувати навпроти мітки на столику. Повертають кронштейн з фоторезистором і встановлюють його так, щоб показчик на кронштейні фоторезистора знаходився навпроти поділу лімба, який відповідає куту $\varphi = 80^\circ$ по іншу сторону від 0° (кут відбиття дорівнює куту падіння).

7. Обертаючи поляроїд навколо горизонтальній осі і стежачи за показаннями фотореєструючого пристрою, намагаються отримати мінімальне значення фотоструму. Мінімум фотоструму вказує на те, що напрямок коливань вектора \vec{E} в падаючому промені лежить в площині падіння. Записують величину фотоструму I .

8. Визначити величину фотоструму для кутів падіння φ в інтервалі від 80° до 5° через кожні 5° . Після закінчення вимірювань вимкнути освітлювач і фотореєструючий пристрій.

9. Побудувати графік залежності $I = f(\alpha)$. Точка його мінімуму дасть значення кута Брюстера;

10. Визначити за формулою (6) показник заломлення матеріалу n , з якого виготовлено дзеркало.

Вправа 3 Визначення площини поляризації світла за допомогою стопи Столетова.

Якщо в попередньому досліді замінити чорне дзеркало стопою Столетова і аналізувати не відбите, а світло, яке пройшло, то ситуація зміниться на протилежну. Заломлений пучок лінійно – поляризований в площині падіння, тому для отримання мінімальної інтенсивності хвилі, яка пройшла, на стопу Столетова необхідно направити світло, лінійно – поляризоване перпендикулярно площині падіння. Для виконання цієї вправи необхідно, встановивши на оптичну лаву стопу Столетова, повернути її на кут $\varphi = \varphi_B$, знайдений у впр.2. Зловити у фотоелемент промінь, який пройшов. Обертаючи поляризатор, добитися мінімального значення фотоструму на гальванометрі. Зняти відлік по шкалі поляризатора і переконатися, що кут повороту приладу відрізняється на 90° від його остаточного положення в попередньому досліді. Слід зауважити, що тут неможливо добитися нульової інтенсивності хвилі, яка проходить (оскільки $t_\perp \neq 0$).

1. Що називається площиною коливань?
2. Сформулювати закон Малюса.
3. Що таке кут Брюстера?
4. Яка хвиля називається звичайною? Незвичайною?
5. Яка пластинка потрібна для аналізу еліптично – поляризованого світла?
6. Як отримати світло, поляризоване по колу?
7. Чому для визначення кута Брюстера необхідне чорне дзеркало? Для чого попередньо необхідно провести візуальне спостереження (вказати фізичний зміст)?
8. Для чого призначена стопа Столетова? Чому неможливо отримати абсолютний нуль інтенсивності світла, яке пройшло через стопу?
9. Що називається оптичною віссю кристала?

Рекомендована література

1. Гольдин Л.Л. Лабораторные занятия по физике. М.: Наука, 1983. 704 с.
2. Мамалуй Ю.А., Сойка Е.Н. Лекции по оптике. Донецк: ДонГУ, 1998. 87 с.
3. Лабораторні роботи для студентів спеціальностей ФІА та МФ. <https://elizlabs.com.ua>.
4. Загальна фізика. Лабораторний практикум. За редакцією Горбачук І.Т. К.:Вища школа. 1992. 509 с.
5. Бордун О.М. Лах Х.Г. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з оптики. Вища школа. Львів. 2002. 35 с.

Лабораторна робота № 6

Експериментальна перевірка рівняння Ейнштейна для фотоефекту і визначення сталої Планка.

Мета роботи: Вивчення фотоефекту і графічного методу обробки результатів вимірювань.

Приладдя: Джерело світла, фотоелемент, набір світлофільтрів, вольтметр, амперметр, регульоване джерело постійної напруги.

У даній роботі вивчається явище фотоефекту – яскраво вираженого квантового явища, яке проявляється в макроскопічних умовах; прості вимірювання дозволяють отримати значення сталої Планка. Фотоефектом називається явище вильоту електронів з фотокатода (металу), який освітлюється світлом. Просте пояснення цього явища дав в 1905 р А. Ейнштейн на основі створеної ним квантової теорії фотоефекту. В основі цієї теорії лежить уявлення про світло, як набір квантів – фотонів, які володіють енергією $\hbar\omega$ і імпульсом $\hbar\omega/c$, де \hbar – стала Планка, ω - кругова частота світла, c – швидкість світла. Зверніть увагу на те, що поряд з \hbar використовується (введена самим Планком) стала h , яка визначається зі співвідношення $h\nu = \hbar\omega$, тобто $h = 2\pi\hbar$. Квантова теорія фотоефекту заснована на наступних фізичних уявленнях. При зіткненні фотона з електроном фотокатода енергія фотона повністю передається електрону, при цьому фотон припиняє своє існування. В результаті такої взаємодії електрон набуває надлишкової енергії $h\nu$. Якщо цієї енергії досить для подолання роботи виходу W електрона з металу, то електрон вилітає з фотокатода з деякою кінетичною енергією. Таким чином, енергетичний баланс процесу взаємодії фотонів з вилітаючими електронами описується рівнянням:

