

Лабораторна робота
ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ

Протокол
Варіант № _____

Виконав _____

Група _____

Факультет _____

Мета роботи

1. Вивчити основні закони та характеристики електростатичного поля.

2. Ознайомитися з одним із способів вивчення характеристик електростатичних полів, що ґрунтується на математичному моделюванні на прикладі поля з осью симетрії.

3. Провести експериментальне дослідження електричного поля осью симетрії за допомогою електричного зонда.

4. Експериментально виміряти різницю потенціалів між центральним електродом і точками електропровідного паперу, що знаходяться на різних відстанях від нього.

5. За експериментальними даними різниці потенціалів між центральним електродом і точками електро-

провідного паперу розрахувати напруженість електричного поля.

6. За теоретичними формулами розрахувати різницю потенціалів між центральним електродом і точками електропровідного паперу та розрахувати напруженість електричного поля.

7. За допомогою графічного методу порівняти експериментальні і теоретичні дані отримані в процесі виконання лабораторної роботи.

8. Провести обробку результатів експерименту за допомогою математичної програми, яка приводиться в інструкції до цієї лабораторної роботи.

9.Зробити висновки по роботі.

В даній роботі електричне поле моделюється за допомогою електропровідного паперу. Папір розміщується

на планшеті, на якому закріплюються два коаксіальних циліндричних електроди 1 і 3 (рис.1). На електроди подається постійна напруга від стабілізованого джерела живлення U . Якщо електропровідність середовища мала, то малий і струм, який протікає через це середовище.

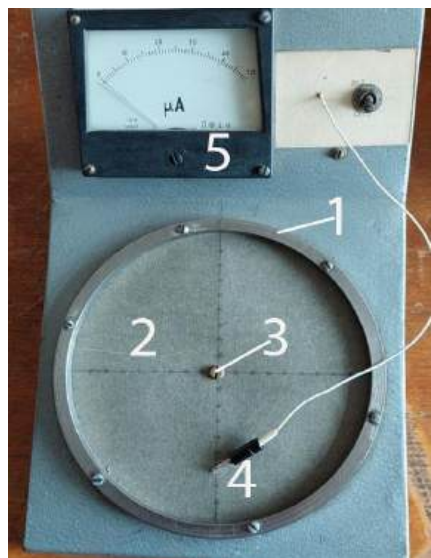


Рис.1 Вид лабораторної установки по дослідженню електричного поля. 1 - зовнішній електрод; 2 – провідний папір; 3 – внутрішній електрод; 4 – зонд; 5 – мікроампер метр.

Для вимірювання різниці потенціалів між двома точками поля в провідному середовищі потрібно доторкнутися до цих точок зондами, під'єднаними до вольтметра. Таким методом на електропровідному папері можна намітити лінії однакового по-

тенціалу. Лінії струму на папері ортогональні до лінії однакового потенціалу і відповідають лініям напруженості електростатичного поля. В даній лабораторній роботі моделюється поле циліндричної симетрії, що існує в циліндричних конденсаторах. Для такої моделі теоретична формула для напруженості поля на відстані r від осі електрода 3 (рис.1, 2 і 3)

$$E(r) = \frac{U_0}{\ln \frac{r_{\text{зовн}}}{r_{\text{внут}}}} \cdot \frac{1}{r}, \quad (1)$$

де U_0 – напруга між електродами 3 і 1 на рис.1; $r_{\text{зовн}}$ і $r_{\text{внут}}$ – радіуси зовнішнього (1) і внутрішнього (3) електродів. Вивід цієї формули приведений в інструкції до роботи.

Із формули (1) для різниці потенціалів (напруги) між електродом 1 (прийнятим за нульовий потенціал) і точкою на електропровідному папері, яка знаходиться на відстані r від осі центрального електрода 3 (рис.1 і 2) можемо отримати, врахувавши що

$$E = -\frac{\partial \phi}{\partial r} = -\frac{\partial U}{\partial r};$$

$$U = \frac{U_0}{\ln \frac{r_{\text{зовн}}}{r_{\text{внут}}}} \cdot \ln \frac{r_{\text{зовн}}}{r}. \quad (2)$$

Опис експериментальної установки

Електрична схема установки для моделювання розподілу потенціалу й напруженості електростатичного поля, що має осьову симетрію, схематично зображена на рис.2, де 1 – зовні-

шній електрод з радіусом $r_{\text{зовніш}}$; 2 – провідний папір; 3 – центральний електрод з радіусом $r_{\text{внутр}}$; 4 – зонд (електрод); 5 – мікроамперметр, який завдяки великому додатковому опорю $R_d \gg 100$ кОм працює в режимі вольтметра; R_d – додатковий опір до мікроамперметра

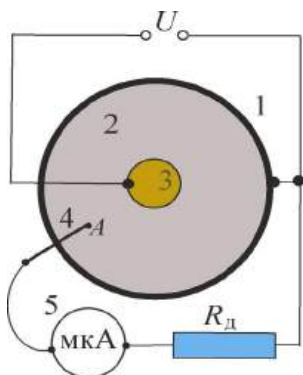


Рис.2. Електрична схема лабораторної установки.

Оскільки додатковий опір R_d є великим у порівнянні з опором ділянки електропровідного паперу між точкою A і зовнішнім електродом, під'єднання вимірювального кола не вносить помітних викривлень у силу струму на цій ділянці і отже, у спад напруги $U(r)$ між точкою A і зовнішнім електродом. Якщо знехтувати опором зони контакту між зондом і електропровідним папером, а також внутрішнім опором мікроамперметра порівняно з величиною R_d , то струм, що протікає через мікроамперметр:

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

де r – відстань від осі електрода 3 до точки A . Вимірюючи силу струму $I(r)$, що протікає через мікроамперметр, для спаду напруги матимемо:

$$U(r) = I(r) \cdot R_d \quad (3)$$

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

$$\langle I(r) \rangle = \frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 I_i(r) \quad (4)$$

Для спаду напруги остаточно матимемо:

$$U(r) = \langle I(r) \rangle \cdot R_d \quad (5)$$

Описана нами установка дає змогу змінювати r від 1 см (внутрішній електрод) до 8 см (зовнішній електрод) із кроком $\Delta r = 1$ см. Значення R_d вказано в даних до робочої установки. Використовуючи обчислені значення $U(r)$, можна знайти залежність напруженості поля в даній точці електропровідного паперу від відстані r . Для цього використовуємо залежність між $E(r)$ і $U(r)$:

$$E(r) = \frac{\Delta U}{\Delta r} = \frac{U(r) - U(r + \Delta r)}{\Delta r} \quad (6)$$

Щоб точніше визначати напруженість поля необхідно відрізки Δr брати як можна меншими. Напруженість поля будемо визначати за такою формулою

$$E(r + 0,5\text{см}) = \frac{U(r) - U(r+1\text{см})}{0,01\text{м}} \quad (7)$$

у вольтах на метр (В/м), якщо $U(r)$ подано у вольтах для точок середин відрізків Δr , які будуть знаходитись на відстанях $r_c = 1,5; 2,5; \dots; 7,5$ см від осі центрального електрода 3 (рис.3).

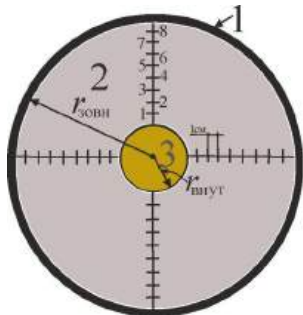


Рис.3.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з установкою. Підготувати установку до роботи. Для цього увімкнути джерело живлення на макеті.

2. Доторкнутися зондом до внутрішнього електрода і записати значення максимального струму I_0 , що протікає через прилад.

3. Вибрати на електропровідному папері промінь (радіус). Встановлювати зонд послідовно в точки цього радіуса на відстані 1,2,3,...,8 см (рис.3) і записати відповідні покази мікроамперметра (5 на рис.2) $I_i(r)$ до другого стовпчика табл.1. Зауваження. Під час вимірювання струму зонд потрібно ставити не на сам промінь, а поряд з ним на електропровідний

папір. Зонд має бути притиснутий до паперу, щоб забезпечити добрий контакт. Про наявність контакту можна дізнатися, спостерігаючи за процесом досягнення струмом максимального значення.

4. Повторити вимірювання, описані в п.3 на 2, 3, 4-му променях. Отримані значення $I_1(r)$, $I_2(r)$, $I_3(r)$ $I_4(r)$ занести до табл.1.

5. Виміряти, користуючись лінійкою, радіуси внутрішнього $r_{\text{внут}}$ та зовнішнього $r_{\text{зовн}}$ електрода. Занести дані до протоколу. Туди ж занести значення R_d , що вказується на установці.

Обробка результатів вимірювань

1. Для кожного значення r (1; 2; 3...8см) визначити середнє значення сили струму за формулою (4) і занести до таблиці 1.

2. Для кожного значення r (1; 2; 3...8см) визначити експериментальне середнє значення спаду напруги $U_{\text{експ}}(r)$ за формулою (5) і занести до таблиці 1

3. За формулою розрахувати $U_0 = I_0 \cdot R_d$.

4. Для кожного значення r (1; 2; 3...8см) визначити теоретичне середнє значення спаду напруги $U_{\text{теор}}(r)$ за формулою (2) і занести до таблиці 1.

5. Побудувати на одному графіку дві криві $U_{\text{теор}}(r)$ і $U_{\text{експ}}(r)$ залежності отриманих напруг від відстані.

6. Для кожного значення r (1; 2; ... 8 см) визначити величини $\ln(r_{\text{зов}}/r)$, результати занести до таблиці 1.

7. Побудувати на одному графіку дві прямі: $U_{\text{теор}}(r) = f(\ln(r_{\text{зов}}/r))$ і $U_{\text{експ}}(r) = f(\ln(r_{\text{зов}}/r))$ залежності отриманої напруги від $\ln(r_{\text{зов}}/r)$.

8. Визначити кутові коефіцієнти двох прямих: $U_{\text{теор}}(r) = f(\ln(r_{\text{зов}}/r))$ і $U_{\text{експ}}(r) = f(\ln(r_{\text{зов}}/r))$ та порівняти їх між собою.

9. Для кожного значення r (1,5; 2,5; ... 7,5см) визначити експериментальне середнє значення напруженості поля за формулою (7) і занести до таблиці 2.

10. Для кожного значення r (1,5; 2,5; ... 7,5см) визначити теоретичне середнє значення напруженості поля за формулою (1) і занести до таблиці 2.

11. Для кожного значення r (1,5; 2,5; ...; 7,5см) визначити обернену величину $1/r$ та $-\ln(r)$, занести до таблиці 2.

12. Побудувати на одному графіку дві криві $E_{\text{теор}}(r)$ і $E_{\text{експ}}(r)$ залежності отриманих напруженостей від відстані.

13. Побудувати на одному графіку дві прямі $E_{\text{теор}}(1/r)$ і $E_{\text{експ}}(1/r)$ - залежності отриманих напруженостей від $1/r$.

14. Визначити кутові коефіцієнти двох прямих: $E_{\text{теор}}(1/r)$ і $E_{\text{експ}}(1/r)$ та порівняти їх між собою.

15. Побудувати на одному графіку дві прямі: $\ln(E_{\text{теор}}) = f(-\ln(r))$

і $\ln(E_{\text{експ}}) = f(-\ln(r))$ залежності логарифму напруженостей від логарифму відстані.

16. Визначити кутові коефіцієнти двох прямих: $\ln(E_{\text{теор}}) = f(-\ln(r))$ і $\ln(E_{\text{експ}}) = f(-\ln(r))$ та порівняти їх між собою.

17. Експериментальні результати опрацювати за методом найменших квадратів за схемою, яка приведена в додатках фізпрактикуму.

Контрольні питання

1. Дати визначення: а) електричного поля; б) напруженості електричного поля; в) силової лінії.
2. Що є енергетичною характеристикою електричного поля?
3. Що таке різниця потенціалів?
4. Дати визначення екіпотенціальної лінії (поверхні).
5. Пояснити зв'язок між напруженістю та потенціалом електричного поля.
6. Що таке градієнт потенціалу?
7. Пояснити, чому дослідження електростатичного поля можна замінити дослідженням розподілу потенціалів в провідному середовищі, через яке протікає постійний струм.
8. Пояснити експериментальну схему для дослідження електричного поля за допомогою електричного зонда.
9. Пояснити суть методу електричного зонда для знаходження в електричному полі точок з однаковим потенціалом.

Література

1. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Фізика (Фізика для інженерів): Підручник /: - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. -

513с. - Доступ:

<http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19035>

2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Т.2. Електрика і магнетизм–К.:, “Техніка”, 2001. – 452 с.

3.Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Обробка результатів фізичних вимірювань.

[Електронний ресурс]: навч. посіб./

КПІ ім. Ігоря Сікорського/: –Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 88 с. -

Доступ:

<http://ela.kpi.ua/handle/123456789/25320>

.

Таблиця 1

№	r м	$I_1(r)$, мкА	$I_2(r)$, мкА	$I_3(r)$, мкА	$I_4(r)$, мкА	$\langle I(r) \rangle$ мкА	$U_{\text{експ}}(r)$ В	$\ln \frac{r_{\text{зовн}}}{r}$	$U_{\text{теор}}(r)$ В
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									

Таблиця 2

№	r , м	$1/r$, 1/м	$-\ln(r)$	$E_{\text{експ}}(r)$, В/м	$E_{\text{теор}}(r)$, В/м	$\ln(E_{\text{експ}})$
1	0,015					
2	0,025					
3	0,035					
4	0,045					
5	0,055					
6	0,065					
7	0,075					

Лабораторна робота
**Вимірювання опору за допомогою містка
постійного струму**

Протокол
Варіант № _____

Виконав _____

Група _____

Факультет _____

Мета роботи

1. Вивчити метод вимірювання опору за допомогою мостової схеми і визначити невідомий опір за допомогою містка постійного струму.

2. Оцінити невизначеність значення визначеного невідомого опору та записати кінцевий результат вимірювання.

Прилади і пристрої

1. Відомі опори R_1, R_2 .
2. Магазин опорів R_m .
3. Невідомі опори R_x (5 штук).
4. Нуль-гальванометр G .
5. Джерело живлення сталого струму на 6 В.
6. Ключ.
7. З'єднувальні проводи.

Установка

Принципова схема методу моста Уїтстона в лабораторній роботі зображена на рис.1. Опори R_x, R_m, R_1, R_2 утворюють собою плечі моста з'єднані так, щоб утворити замкнутий чотирикутник $ABCD$, а гальванометр з нульовою точкою посередині шкали під'єднаний у його діагональ. Опір R_x - це невідомий опір, його потрібно визначити. Опором R_m служить магазин опорів, який підбирається таким чином щоб струм через гальванометр G був відсутній. Це свідчитиме про те, що плечі містка врівноважені.

Тоді за формулою (1) розрахуємо невідомий опір R_x :

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_m \cdot \quad (1)$$

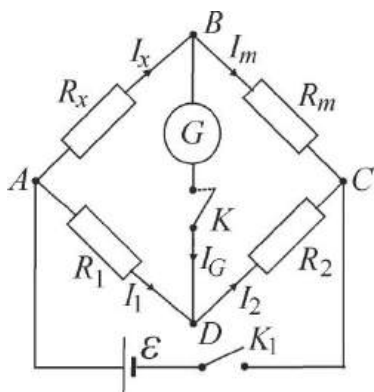


Рис.1. Електрична схема містка сталого струму.

Для того, щоб при вимірюваннях отримати достовірні дані для невідомих опорів, потрібно ключ K замикати на короткий час і тільки під час зняття вимірів. Це пов'язане з тим, що під час протікання струму по провідниках вони нагріваються, а їхній опір збільшується. Недоліком методу містка Уїтстона є те, що до опорів зображених на схемі додається ще опір з'єднувальних проводів, що зменшує точність вимірів.

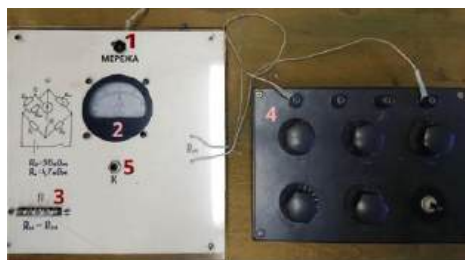


Рис.2. Лабораторна установка. Тут 1 - підключення до мережі, 2 - гальванометр, 3 - вмикання в схему невідомих опорів R_x , 4 - магазин опорів R_m , 5 - ключ K .

Порядок виконання

В установку по черзі вмикаються 5 невідомих опорів R_x . Їх величину опору потрібно визначити, користуючись методом містка Уїтстона.

Порядок вимірів:

1. Увімкнути джерело живлення постійного струму (ϵ В).
2. Перемикачем на установці увімкнути у електричне коло перший невідомий опір R_x .
3. На магазині опорів виставити довільне значення опору R_m і на короткий час замкнути ключ K (див. рис.1, 2). Змінюючи R_m домогтися, щоб при замиканні ключа K стрілка гальванометра залишалася на нулі.
4. Записати значення опору R_m у таблицю 1.
5. Увімкнути у коло наступний невідомий опір і повторити вимірювання пунктів 3 і 4.
6. Повторити вимірювання для всіх невідомих опорів R_x .
7. Переписати з установки значення відомих опорів R_1 , R_2 та клас точності K магазину опорів. **Увага!** Позначення опорів на схемі у різних лабораторіях можуть відрізнятися, тому переписуючи значення опорів звіряйте правильність позначення за їхнім розташуванням у схемі лабораторної установки.

Обробка результатів вимірювань

1. За формулою (1) розрахувати значення невідомих опорів R_x та занести до таблиці 1.

2. Ознайомитися з теорією обробки результатів фізичних вимірювань в посібнику [2]. Для одного з знайдених опорів порахувати сумарну невизначеність типу В. За формулою (2.3.1) [2]:

$$U_B(R_x) = \sqrt{\sum_{i=1,2,m} \left(\frac{\partial R_x}{\partial R_i} U_B(R_i) \right)^2}$$

Вважаючи відносну похибку стандартних заводських опорів $\delta_R = 5\%$, знайти невизначеності опорів R_1 і R_2 . За формулою (2.2.9) [2]:

$$U_B(R_1) = \frac{\delta_R R_1}{\sqrt{3}} = \frac{0,05 R_1}{\sqrt{3}} \text{ Ом} \quad \text{та}$$

$$U_B(R_2) = \frac{\delta_R R_2}{\sqrt{3}} = \frac{0,05 R_2}{\sqrt{3}} \text{ Ом.}$$

Невизначеність опору R_m з магазину опорів визначити за формулою (2.2.9) [2]:

$$U_B(R_m) = \frac{K_m R_N}{100\sqrt{3}},$$

де K_m – клас точності магазину опорів, $R_N = R_{max}$ – нормуюча величина, що визначається максимальним опором, який можна виставити тими ж ручками на магазині опорів, які застосовувались для підбору опору R_m . Записати отриману невизначеність у таблицю 2.

3. Знайти розширену невизначеність за формулою (2.3.5) [2]:

$$U(R_x) = k U_B(R_x),$$

де коефіцієнт охоплення k прийняти рівним 2, що відповідає рівню довіри $P = 0,95$. Записати кінцевий результат у таблицю 2. Див. додатки 5,6 обробки даних вимірювань у фізпрактикумі.

4. Написати висновок по роботі.

Контрольні запитання

1. Сформулюйте закон Ома для однорідної ділянки кола, неоднорідної ділянки кола та повного кола.
2. Сформулюйте правила Кірхгофа.
3. Що називається вузлом в електричному колі?
4. У чому полягає мостовий метод вимірювання опору?
5. За яких умов плечі мостової схеми (містка Уїтстона) врівноважені?
6. Виведіть робочу формулу (1).

Що впливає на точність методу вимірювання невідомого опору за допомогою містка сталого струму? Проаналізуйте відповідь.