$$\hbar\omega = E + W \quad (1)$$

де $E = mv^2/2$ – кінетична енергія фотоелектронів. З курсу електрики відомо, що роботою виходу W електрона з металу називається енергія, необхідна для видалення з кристалу електрона, що рухається у напрямку до поверхні, з енергією, що дорівнює енергії Фермі. Якщо енергія фотона виявляється більше W , то надлишок енергії E залишається у електрона, який перебував на рівні Фермі і вилітає перпендикулярно до поверхні. Всі інші електрони мають меншу енергію, тому що спочатку вони мали енергію меншу, ніж енергія Фермі, або вони, маючи енергію Фермі, рухалися не в напрямку до поверхні.

З рівняння (1) випливають всі основні закономірності фотоефекту.

1. Дійсно, оскільки освітленість фотокатода пропорційна числу падаючих фотонів, то фотострум, будучи пропорційним числу вибитих електронів, виявляється пропорційним освітленості.

2. Безпосередньо з (1) видно, що максимальна кінетична енергія фотоелектронів для даної речовини (тобто при фіксованій W) лінійно зростає з частотою світла.

3. Частота фотона, при якій енергія фотона стає менше роботи виходу електрона з металу, називається критичною частотою і визначає червону границю фотоелекту $\nu_{кр}$.

4. Кінетична енергія електронів, що вилітають не залежить від інтенсивності світла, що падає на фотокатод (освітленості).

На практиці для вимірювання кінетичної енергії електронів використовуються вакуумні фотоелементи, в яких поблизу фотокатода розташовується другий електрод (анод) на який подається затримуючий ($U < 0$) або прискорюючий ($U > 0$) потенціал. Типова вольтамперна характеристика такого фотоелемента зображена на рис.1, де по осі X відкладений потенціал анода U відносно катода, а по осі Y – фотострум I , який протікає через фотоелемент. Пояснимо хід вольтамперної характеристики. При досить великих прискорюючих потенціалах ($U > U_n$) всі фотоелектрони, вибиті з катода, потрапляють на анод.

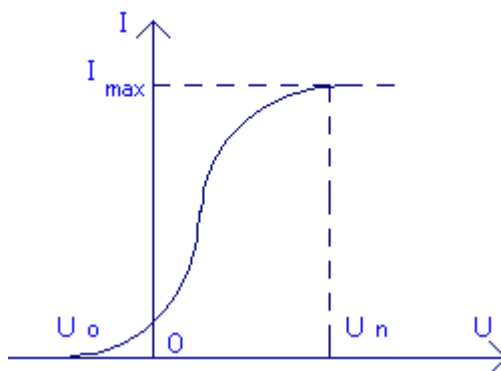


Рис. 1. Вольтамперна характеристика фотоелемента

Тому струм насичення I_{max} в цьому режимі не змінюється при збільшенні прискорюючого потенціалу. При затримуючих потенціалах ($U < 0$) на анод можуть потрапити лише ті електрони, які мають досить великий запас кінетичної енергії. Нарешті, при деякому значенні $U = -U_0$ (потенціал запирання) навіть найшвидші електрони не зможуть потрапити на анод. Очевидно, що запираючий потенціал пов'язаний з максимальною кінетичною енергією фотоелектронів співвідношенням:

$$eU_o = E_{max} \quad (2)$$

Підставляючи (2) в (1) отримаємо рівняння Ейнштейна для фотоэффекту:

$$eU_o(\omega) = \hbar\omega - W. \quad (3)$$

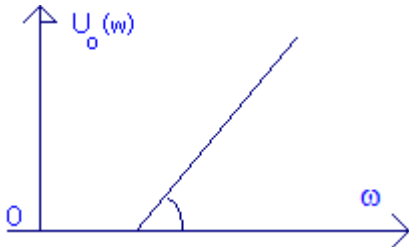


Рис. 2. Залежність кінетичної енергії фотоелектронів від частоти світлової хвилі

Перевагою рівняння (3) порівняно з (1) є простота експериментального вимірювання величини U_o на відміну від E_{max} . У даній роботі вивчається залежність фотоструму від величини потенціалу запирання U_o для різних частот світла ω , що лежать у видимій області спектра. Оскільки, як видно з (3), $U_o(\omega)$ лінійно залежить від ω , то побудувавши за експериментальними точками графік залежності $U_o = U_o(\omega)$, ми можемо знайти сталу Планка, обчисливши кутовий коефіцієнт прямої (3) (рис.2):