ЛІТЕРАТУРА

1. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Фізика (Фізика для інженерів): Підручник / - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017.- 513с. - Назва з екрану. - Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19035>
2. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Обробка результатів фізичних вимірювань. навч. посіб./ КПІ ім. Ігоря Сікорського. -2018.- 88с.-Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/25320>

3. Лопатинський Е.С., Зачек І. Р., Ільчук Г. А., Романишин Б.М.. Фізика. Підручник. – Львів: Афіша, 2009.-386с.

4. Кучерук І.М., Горбачук І.І., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Електрика й магнетизм.- К: Техніка, 2001р.

5. Скілько І.Ф., Корнієнко Є.Г. Вивчення законів постійного струму на прикладах містка Уїтстона та компенсаційної схеми: Інструкція до лабораторних робіт [Електронний ресурс] : навч. посіб.- Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 60 с. Доступ. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/4871>
5

Таблиця 1

$R_1 =$	_____ Ом	$R_2 =$	_____ Ом		
R_m					
R_x					

Таблиця 2

$R_x =$	
Клас точності магазину опорів $K_m =$	
Нормуюча величина $R_N =$	
Сумарна невизначеність типу В $U_B(R_x) =$	
Відповідь: $R = R_x \pm U(R_x) =$ $\delta = \frac{U(R_x)}{R_x} \cdot 100\% =$	

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
кафедра загальної фізики

Лабораторна робота
**Вимірювання електрорушійної сили
методом компенсації**

Протокол
Варіант № _____

Виконав _____

Група _____

Факультет _____

Мета роботи

1. Вивчити компенсаційний метод вимірювання електрорушійної сили (далі е.р.с.) і виміряти значення невідомої е.р.с. цим методом.

2. Оцінити невизначеність значення визначеної невідомої е.р.с. та записати кінцевий результат вимірювання.

3. Зробити висновки по роботі.

Електрорушійна сила (е.р.с.) гальванічного елемента чисельно дорівнює роботі сторонніх сил по переміщенню одиничного позитивного заряду на ділянці дії цих сил. При розімкнутому колі е.р.с. гальванічного елемента дорівнює різниці потенціалів, яка виникає на його полюсах.

Якщо різниця потенціалів U вимірюється при наявності струму, то

вона завжди є меншою за е.р.с. \mathcal{E} через падіння напруги на внутрішньому опорі елемента r , тобто

$$U = \mathcal{E} - I \cdot r, \quad (1)$$

де I – струм через елемент, r внутрішній опір елемента. Тому звичайні вольтметри, дія яких пов’язана з протіканням електричного струму через рамку приладу, не застосовуються для точного вимірювання е.р.с., особливо малих значень е.р.с. Визначення е.р.с. елементів виконується шляхом порівняння з е.р.с. еталонного, так званого нормального елемента, який має відоме і стабільне значення е.р.с. протягом значного проміжку часу ($\mathcal{E}_n = 1,01860$ В) (див. додаток 4). Це робиться за допомогою компенсаційної схеми з

реохордом AC , яка представлена на рис.1.

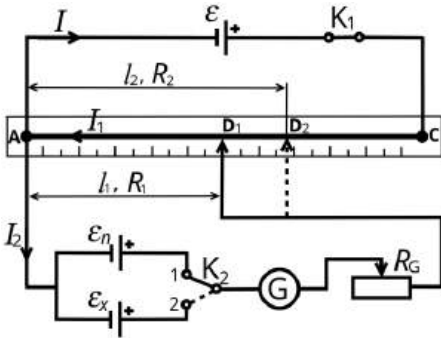


Рис.1 Компенсаційна схема для вимірювання невідомої ЕРС.

На схемі G – нуль-гальванометр; AC – реохорд з рухомих контактом D ; K_1 – ключ для увімкнення допоміжної батареї E ; K_2 – ключ для почергового увімкнення в коло “нормального” елемента E_n і елемента з невідомою е.р.с. E_x ; R_G – додатковий опір для обмеження струму через гальванометр. “Нормальний” елемент E_n , невідома е.р.с. E_x і додаткова батарея E вмикається в коло в точці A однойменними полюсами.

Гальванометр G показує силу струму, який протікає через “нормальний” елемент E_n або невідоме джерело е.р.с. E_x , в залежності від положення ключа K_2 .

Якщо джерело невідомої е.р.с. не ввімкнуте в схему (ключ K_2 в положенні (1)), то згідно з першим правилом Кірхгофа для вузла A можемо записати, що

$$I = I_1 - I_2, \quad (2)$$

де I, I_1, I_2 – струми, протікання яких показано на рис.1. За другим правилом Кірхгофа для контура $AD_1R_G E_n A$ отримасмо рівняння:

$$I_2 R_G + I_1 R_1 = E_n, \quad (3)$$

де R_G – опір ділянки кола з гальванометром.

Переміщуючи контакт D , можна добитись, щоб струм I_2 дорівнював нулю, що фіксується по відсутності відхилення стрілки гальванометра G (положення контакту D_1). При $I_2 = 0, I = I_1$ із рівнянь (2) і (3) отримасмо:

$$I_1 R_1 = E_n. \quad (4)$$

Таким чином спад напруги $I_1 R_1$ на ділянці кола AD_1 за величиною дорівнює е.р.с. “нормального” елемента E_n . Вони компенсують одне одного так, що струм через нормальний елемент дорівнює нулю. Далі замість “нормального” елемента E_n за допомогою ключа K_2 (положення (2)) вмикаємо елемент з невідомою е.р.с. E_x . Переміщуючи рухомий контакт D , знову добиваємось, щоб струм через гальванометр не протікав. При цьому положення контакту D буде іншим (положення D_2 на рис.1), ніж у випадку з «нормальним» елементом і опір ділянки AD_2 , буде мати інше значення. Позначимо цей опір R_2 . Однак і в цьому випадку за відсутності струму через гальванометр, тобто $I_2 = 0$ по-

винна виконуватися умова, аналогічна до попередньої (4), тобто

$$I_1 R_2 = \mathcal{E}_x. \quad (5)$$

Із співвідношень (4) і (5) отримуємо

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\mathcal{E}_n}{\mathcal{E}_x}, \quad (6)$$

або

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_n \frac{R_2}{R_1}. \quad (7)$$

Компенсаційний метод вимірювання невідомої е.р.с. не вимагає знання самих значень опорів R_1 і R_2 , а лише їх відношення, яке може бути встановлене за допомогою рухомого контакту D . Для однорідного проводу, з якого виготовлений реохорд AC , опори окремих його ділянок відносяться між собою як їхні довжини. Тому відношення опорів в рівнянні (7) можна замінити відношенням довжин ділянок реохорда AD_2 і AD_1 , тобто

$$\frac{AD_2}{AD_1} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{l_2}{l_1}.$$

Тоді робоча формула для визначення невідомої е.р.с. буде мати вигляд:

$$\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_n \frac{l_2}{l_1}. \quad (8)$$

Прилади та пристрої

1. Нормальний елемент Вестона.
2. Елемент з невідомою е.р.с.
3. Джерело сталого струму УИП-2
4. Нуль-гальванометр G .
5. Реохорд.
6. Обмежувальний опір.
7. Ключі.

8. З'єднувальні проводи.

9. Лінійка.

Установка

Схема установки для вимірювання електрорушійної сили е.р.с. джерела струму методом компенсації зображена на рис.1, а лабораторна установка на рис.2.

Як джерело \mathcal{E} сталого струму використано стабілізоване електронне джерело на 3-9 В (універсальне джерело УИП-2), як еталонне джерело з відомою е.р.с. \mathcal{E}_n - нормальний елемент Вестона. Електрорушійні сили \mathcal{E}_n та \mathcal{E}_x компенсуються падінням напруги на ділянці AD реохорда AC . Ключ K_2 служить для замикання кола гальванометра G на нормальний елемент \mathcal{E}_n (позиція 1) або елемент з невідомою е.р.с. \mathcal{E}_x (позиція 2).

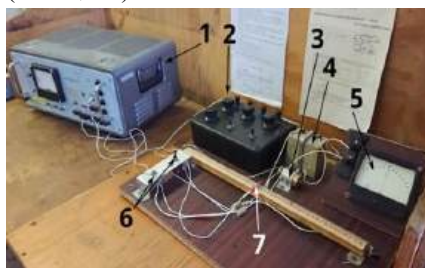


Рис.2. Лабораторна установка. 1 - джерело сталого струму УИП-2, 2 - додатковий опір R_G , 3 - джерело живлення з невідомою е.р.с (\mathcal{E}_x), 4 - нормальний елемент Вестона (\mathcal{E}_n), 5 - гальванометр G , 6 - ключі для підключення е.р.с \mathcal{E}_x та \mathcal{E}_n , 7 - повзунок реохорда D .

Щоб уникнути протікання великого струму через чутливий галь-

ванометр G за відсутності компенсації в коло введено обмежувальний опір R_G .

Порядок виконання роботи

1. Поставити ключ K_2 у нейтральне положення.

2. Встановити повзунок реохорда D приблизно посередині.

3. Ввести обмежувальний додатковий опір R_d і замкнути ключ K_1 .

4. Поставити ключ K_2 у положення 1 (замкнути у коло гальванічний елемент \mathcal{E}_n з відомою е.р.с.).

Переміщуючи повзунок реохорда D знайти таке його положення, при якому струм у колі гальванометра буде дорівнювати нулю.

5. Поставити ключ K_2 у нейтральне положення і зменшити опір R_G до нуля. Потім поставити K_2 у положення 1 і переміщенням повзунка D реохорда AC остаточно встановити стрілку гальванометра на нуль. Визначити довжину ділянки реохорда $AD_1 = l_1$ та записати її в таблицю 3. Повторити вимірювання 5 разів та занести результати в таблицю 1.

6. Поставити ключ K_2 у положення 2 (замкнути у коло елемент \mathcal{E}_x з е.р.с., яку потрібно визначити). Провести вимірювання аналогічні пунктам 4 та 5 і визначити довжину ділянки реохорда $AD_2 = l_2$. Повторити вимірювання 5 разів та записати отримані дані у таблицю 1.

Обробка результатів вимірювань

1. Знайти середні значення $\langle l_1 \rangle$ і $\langle l_2 \rangle$.

2. За формулою $\mathcal{E}_x = \mathcal{E}_n \frac{\langle l_2 \rangle}{\langle l_1 \rangle}$ знайти е.р.с. невідомого елемента.

3. Розрахувати сумарну стандартну невизначеність типу А за формулою

$$U_{CA}(\mathcal{E}_x) = \sqrt{\left(\frac{\partial \mathcal{E}_x}{\partial l_1} U_A(l_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathcal{E}_x}{\partial l_1'} U_A(l_1')\right)^2},$$

де стандартні невизначеності типу А довжин l_1 та l_1' знаходяться за формулами

$$U_A(l_1) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_{1i} - \langle l_1 \rangle)^2}{n(n-1)}},$$

$$U_A(l_1') = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_{1i}' - \langle l_1' \rangle)^2}{n(n-1)}}.$$

4. Розрахувати сумарну стандартну невизначеність типу В за формулою

$$U_{CB}(\mathcal{E}_x) = \sqrt{\left(\frac{\partial \mathcal{E}_x}{\partial \mathcal{E}_n} U_B(\mathcal{E}_n)\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{l_1'}{l_1} U_B(\mathcal{E}_n)\right)^2} = \left|\frac{l_1'}{l_1} U_B(\mathcal{E}_n)\right|,$$

де $U_B(\mathcal{E}_n) = \frac{q}{2\sqrt{3}}$, а q - одиниця найменшого розряду числового значення константи \mathcal{E}_n .

5. Визначити розширену невизначеність за формулою

$$U = k U_C(\mathcal{E}_x),$$

де $U_C(\mathcal{E}_x) = \sqrt{U_{CA}^2(\mathcal{E}_x) + U_{CB}^2(\mathcal{E}_x)}$ - сумарна невизначеність, а k - коефіцієнт охоплення (або коефіцієнт

Стьюдента).

6. Занести всі отримані дані розрахунків в таблицю 1.

Зробити висновок про те, які фактори мали більш суттєвий вплив на точність вимірів і про точність методу вимірювання е.р.с. методом компенсації.

Контрольні запитання

1. Сформулюйте закон Ома для однорідної ділянки кола.

2. Сформулюйте закони Ома для неоднорідної ділянки кола та повного кола.

3. Сформулюйте правила Кірхгофа.

4. Що називається е.р.с. джерела струму та яке її призначення?

5. Яка роль сторонніх сил у електричному колі? Чому ці сили називають сторонніми?

6. З якою метою всі елементи е.р.с. в компенсаційній схемі лабораторної роботи з'єднуються одноіменними полюсами?

7. Навіщо у коло гальванометра G на схемі рис.5 підключається додатковий опір R_G ?

8. Яка роль нормального елемента Вестона у даній роботі?

9. Які переваги компенсаційного методу вимірювання невідомої е.р.с. у порівнянні з безпосереднім її вимірюванням вольтметром? Відповідь пояснити.

10. Вивести робочу формулу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Скілько І.Ф., Скілько О.І. Фізика (Фізика для інженерів): Підручник /: - Київ: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2017.- 513с. - Назва з екрану. - Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19035>
2. Скілько І.Ф., Скілько О.І. Обробка результатів фізичних вимірювань. навч. посіб./ КПІ ім .Ігоря Сікорського. -2018.- 88с.-Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/25320>
3. Лопатинський Е.С., Зачек І. Р., Ільчук Г. А., Романишин Б.М.. Фізика. Підручник. – Львів: Афіша, 2009.-386с.
4. Кучерук І.М., Горбачук І.І., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Електрика й магнетизм.- К: Техніка, 2001р.
5. Скілько І.Ф., Корнієнко Є.Г. Вивчення законів постійного струму на прикладах містка Уїтстона та компенсаційної схеми: Інструкція до лабораторних робіт навч. посіб.— Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. –60с. Доступ.- <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/48715>

Таблиця 1.

n	$l_1, \text{см}$	$l_2, \text{см}$	$\langle \mathcal{E}_x \rangle, \text{В}$
1			
2			
3			
4			
5			
$\mathcal{E}_n = 1,0186 \text{ В}$			
Невизначеності:			
$U_{CA}(\mathcal{E}_x) =$			
$U_{CB}(\mathcal{E}_x) =$			
$U(\mathcal{E}_x) =$			
Кінцевий запис результату визначення \mathcal{E}_x : $\mathcal{E}_x = \langle \mathcal{E}_x \rangle \pm U(\mathcal{E}_x) =$ $\delta =$			

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
кафедра загальної фізики

Лабораторна робота
**Вивчення руху електронів в електричному
і магнітному полях**

Протокол
Варіант № _____

Виконав _____

Група _____

Факультет _____

Мета роботи

1. Вивчити рух заряджених частинок в електричному і магнітному полях.

2. Познайомитись з методом магнетрона для визначення питомого заряду електрона (e/m_e).

3. Визначити питомий заряд електрона e/m_e та оцінити невизначеність цього значення.

4.Зробити висновки по роботі.

Теорія

Для електрона, який вилетів із катода К і має радіальну складову швидкості, яка дорівнює нулю, а також знаючи геометрію лампи, тобто радіус анода r_a і радіус катода r_k , вели-

чину U_a , а також $B_{кр}$, за формулою (1)

визначають величину $\frac{e}{m_e}$:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 r_a^2 \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2}\right)^2}, \quad (1)$$

де e – заряд електрона; m_e – маса спокою електрона; r_a – радіус анода; r_k – радіус катода; U_a – напруга між анодом і катодом (анодна напруга).

Характерною особливістю цього методу є те, що він виключає необхідність вивчення траєкторії руху електрона в магнітному полі. Навпаки, зміною значення величини B (при постійному U_a) досягається наперед задана траєкторія руху електронів, при якій вони не можуть потрапити на анод лампи, всупереч дії електричного

для кожного значення U_a визначити відповідне значення $I_{кр}$. Згідно формули (6) залежність $kU_a = f(I_{кр}^2)$ буде лінійною в координатних осях kU_a і $I_{кр}^2$, як показано на рис.2. Пряму лінію проводимо між експериментальними точками. Нахил цієї прямої лінії $\frac{\Delta(kU_a)}{\Delta(I_{кр}^2)}$ буде дорівнювати експериментально визначеній величині e/m_e . Більше того, можна використати метод найменших квадратів і математично за допомогою програми опрацювати експериментальні дані. Цей метод дозволяє визначити саму величину e/m_e , а також її невизначеність (похибку).

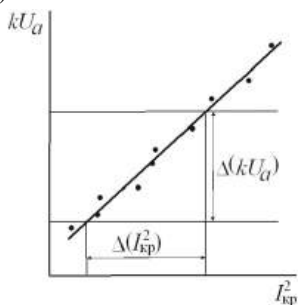


Рис.2.

Опис експериментальної установки

Принципову електричну схему зображено на рис.3. Живлення установки здійснюється універсальним джерелом живлення «УИП-2». Нитка розжарення діода живиться від виходу «6,3 В» через блок живлення розжа-

рення «БПН», що захищає нитку розжарення від перевантажень.

Середня точка кола живлення приєднана до мінуса джерела анодної напруги. Анодне коло живиться від виходу «0-50 В», напругу виходу можна плавно змінювати потенціометром на блоці живлення. У лабораторній роботі використовується діапазон напруги 0-25 В, тому на вході встановлюють подільник напруги R_2 і R_3 , щоб вберегти установку від перевантажень. Для вимірювання анодного струму використовується мікроамперметр до якого під'єднано регулювальний шунт. Для зручності ручку шунта винесено на передню панель установки.

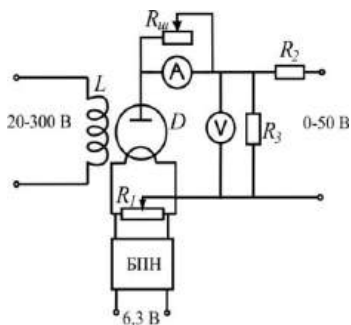


Рис.3. Електрична схема установки.

Соленоїд живиться від виходу «20-300 В» блока живлення. Сила струму соленоїда вимірюється міліамперметром панелі рис.3. Струм соленоїда можна змінювати, регулюючи напругу на вході блока живлення.

Порядок виконання роботи

1. Перед початком роботи переконатися, що ручки потенціометрів які регулюють напругу виходів «20-300 В» і «0-50 В» встановлені в крайнє ліве положення.

2. Увімкнути універсальне джерело живлення «УИП-2» в мережу і дати прогрітися 5 хвилин.

3. За допомогою потенціометра встановити робочу анодну напругу U_a в межах робочого діапазону «3-30 В». Повертаючи ручку регулювального шунта домогтися, щоб стрілка міліамперметра, що вимірює анодний струм I_a , знаходилась у останній третині шкали (за відсутності струму в соленоїді, тобто за умови $I_c = 0$). Занести значення U та I_a (I_a вимірюється у поділках шкали мікроамперметра) в таблицю 1.

4. Ручкою регулювання виходу «20-300В» збільшувати струм соленоїда I_c з кроком 5 мА в діапазоні 40 – 80 мА (область швидкого спаду анодного струму). Значення величин I_c та I_a занести у табл.1. Струм соленоїда збільшувати до досягнення критичного режиму, тобто домогтися стрімкого зменшення анодного струму зі збільшенням струму соленоїда.

5. За допомогою потенціометра встановити іншу робочу анодну

напругу U_a в діапазоні «5-30 В» і повністю повторити вимірювання пунктів 3 і 4. Вимірювання повторювати 6-8 разів для різних значень напруги U_a .

6. Записати вказані на робочо-му місці значення r_a і n у таблицю 2.

Обробка результатів вимірювань

1. Для всіх значень напруги U_a побудувати графіки залежності анодного струму I_a від струму соленоїду I_c .