$$\frac{dU_o(\omega)}{d\omega} = \frac{\hbar}{e} \quad (4)$$

З цієї формули (4) видно, що кут нахилу прямої $U_o(\omega)$ не залежить від речовини, з якої виготовлений фотокатод (тобто від роботи виходу W). Для визначення запираючого потенціалу $U_o(\omega)$ необхідно (для даної частоти ω) зняти залежність фотоструму i від величини гальмуючого потенціалу U і знайти значення U_o , при якому струм дорівнює нулю. Однак, як показує дослід, крива $I(U)$ підходить до осі абсцис під невеликим кутом (рис.3), в результаті чого значення потенціалу запирання стає трохи невизначеним.

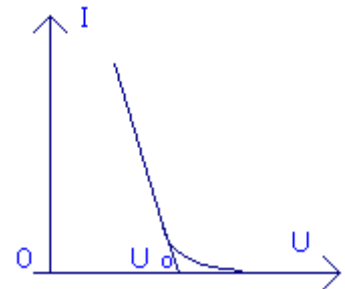


Рис. 3. Залежність фотоструму від потенціалу запирання

Такий хід кривої $I(U)$ пов'язаний, як уже зазначалося, з тим, що фотоелектрони мають певний розкид за початковими швидкостями. Крім того, слід врахувати наявність зворотнього фотоэффекту, тобто фотоэффекту з анода, оскільки в області гальмуючих потенціалів електричне поле буде прискорювати всі електрони, вибиті з анода у напрямку до катоду. Зворотній фотоэффект може привести до того, що крива $I(U)$ буде заходити в область негативних значень I . Ще одна причина пологого ходу кривої $I(U)$ поблизу U_o

полягає в недосконалості вакууму всередині фотоелемента, в результаті чого можливе виникнення іонного струму. В силу зазначених причин запираючий потенціал визначається не в точці перетину кривої $I(U)$ з віссю абсцис, а в екстраполяції початкової лінійної ділянки отриманої кривої до цієї осі, як показано на рис.3. При виконанні точних експериментів по визначенню постійної Планка застосовуються фотоелементи, які мають вигляд сферичного конденсатора з фотокатодом на внутрішній сфері (оптимальна форма електродів). У нашій установці використовується сибіюцезієвий фотоелемент Ф-8 і Ф-13. Для отримання монохроматичного світла використовується набір світлофільтрів.

Прилади й устаткування

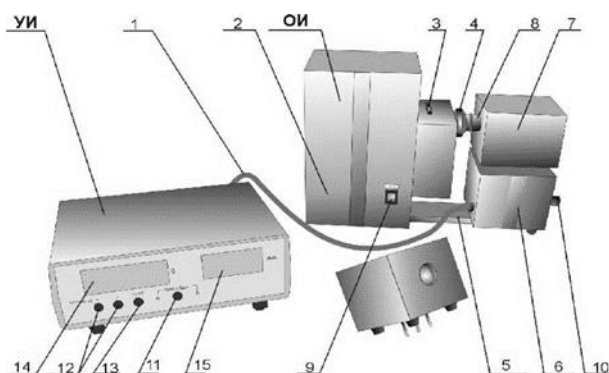


Рис.4 Загальний вид установки

Установка (Рис.4) складається зі збірного корпусу (2), в якому встановлені освітлювач (спектральна ртутна лампа) з джерелом живлення, блок інтерференційних світлофільтрів (3) і пристрій регулювання освітленості (4). Положення "0" блоку світлофільтрів відповідає проходженню світла без світлофільтрів і може застосовуватися для зняття інтегральних вольтамперних і люкс-амперних характеристик, а положення "5" – перекриває лампу і використовується для установки нуля мікроамперметра. До корпусу за допомогою кронштейна (5) кріпиться підсилювач фотоструму (6), на верхню кришку якого встановлюються змінні фотоприймачі (7) з фотоелементами. При установці фотоприймачів їх приймальне вікно поєднується з вихідним вікном освітлювача і закривають за допомогою бленди (8). На передній панелі об'єкта дослідження знаходяться мережевий вимикач з індикатором вмикання мережі (9). На задній панелі збірного корпусу (2) розташовані клеми заземлення, тримачі запобіжників і мережевий шнур з вилкою. На бічній стінці розташоване вихідне вікно освітлювача (8) і пристрої для зміни