2. За побудованими графіками залежностей I_a від I_c визначити критичні струми $I_{кр}$. (див. додатки 9, 10 в практикумі)

3. Отримані значення занести до таблиці 3.

4. Розрахувати величини kU_a та $I_{кр}^2$ та занести їх у таблицю 3.

5. Побудувати графік залежності kU_a від $I_{кр}^2$.

6. За нахилом $\frac{\Delta(kU_a)}{\Delta(I_{кр}^2)}$ цієї прямої лінії розрахувати величину e/m_e .

7. Порівняти отримане значення e/m_e з табличним значенням e/m_e .

8. Використати метод найменших квадратів і математично за допомогою програми визначити

нахил прямої лінії $\frac{\Delta(kU_a)}{\Delta(I_{кр}^2)}$ і тоді обчислити значення величини e/m_e .

9. Визначити граничну невизначеність (похибку) величини e/m_e . Програма дає значення середньої квадратичної похибки середнього арифметичного величини нахилу прямої $\frac{\Delta(kU_a)}{\Delta(I_{кр}^2)}$.

10. Порівняти отримані значення e/m_e з його табличною величиною.

11. Записати кінцевий результат визначення e/m_e .

12. Написати висновки по роботі

Контрольні питання

1. Як рухаються заряджені частинки в електричному полі?
2. Як рухаються заряджені частинки в магнітному полі?
3. Написати формулу для сили Лоренца та пояснити її.
4. Чи змінює магнітне поле енергію зарядженої частинки, яка рухається в ньому? Відповідь пояснити.
5. Заряджена частинка влітає у взаємно перпендикулярні електричне і магнітне поля. За якої умови частинка буде рухатись рівномірно і прямолінійно?
6. Від чого залежить період обертання зарядженої частинки, яка рухається в магнітному полі?

7. Який вигляд матиме траєкторія заряджених частинок, що влітають із сталою швидкістю v у магнітне поле з індукцією B , якщо а) $\vec{v} \perp \vec{B}$; б) \vec{v} утворює з \vec{B} деякий кут? Поясніть відповідь.

8. Як рухається заряджена частинка, що влітає в електричне поле, силові лінії якого паралельні напрямку її швидкості?

9. Які можливі траєкторії руху електронів в магнетроні при різних значеннях індукції магнітного поля B (покажіть траєкторії на рисунку)? Що таке критичне поле $B_{кр}$?

10. Що обумовлює плавну залежність анодного струму магнетрона від індукції магнітного поля в соленоїді ($I_a = f(B)$)?

11. Як виводиться формула для величини індукції магнітного поля всередині безмежно довгого соленоїда?

12. Як впливає зміна характеристик електричного E і магнітного B полів на форму траєкторії руху електрона в даній лабораторній роботі?

13. Чи потрібне для розрахунків абсолютне значення анодного струму I_a ?

14. Що найбільш суттєво впливає на точність визначення питомого заряду електрона e/m_e в даній лабораторній роботі?

15. Який прилад називається магнетроном? Які фізичні явища лежать в

основі його роботи? Де на практиці використовують магнетрони?

ЛІТЕРАТУРА

1. Черкашин В.П. Методичні вказівки до лабораторних робіт з фізики для студентів усіх форм навчання: Частина 1. Електрика і магнетизм. – К.:КІП, 1992. – 57-64 с.
2. Бабич Н.Л., Гриценко Ю.И., Мартинюк А.В., Мацуї І.П., Тычинский А.В., Халимонова І.Н., Харченко Н.П. Курс фізики (практикум). – К.: Вища школа, 1992. – с.88 – 93.

3. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. В 3 т. Т.2 Електрика і магнетизм. К.:Техніка, 2001 р.
4. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Обробка результатів фізичних вимірювань. Навч. посіб./ КІП ім .Ігоря Сікорського/: —Київ: КІП ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 88 с. - Назва з екрану. - Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/25320>

Таблиця 1

	$U_1=$ В	$U_2=$ В	$U_3=$ В	$U_4=$ В	$U_5=$ В	$U_6=$ В	$U_7=$ В	$U_8=$ В
$I_c,$ мА	$I_a,$ под	$I_a,$ под	$I_a,$ под	$I_a,$ под	$I_a,$ под	$I_a,$ под	$I_a,$ под	$I_a,$ под
40								
45								
50								
55								
60								
65								
70								
75								
80								

Таблиця 2

Визначення коефіцієнта k :	
$\mu_0, \text{Гн/м}$	
$n, 1/\text{м}$	
$r_a, \text{м}$	
$k = \frac{8}{\mu_0^2 n^2 r_a^2},$ $\text{А}^2\text{Кл}/(\text{кгВ})$	

Таблиця 3

№	$U_a,$ В	$I_{кр},$ мА	$kU_a,$ $\text{А}^2\text{Кл}/\text{кг}$	$(I_{кр})^2,$ мА^2
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

Лабораторна робота

Вивчення магнітних властивостей феромагнетика у змінних магнітних полях

Протокол

Варіант № _____

Виконав _____

Група _____

Факультет _____

Мета роботи

1. Дослідити процеси намагнічування та перемагнічування феромагнетиків у змінному магнітному полі.

2. Дослідити залежність індукції магнітного поля та проникності феромагнетика від напруженості магнітного поля.

3. Визначити залишкову індукцію, коерцитивну силу, максимальну і початкову магнітну проникність.

4. Зробити висновки по роботі.

Опис експериментальної установки

Для одержання петлі гістерезису у змінному магнітному полі використано установку (рис.1), принципова схема якої зображена на рис.2, [3].

Феромагнетиком, який досліджується, є осердя трансформатора T . Первинна обмотка трансформатора живиться від джерела змінного струму і має N_1 витків. Джерелом струму є УИП-2 (вихід "0-15 В"), але може бути використане і будь-яке інше джерело живлення.



Рис.1.

Первинна обмотка трансформатора служить для створення змінного магнітного поля H , що намагнічує осердя трансформатора. Величина H пов'язана зі

спадом напруги U_x на резисторі R_1 у колі первинної обмотки наступним співвідношенням:

$$H = \frac{N_1}{l_1} I_1 = \frac{U_x}{R_1} n_1 = \frac{n_1}{R_1} U_x = k_1 U_x, \quad (1)$$

де l_1 – довжина первинної обмотки; I_1 – сила намагнічуючого струму; n_1 – число витків намагнічуючої обмотки на одиницю довжини; $k_1 = \frac{n_1}{R_1}$ – коефіцієнт пропорційності.

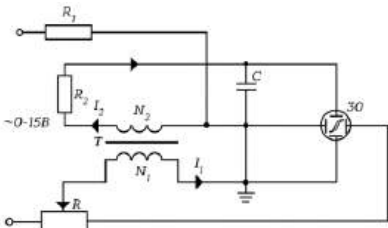


Рис.2.

Напруга з резистора R_1 подається на вхід горизонтального підсилювача електронного осцилографа. Таким чином, на вхід X осцилографа подається напруга, пропорційна напруженості магнітного поля H .

Співвідношення між $U_2 = U_y$ і B :

$$B = \frac{R_2 C}{N_2 S} U_y = k_2 U_y, \quad (2)$$

де

$$k_2 = \frac{R_2 C}{N_2 S} \quad (3)$$

коефіцієнт пропорційності.

Таким чином, напруга на конденсаторі C , яка подається на вхід Y осцилографа, є пропорційною індукції маг-

нітного поля B у феромагнітному осерді.

Якщо подавати на горизонтально відхиляючі пластини напругу U_x , а на вертикально відхиляючі – U_y , то відбувається додавання двох взаємно перпендикулярних коливань електронного променя відносно положення рівноваги – центра екрана осцилографа.

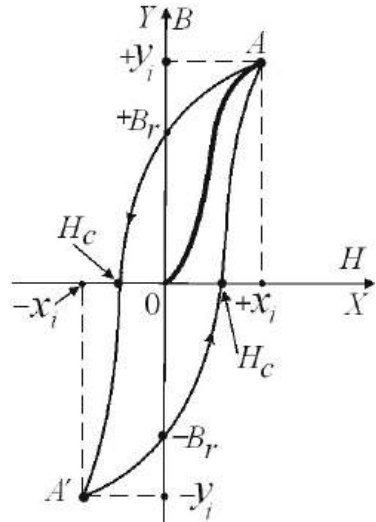


Рис.3.

У результаті за повний період коливань промінь створить на екрані осцилографа в деякому масштабі петлю гістерезиса, як це й впливає із співвідношень (1) і (2). Отримана петля може бути основою для вивчення магнітних характеристик феромагнетика.

Змінюючи величину напруги, яка подається в коло первинної котушки можна отримати цілий набір петель

гістерезису, точки A і A' (рис.3) яких будуть описувати симетричні відносно початку координат основні криві намагнічування. Будемо для кожної заданої напруги визначати координати точок $A(+x_i; +y_i)$ і $A'(-x_i; -y_i)$, як показано на рис.3. Для обчислення B і H напруги U_x та U_y можна подати через величини, що визначаються експериментально, – чутливість C_x горизонтального і C_y вертикального каналів осцилографа:

$$U_x = x C_x \text{ і } U_y = y C_y, \quad (4)$$

де x і y – кількість поділок сітки екрана осцилографа, які визначають координати точок A і A' . З урахуванням співвідношення (4) співвідношення (1) і (2) матимуть такий робочий вигляд:

$$H = k_1 C_x \cdot x = \alpha \cdot x \quad (\alpha = k_1 C_x); \quad (5)$$

$$B = k_2 C_y \cdot y = \beta \cdot y \quad (\beta = k_2 C_y). \quad (6)$$

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути осцилограф і блок живлення в мережу та дати їм прогрітись 5÷7 хв.

2. Ручку потенціометра R встановити в крайню ліву позицію, що відповідає відсутності струму у намагнічуючій обмотці трансформатора.

3. Ручками керування променем осцилографа встановити в центр екрана світлову пляму. Ручки «ПІДСИЛЕННЯ X » і «ПІДСИЛЕННЯ Y » повинні бути виведені в крайні ліві позиції (підсилення дорівнює нулю).

4. За допомогою потенціометра R встановити в намагнічуючій обмотці струм, потрібний для насичення феромагнетика. У цьому ж режимі, за допомогою ручки «ПІДСИЛЕННЯ», домогтися того, щоб петля гістерезису мала правильну форму й займала всю площу екрана. (Ці операції виконуються під керівництвом викладача або лаборанта).

5. Повернути ручку потенціометра R у крайню ліву позицію.

6. Потенціометром R поступово збільшувати амплітуду струму в колі намагнічування і при кожному значенні цього струму фіксувати координати x_i та y_i крайніх точок (A і A' на рис. 3) для кожної кривої гістерезису. Вимірювання виконати для десяти значень струму, доводячи криву гістерезису до граничної. Силу намагнічуючого струму бажано збільшувати так, щоб напруженість зростала на однакову величину. Результати записати в табл.1.

7. Перерисувати граничну петлю гістерезису з екрана осцилографа на міліметровку. Відкласти на осях величину ціни поділки сітки екрана осцилографа.

Рекомендуємо, скористатися фотоапаратом мобільного телефона і весь набір петель гістерезису на екрані осцилографа сфотографувати. Ці фотографії в подальшому використати для обробки результатів експерименту.

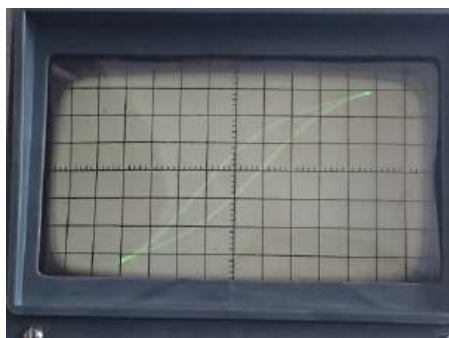


Рис.4.

На рис.4 приведена осцилограми петлі гістерезису для максимального струму в котушці намагнічування.

8. Після закінчення роботи, не змінюючи позиції ручки "ПІДСИЛЕННЯ" осцилографа, під керівництвом викладача або лаборанта виконати калібрування каналів X та Y для визначення чутливостей C_x та C_y .

Обробка результатів вимірювань

1. Для кожного значення намагнічуючого струму обчислити середні значення координат x_i та y_i :

$$\langle x_i \rangle = \frac{|+x_i| + |-x_i|}{2}; \quad \langle y_i \rangle = \frac{|+y_i| + |-y_i|}{2};$$

2. За значеннями величин n_1, R_1, C_1, n_2, S , а також C_x і C_y обчислити коефіцієнти k_1, k_2, α, β .

3. За формулами (5), (6) обчислити H_i та B_i для всіх дослідів і результати занести до табл.1.

4. За формулою $B = \mu_0 H$ і одержаними значеннями, H_i і B_i розрахува-

ти відносну магнітну проникність μ_i для всіх дослідів. Дані розрахунків записати у табл.1.

5. На одному графіку побудувати основну криву намагнічування $B(H)$ і залежність магнітної проникності від напруженості поля $\mu(H)$. З графіка $\mu(H)$ визначити максимальне значення магнітної проникності μ_{\max} . Перевірити це значення, використовуючи формулу ($B = \mu_0 H$). Для цього знайти координати точки 2 на рис.19,а (див. інструкцію до роботи), а саме H_2 і B_2 . Тоді за формулою

$$\mu_{\max} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{B_2}{H_2}$$

розрахувати це значення проникності.

6. З побудованої основної кривої намагнічування визначити графічним методом (див.рис.19,а з інструкції до роботи) **порядок** величини початкової відносної магнітної проникності $\mu_{\text{почат}}$. Для цього необхідно визначити нахил прямої лінії 03 на рис.19,а (див. інструкцію в практикумі), як $\Delta B / \Delta H$. І із врахуванням формули $B = \mu_0 H$ за формулою:

$$\mu_{\text{почат}} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H}$$

розрахувати початкову відносну магнітну сприйнятливості. Врахувати це значення $\mu_{\text{почат}}$ при побудові графіка залежності $\mu(H)$.

7. Скориставшись перекресленою на міліметровці петлею гістерезису для

режиму насичення (табл.1 десята колодка), а ще краще фотографією цієї петлі гістерезису, знайти середнє значення координат точок H_c та B_r (рис.3) у поділках сітки осцилографа:

$$\langle x_c \rangle = \frac{|+x_c| + |-x_c|}{2}, \quad \langle y_c \rangle = \frac{|+y_c| + |-y_c|}{2};$$

$$\langle x_r \rangle = \frac{|+x_r| + |-x_r|}{2}, \quad \langle y_r \rangle = \frac{|+y_r| + |-y_r|}{2};$$

Дані занести до табл.2.

8. За формулами (5) і (6) визначити коерцитивну силу H_c і залишкову індукцію речовини феромагнетика (осередя) B_r . Результати обчислень занести до табл.2 і до табл.3.

9. Отримані експериментально або обчислені за формулами значення μ_{\max} , $\mu_{\text{почат}}$, H_c , B_r занести до табл.3 і порівняти з довідниковими даними [1, стор. 117], або з табл.4.2 на сторінці 100 цього фізпрактикуму.

10. Зробити висновки по роботі.

Контрольні питання

1. Які ви знаєте джерела магнітного поля? Як проявляється наявність у просторі магнітного поля? Якими параметрами характеризують магнітне поле?

2. Які речовини називаються магнетиками?

3. За допомогою яких фізичних величин проводять класифікацію магнетиків?

4. Які існують види магнетиків? Які властивості діа- та парамагнетиків?

5. Які речовини є феромагнетиками?

6. Які існують характеристики магнітного поля в речовині?

7. Що таке процес намагнічування магнетика? Який фізичний зміст вектора намагнічування?

8. Що таке магнітне насичення?

9. Які способи розмагнічування ви знаєте?

10. Який існує зв'язок між вектором напруженості \vec{H} і вектором індукції \vec{B} магнітного поля в феромагнетиках?

11. Схематично зобразити залежність індукції магнітного поля від напруженості магнітного поля у феромагнетиках. Пояснити цю залежність.

12. Записати співвідношення між складовими векторів B і H на межі двох магнетиків.

13. Який фізичний зміст магнітної проникності феромагнетика? Як залежить магнітна проникність від напруженості магнітного поля і як пояснюється ця залежність?

14. У чому суть явища магнітного гістерезису?

15. Що таке коерцитивна сила і залишкова намагніченість?

16. Як одержати петлю гістерезису?

17. В чому полягає метод дослідження феромагнетиків в змінному магнітному полі?

18. Розкажіть порядок виконання роботи та обробки результатів вимірювань

19. Яка природа феромагнетизму? Що таке домени? Як вони реагують на магнітне поле?

20. Що таке точка Кюрі для феромагнетика?

21. Що таке чутливість осцилографа за напругою?

22. Який вигляд має принципова схема експериментальної установки для вивчення магнітного гістерезису і який принцип її роботи?

23. Чому значення магнітної проникності для різних феромагнетиків не приводяться в довідникових таблицях?

24. Дати визначення коерцитивної сили та залишкової намагніченості для феромагнетика.

25. Які феромагнетики мають назву магніто-м'яких та магнітожорстких?

26. Де в техніці зв'язку застосовують феромагнетики?

ЛІТЕРАТУРА

1. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Фізика (Фізика для інженерів): Підручник /: — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. — 513с. - Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19035>

2. Калашніков С.Г. Електрика. - Київ: «Радянська школа», 1964. - 630 с.

3. Черкашин В.П. Методичні вказівки до лабораторних робіт з фізики для студентів усіх форм навчання: Частина 1. Електрика і магнетизм. – К.:КПІ, 1992. – 57-64 с.

4. Черкашин В.П. Методичні вказівки до лабораторних робіт з фізики для студентів усіх форм навчання: Частина 2. Електрика і магнетизм. – К.:КПІ, 1993. – 7-18 с.

5. Е.С. Лопатинський, І. Р. Зачек, Г. А. Ільчук, Б.М. Романишин. Фізика. Підручник. – Львів: Афіша, 2009.-386с.

6. Кучерук І.М., Горбачук І.І., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Електрика й магнетизм.- К: Техніка, 2001.

7. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Обробка результатів фізичних вимірювань. Навч. посіб./ —Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. — 88 с. - Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/25320>

Таблиця 1

Координати точок А і А' експеримент. петель гістерезису	Дані вимірювання									У режимі насищення	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		10
$ +x_i $											
$ -x_i $											
$\langle x_i \rangle$											
H_i											
$ +y_i $											
$ -y_i $											
$\langle y_i \rangle$											
B_i											
μ_i											

Таблиця 2

$ +x_c $	$ -x_c $	$\langle x_c \rangle$	$H_c, \frac{A}{M}$	$ +y_r $	$ -y_r $	$\langle y_r \rangle$	$B_r, Tл$

Таблиця 3

Фізичні величини	$H_c, A/M$	$B_r, Tл$	μ_{max}	$\mu_{почат.}$
Дані експериментальні				
Дані довідникові				

Лабораторна робота
Дослідження електричних згасаючих коливань

Протокол
Варіант № _____

Виконав _____

Група _____

Факультет _____

Мета роботи

1. Дослідження згасаючих коливань. Визначення характеристик коливального контуру (логарифмічний декремент, добротність) та їх залежність від параметрів контуру.

2. Визначити активний опір катушки та її індуктивність, оцінити їх невизначеності. Визначити власну частоту контуру і коефіцієнт згасання.

3. Переконатись у справедливості наближених формул для розрахунку логарифмічного декремента згасання і добротності коливальної системи для двох значень ємності в даній роботі.

4. Зробити висновки по роботі.

Опис установки і методика вимірювань

Для вивчення згасаючих коливань використовують електричну

схему з генератором імпульсів (рис.1) і лабораторну установку на рис.2.