інтерференційних світлофільтрів (3) і регулювання освітленості (4). На бічних поверхнях підсилювача фотоструму розташовані з'єднувальний шнур (1) з роз'ємом для підключення збірному корпусу до пристрою вимірювального і регулятори «ГРУБО» і «ТОЧНО» (10) установки нуля при відсутності освітленості. На передній панелі пристрою вимірювального розміщені такі органи управління та індикації: – кнопка (11) «ПРЯМА» – «ЗВОРОТНЯ» з відповідними індикаторами – призначена для включення прямого або зворотнього режимів вимірювання – кнопки "+", "-" (12) і «СБРОС» (13) – призначені для регулювання напруги на фотоелементі і його скидання в нуль. Індикатори "В" (14) і "мкА" (15) – призначені для індикації значень величин напруги на фотоелементі і фотоструму в процесі роботи. На задній панелі пристрою вимірювального розташовані вимикач «МЕРЕЖА», клема заземлення, тримачі запобіжників (закриті запобіжної скобою), мережевий шнур з вилкою і роз'єм для підключення об'єкта дослідження. Принцип дії установки заснований на вимірюванні струму через фотоелемент при зміні полярності і величини прикладеної до нього напруги і зміни спектрального складу і величини освітленості катода фотоелемента. У процесі виконання лабораторної роботи знімається залежність струму через фотоелемент від прикладеної до нього напруги. При цьому змінюється полярність напруги (тобто окремо знімаються пряма і зворотня вітки вольтамперної характеристики фотоелемента). Характеристики знімаються при різних значеннях освітленості і при зміні довжини хвилі освітлення фотоелемента. За результатами вимірювань будуються сімейства вольтамперних характеристик і, використовуючи відповідні методи розрахунку, чисельно оцінюється значення сталої Планка.

Хід роботи

1. Встановити на збірному корпусі фотоприймач (7) з досліджуваним фотоелементом і засунути бленду (8) освітлювача в вікно фотоелемента.
2. Увімкнути пристрій вимірювальний вимикачем «МЕРЕЖА». При цьому повинні загорітися індикатори «ЗВОРОТНЯ», *В* і *мкА* пристрою вимірювального після 5 хвилинного прогріву ручками (10) «УСТАНОВКА НУЛЯ» (ГРУБО і ТОЧНО) на збірному корпусі встановити нульове значення на індикаторі (15) (*мкА*) пристрою вимірювального.
3. Увімкнути збірний корпус вимикачем «МЕРЕЖА» на його передній панелі.
4. Дати лампі освітлювача прогрітися протягом 15 хв.
5. За допомогою кнопки (11) («ПРЯМА» – «ЗВОРОТНЯ») вибрати необхідний режим вимірювання.

6. Встановити необхідний світлофільтр поворотом барабана.

7. Змінюючи значення напруги за допомогою кнопок (12) ("+" і "-") і зчитувати покази фотоструму з індикатора (15) ("мкА"), зняти дані для побудови вольтамперної характеристики $I(U)$.

8. Повторити вимірювання для інших світлофільтрів.

Примітка 1: При необхідності за допомогою повороту кільця (4), розташованого на вихідному вікні збірного корпусу, можна змінювати освітленість фотоелемента.

Примітка 2: При визначенні затримуючої напруги фотоелемента необхідно нульове значення струму зчитувати при зменшенні напруги від нульового значення за індикатором (14) до значення затримуючої напруги, а не навпаки. Не рекомендується встановлювати значення напруги нижче затримуючої.

9. Після закінчення роботи вимкнути збірний корпус і пристрій вимірювальний.