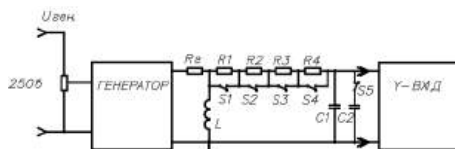


Рис.1.

Кожен імпульс генератора збуджує в коливальному контурі коливання, які є згасаючими. Ці коливання йдуть одне за одним і на екрані осцилографа можна одержати стійку картину згасаючих коливань.

Вмикаючи в коливальний контур різні активні опори можна вивчити їх вплив на характер згасання коливань.

Вимірювальна установка складається з наступних основних вузлів: генератора імпульсів, контуру і осци-

логафа (рис.1 і 2). Генератор імпульсів формує імпульси напруги, що надходять на конденсатор C контура.



Рис.2.

При розряді конденсатора в контурі виникають вільні згасаючі коливання. Реєструється цей коливальний процес за допомогою осцилографа: на його екрані бачимо картину згасаючих коливань (рис.3). Тривалість імпульсів τ генератора багато менше періоду T_r їхнього повторення так, що в інтервалі $(T_r - \tau)$ між імпульсами коливання в контурі встигають згасати до надходження на конденсатор наступного імпульсу.

Порядок виконання роботи

1. З'єднати вхід осцилографа з виходом макета. Переконавшись, що ручка напруги живлення генератора знаходиться в крайньому лівому положенні.

2. Увімкнути осцилограф і лабораторний макет у мережу і дати прогрітися $5 \div 10$ хв.

3. Ручкою потенціометра R_0 на макеті (рис.2) збільшити напругу живлення генератора імпульсів та домогтися появи сигналу на екрані осцилографа. Підібрати підсилення каналу "Y" осцилографа таким чином, щоб амплітуда вертикального зміщення променя була дещо меншою від висоти екрана.

4. Підібрати частоту розгортки осцилографа такою, щоб зображення згасаючих коливань зайняло більшу частину екрана (рис.2).

5. Регулюючи частоту генератора домогтися, щоб коливання встигали достатньо згасати до приходу наступного імпульсу в коливальний контур.

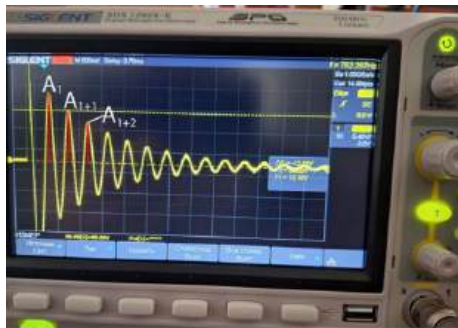


Рис.3. Згасаючі коливання на екрані осцилографа.

6. Увімкнути перемикачами S1-S4 один з опорів R_1-R_6 і визначити величину якого-небудь максимуму A_1

й одного з наступних максимумів, наприклад, A_{1+1} (рис.3) для ємності C_1 . Результати записати у таблицю 1. Досліди повторити для 5 – 6 значень опорів R_1 - R_6 . Примітка. При включених перемикачах S1-S4 опір коливального контуру дорівнює активному опору котушки R_L .

7. Перемикачем S5 (рис.1) включити ємність контуру C_2 і повторити вимірювання п.6. Дані вимірювань занести в табл.2. **Таблиця 2 по формі така ж, як і таблиця 1.**

Примітка. Номінали опорів, ємностей вказані на робочому місці установки.

Обробка результатів вимірювань

1. За даними вимірів, приведених в таблицях обчислити значення логарифмічного декременту згасання для різних опорів і результати занести в таблиці 1 і 2.

$$\lambda = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{A_1}{A_{1+n}} \right) \quad (1)$$

де n – номер наступного максимуму. (брати попарно 1 і 2 та 1 і 3 амплітуди)

2. За даними таблиць побудувати графіки залежності λ від опору R для двох значень ємності в контурі.

3. За побудованими графіками залежності $\lambda = f(R)$ визначити активний опір котушки R_L , як точку перетину прямої з віссю R . Оцінити невизначеність опору котушки, як:

$$U_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u_B^2(x_i)}. \quad (2)$$

Зауважимо, що логарифмічний декремент можна виразити через параметри контуру, для випадку слабкого згасання (формули (5.16), (5.19))

$$\lambda = \pi R_{\pi} \sqrt{C/L}, \quad (3)$$

де $R_{\pi} = R + R_L$ – опір всього коливального контуру, R – задані нами опори схеми, R_L – активний опір котушки. Тому формулу (3) можна переписати так:

$$\lambda = \pi(R + R_L) \sqrt{C/L},$$

або

$$\lambda = aR + b, \quad (4)$$

де $a = \pi \sqrt{C/L}$, $b = \pi R_L \sqrt{C/L}$.

Ми побудували графік $\lambda = f(R)$ без врахування опору котушки. Тому графік має зсув на величину, яка залежить від опору котушки R_L . Тому, опір котушки визначаємо як

$$R_L = b/a.$$

4. Визначити індуктивність котушки по параметру a із (4):

$$L = C \frac{\pi^2}{a^2} \quad (5)$$

для кожного конденсатора та оцінити її невизначеність по формулі (2), (див. додатки 11, 12).

5. Визначити власні частоти двох контурів та коефіцієнт згасання:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{a}{\pi C} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{R}{2L} = \frac{Ra^2}{2C\pi^2} \quad (7)$$

6. Визначити критичний опір для кожного значення ємності як:

$$R_{\text{кр}} = 2\sqrt{L/C} = \frac{2\pi}{a} \quad (8)$$

Записати всі отримані величини до таблиці.3.

7. Обчислити добротність контура для різних значень опору R за формулою $Q = \pi/\lambda$. Побудувати графіки залежності добротності контура Q від оберненого опору $1/R$ для двох значень ємності в контурі.

8. Прологарифмуємо формулу (5.19) (див. інструкцію):

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad \text{Тоді}$$

$$\ln(Q) = -\ln(R_{\text{п}}) + \ln\left(\sqrt{\frac{L}{C}}\right), \quad (9)$$

де $R_{\text{п}} = R + R_L$ - опір всього кола, тому необхідно враховувати опір котушки R_L . Розрахувати величини $\ln(Q)$ і $\ln(R + R_L)$ для кожного значення R .

9. Побудувати графік залежності $\ln Q = f(-\ln(R + R_L))$ для двох ємностей. Це пряма лінія виду

$$y = ax + b$$

На листку паперу зошита в клітинку вибрати масштаб відповідних координатних осей так, щоб графік містив точку (0,0) і проставити експериментальні точки. За допомогою лінійки провести пряму лінію між точками так, щоб кількість точок по обидві сторони прямої лінії була по можливості однаковою.

10. Визначити нахил цієї прямої, як відношення:

$$\frac{\Delta \ln(Q)}{\Delta \ln(R+R_L)} = n, \quad (4)$$

де n теоретично дорівнює одиниці.

11. Переконайтесь в тому, що при дослідженні згасаючих коливань в нашій лабораторній роботі має місце випадок слабого згасання (див. інструкцію в практикумі).

12. За допомогою математичної програми опрацювати результати експерименту (див. інструкцію та додатки 11, 12 в практикумі).

13. Зробити висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. Які коливання називаються гармонічними?
2. Дати визначення амплітуди, фази, періоду, лінійної та циклічної частоти гармонічного коливання.
3. Коливання яких величин відбуваються в електричному коливальному контурі?
4. Написати диференціальне рівняння згасаючих коливань та його розв'язок.
5. Пояснити, чому вільні коливання в контурі згасають. Пояснити, як відбувається втрата енергії в контурі, яка була йому надана?
6. Пояснити, чому частота згасаючих коливань відрізняється від частоти гармонічних коливань.
7. Зобразити графік згасаючого коливання.

8. Що таке коефіцієнт згасання? Від яких параметрів контуру він залежить?
9. Дати визначення логарифмічного декременту згасання?
10. Дати визначення часу релаксації (часу згасання) згасаючих коливань. Від яких параметрів контуру залежить час релаксації?
11. Дати визначення добротності коливального контуру.
12. Записати формулу, яка зв'язує коефіцієнт згасання та логарифмічний декремент.
13. Який є зв'язок між логарифмічним декрементом згасання і кількістю коливань, які здійснює коливальна система за час релаксації?
14. При яких умовах згасаючі коливання переходять в аперіодичний процес?
15. Знайти зв'язок між добротністю та критичним опором контура при слабкому згасанні.

16. Зобразити та пояснити схему для дослідження згасаючих коливань.

ЛІТЕРАТУРА

1. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Фізика (Фізика для інженерів): Підручник /: - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, (стор.155-156, 160-164), 2017.-513с.- Назва з екрану. - Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19035>
2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Електрика і магнетизм. Том 2, §12.1-12.2. - К: Техніка, 1999р., 452с.
3. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Обробка результатів фізичних вимірювань. [Електронний ресурс]: навч. посіб./ КПІ ім. Ігоря Сікорського/: - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. — 88 с. - Назва з екрану. - Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/25320>

Таблиця 1

№	R_m	A_1	A_2	A_3	λ_1	λ_3	$\langle \lambda \rangle$	$Q_{\text{експ}}$	$\ln(Q_{\text{експ}})$	$R=R_m+R_L$	$-\ln R$
1											
2											
3											
4											
5											
6											

Таблиця 2

№	R_m	A_1	A_2	A_3	λ_1	λ_3	$\langle \lambda \rangle$	$Q_{\text{експ}}$	$\ln(Q_{\text{експ}})$	$R=R_m+R_L$	$-\ln R$
1											
2											
3											
4											
5											
6											

Таблиця 3

№	C	R_L	σ_{rL}	L	σ_L	$R_{\text{кр}}$	ω_0	β_{max}	
1									
2									
середні:									
Відповідь:		$R_L = \langle R_L \rangle \pm U(R_L) =$				$L = \langle L \rangle \pm U(L) =$			
		=				=			

Лабораторна робота
**Вивчення вимушених коливань в електричному
коливальному контурі**

Протокол
Варіант № _____

Виконав _____

Група _____

Факультет _____

Мета роботи:

1. Отримати вимушені коливання у коливальному контурі. Дослідити залежність напруги на конденсаторі та струму у коливальному контурі від частоти.