Обробка результатів

За отриманими для кожного світлофільтру даними (п.7) будують графік залежності $I = f(U)$ і знаходять екстраполяцією значення замикаючого потенціалу U_0 (рис.3). Будують графік залежності величини затримуючого потенціалу від частоти $U_0 = U_0(\omega)$, за кутовим коефіцієнтом визначають сталу Планка \hbar і порівнюють з табличним значенням. Слід зазначити, що основне джерело похибки в даній роботі – не ідеальність світлофільтрів, тому що кожен світлофільтр має якусь більш–менш широку смугу пропускання. Крім того, є похибка, пов'язана з неточністю екстраполяції при визначенні U_0 (рис.3). Ці похибки можуть привести до досить великого розкиду експериментальних точок $U_0 = U_0(\omega)$, тому значення сталої Планка визначається за порядком величини. Для оцінки похибки рекомендується застосовувати наближені методи графічної обробки результатів за методом найменших квадратів. Довжини хвиль, що відповідають максимуму пропускання світлофільтрів, наведені в таблиці:

Маркування світлофільтрів	Довжина хвилі (нм)
№1	407
№2	435
№3	546
№4	578
№5	Закрито (світло не проходить)

№0	Відкрито (світло без фільтрів)
----	--------------------------------------

Контрольні питання

1. Напишіть рівняння Ейнштейна і поясніть його зміст.
2. Сформулюйте основні положення фотоефекту.
3. Що таке потенціал запирання (затримання), як знаходять потенціал запирання?
4. Як знайти сталу Планка?
5. Як залежить потенціал запирання (затримання) від частоти?
6. Як пояснити явище насичення фотоструму?
7. Що називається вольт – амперною характеристикою фотоелемента?
8. Що називається червоною границею фотоефекту?
9. Як залежить сила фотоструму від освітленості фотокатода?
10. Як залежить освітленість фотокатода від відстані до лампи?
11. Який вигляд матиме рівняння Ейнштейна в області рентгенівського діапазону?

Рекомендована література

1. Лабораторні роботи для студентів спеціальностей ФІА та МФ. <https://elizlabs.com.ua>.
2. Загальна фізика. Лабораторний практикум. За редакцією Горбачук І.Т. К.:Вища школа.1992. 509 с.
3. Бордун О.М. Лах Х.Г. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з оптики. Вища школа. Львів. 2002. 35 с.
4. Гольдин Л.Л. Лабораторные занятия по физике. М.: Наука, 1983. 704 с.
5. Мамалуй Ю.А., Сойка Е.Н. Лекции по оптике. Донецк: ДонГУ, 1998. 87 с.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

Кафедра загальної фізики і дидактики фізики

ЗВІТ

з лабораторної роботи №____

///НАЗВА ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ///

Виконали студенти групи (*//ПІБ та група студентів
згідно розподілу по журналу
виконання*)_____

Викладач кафедри

Підпис про захист та дата

Вінниця 2020

//Зміст звіту (можливе оформлення як на листах А4 так і на подвійних аркушах зошиту)

1. Мета роботи:

2. Приналежності:

3. Порядок виконання роботи: (*//формули, ланцюги, хід роботи*)

-

-

.....

4. Результати роботи:

///Графіки, малюнки, таблиці з даними, розрахунки, похибки

1. Висновки.

2. Відповіді на контрольні питання.

ЗМІСТ

Загальні положення про оформлення лабораторних робіт та розрахунок похибок.....	4
ЕЛЕКТРИКА ТА МАГНЕТИЗМ	7
Лабораторна робота № 1 Вивчення електростатичного поля	7
Лабораторна робота №2 Вимірювання індукції магнітного поля Землі.	14
Лабораторна робота №3 Дослідження залежності електричного опору металів та напівпровідників від температури	19
Лабораторна робота № 4 Вивчення загасаючих електричних коливань	26
Лабораторна робота № 5 Взаємна індукція двох соленоїдів.....	35
Лабораторна робота № 6 Вивчення явища електрорушійної сили самоіндукції	41
Лабораторна робота № 7 Вивчення явища резонанса в електричних колах	47
Лабораторна робота № 8 RC - контур на змінному струмі	56
Лабораторна робота № 9 Спосіб вимірювання частоти і фази невідомого сигналу за допомогою фігур Лісажу	61
Лабораторна робота № 10 Перехідні процеси в RL -колі	67
Лабораторна робота № 11 Вимірювання сталої часу електричного кола, яке містить опір та ємність	72
Лабораторна робота № 12 Вимушені електричні коливання в контурі, який містить індуктивність	79
ОПТИКА	86
Лабораторна робота № 1 Вимірювання фокусних відстаней лінз і моделювання оптичних приладів	86
Лабораторна робота № 2 Вивчення явища інтерференції за допомогою біпризми Френеля	94
Лабораторна робота № 3 Визначення радіуса кривини лінзи за кільцями Ньютона	100
Лабораторна робота № 4 Визначення коефіцієнта заломлення скляної пластини інтерференційним методом.....	106
Лабораторна робота № 5 Вивчення поляризованого світла	110

Лабораторна робота № 6 Експериментальна перевірка рівняння Ейнштейна для фотоефекту і визначення сталої Планка.	121
--	------------