2. Дослідити залежність частоти, при якій напруга на конденсаторі досягає максимальних значень, від активного опору.

3. Визначити добротність коливального контуру за резонансними кривими для випадку слабого згасання.

4. Дослідити залежність характеристик коливань від параметрів коливального контуру.

5. Зробити висновки по роботі.

**Вимушені електричні
коливання**

Електричні коливання виникають у коливальному контурі, який складається з конденсатора C , котушки L і активного опору R (рис.1). Якщо зарядити конденсатор C і замкнути ключ K , тоді конденсатор почне розряджатися. У колі потече струм, який плавно буде зростати через появу е.р.с. самоіндукції. При цьому енергія поля конденсатора переходитиме в енергію магнітного поля котушки.

У реальному контурі енергія зменшується у зв'язку з тим, що існує активний опір R , у якому виділяється тепло, і амплітуда коливань буде зменшуватись. Тобто, електромагнітні коливання у реальному коливальному

контурі завжди є згасаючими, а незгасаючими коливаннями можуть бути тільки вимушені коливання, що відбуваються під дією додаткової періодичної зовнішньої сили, яка поповнює втрату енергії у коливальному контурі.

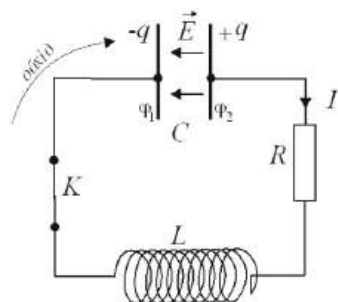


Рис.1.

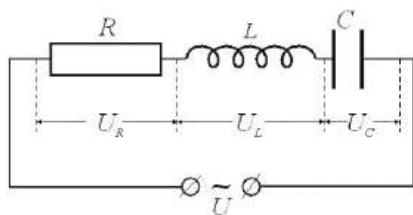


Рис.2.

Щоб викликати вимушені коливання, необхідно, щоб на коливальну систему впливала зовнішня періодично змінна дія. У випадку електричних коливань це можна здійснити, якщо в електричне коло (рис.1) включити послідовно з елементами контуру змінну е.р.с. або, розірвавши контур, подати на контакти, які утворились, періодичну напругу (рис.2):

$$U = U_m \cos \omega t, \quad (1)$$

Диференційне рівняння вимушених коливань буде:

$$\ddot{q} + 2\beta\dot{q} + \omega_0^2 q = \frac{U_m}{L} \cos \omega t, \quad (2)$$

де $I = dq/dt = \dot{q}$, $\ddot{q} = dI/dt$, $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ – частота власних коливань, $\beta = R/(2L)$ – коефіцієнта згасання. Загальним розв'язком рівняння (2) для часу $t \gg \tau = 1/\beta \epsilon$:

$$q = q_m \cos(\omega t - \psi), \quad (3)$$

де

$$q_m = \frac{U_m/L}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}, \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} = \frac{R}{\frac{1}{\omega C} - \omega L}. \quad (5)$$

Таким чином, вимушені коливання будуть гармонійними з частотою ω вимушуючої сили (1). Амплітуда q_m цих коливань залежить від ω і визначається формулою (4). Коливання (3) відстають по фазі від прикладеної напруги (1) на величину ψ , яка визначається формулою (5) і теж залежить від ω .

Продиференціюємо розв'язок (3) по t і знайдемо силу струму в контурі для коливань, які встановились:

$$\begin{aligned} I = \dot{q} &= -\omega q_m \sin(\omega t - \psi) = \\ &= I_m \cos(\omega t - \psi + \pi/2), \end{aligned}$$

де $I_m = \omega q_m$. Запишемо цей вираз у вигляді

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi), \quad (6)$$

де $\varphi = \psi - \pi/2$, ϵ зсув по фазі між струмом і прикладеною напругою (1).

У відповідності з (5)

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\varphi &= \operatorname{tg}\left(\psi - \frac{\pi}{2}\right) = -\frac{1}{\operatorname{tg}\psi} = \\ &= \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \end{aligned} \quad (7)$$

Із цієї формули витікає, що струм відстає за фазою від напруги ($\varphi > 0$) в тому випадку, коли $\omega L > 1/(\omega C)$, і випереджає напругу ($\varphi < 0$) при умові, що $\omega L < 1/(\omega C)$. Згідно (4)

$$I_m = \omega q_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (8)$$

Порівнюючи (8) із законом Ома

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

бачимо, що знаменник у (8)

$\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$ визначає опір всього кола. R —називається активним опором, ωL і $1/(\omega C)$ —реактивними опорами.

Резонанс - відносно великий селективний (вибірковий) відклик коливальної системи на періодичну дію з частотою, близькою до частоти її власних коливань. При резонансі відбувається різке зростання амплітуди вимушених коливань.

Резонансну частоту для заряду q і напруги на конденсаторі U_C знайдемо з умови мінімуму підкореневого виразу у формулі (4). Звідки знаходимо, що

$$\omega_{q_{\text{рез}}} = \omega_{U_{\text{рез}}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}} \leq \omega_0. \quad (9)$$

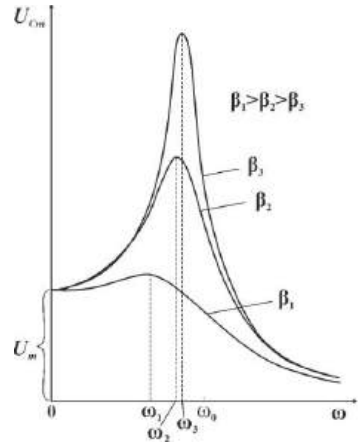


Рис.3.

Резонансні криві для U_C зображені на рис.3 (резонансні криві для q мають такий же вид). При $\omega \rightarrow 0$ резонансні криві сходяться в одній точці з ординатою $U_{C_m} = U_m$. Це означає, що конденсатор підключений до джерела постійної напруги U_m . Максимум при резонансі тим вищий і гостріший, чим менший коефіцієнт згасання $\beta = R/(2L)$, тобто чим менший активний опір і більша індуктивність контуру.

Резонансні криві для сили струму зображено на рис.4, для різних коефіцієнтів згасання. Із формули (8) видно, що амплітуда сили струму має максимальне значення при $\omega L - 1/(\omega C) = 0$. Отже, резонансна частота для сили струму співпадає із власною частотою контуру ω_0 :

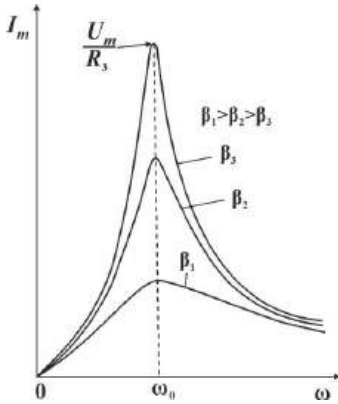


Рис.5.4.

$$\omega_{I_{\text{рез}}} = \omega_0 = 1/\sqrt{LC}. \quad (10)$$

При $\omega \rightarrow 0$, $I_m = 0$, так як при постійній напрузі постійний струм в колі з конденсатором протікати не може. Згідно (8) при $\omega \rightarrow \omega_0$

$$I_{m \text{ рез}} = U_m/R.$$

Резонансне значення напруги на конденсаторі знайдемо з формули (4), поділивши її на ємність C і підставивши замість частоти ω її резонансне значення з формули (9). Тоді отримаємо, що

$$U_{cm \text{ рез}} = \frac{U_m \omega_0^2}{2\beta \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}. \quad (11)$$

Особливий інтерес представляє випадок слабого згасання (коли $\beta^2 \ll \omega_0^2$). Тоді

$$\begin{aligned} \frac{U_{cm \text{ рез}}}{U_m} &= \frac{1}{\omega_0 CR} = \\ &= \frac{\sqrt{LC}}{CR} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = Q. \end{aligned} \quad (12)$$

При цьому враховано, що для випадку слабого згасання

$$\begin{aligned} Q &= \frac{\pi}{\lambda} = \frac{\pi}{\beta T} \cong \frac{\pi \omega_0}{2\pi\beta} = \\ &= \frac{2L}{2\sqrt{LC} \cdot R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Таким чином, добротність контуру (для слабого згасання) показує, в скільки разів напруга на конденсаторі може перевищувати прикладену напругу.

Добротність контуру визначає також гостроту резонансних кривих.

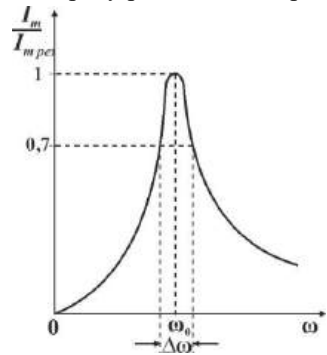


Рис.5.

На рис.5 показана одна із нормуючих резонансних кривих для сили струму в контурі. По вертикальній осі відкладено не значення I_m (формула (8)), що відповідає даній частоті, а відношення $I_m/I_{m \text{ рез}}$. Взагалі кажучи, чим більша добротність контуру Q , тим вужчий і вищий максимум на кривій залежності амплітуди струму від частоти вимушуючої сили. Щоб з'ясувати це питання з більшою точністю, розгля-

немо частоти, які близькі до ω_0 , наприклад, $\omega = \omega_0 \pm \Delta\omega/2$. Потім вирахуємо величину $\omega L - 1/(\omega C)$, яка входить в знаменник рівняння (8), з точністю до першої степені відношення $\Delta\omega/(2\omega_0)$.

Розглянемо ширину $\Delta\omega$ кривої $\frac{I_m}{I_{m\text{рез}}}(\omega)$ на рис.5, яку взято на висоті 0,7 (таке відношення амплітуд струмів, відповідає відношенню потужностей, яке дорівнює $0,7^2 \approx 0,5$, оскільки потужність пропорційна I^2). Звідки отримуємо, що

$$Q = \omega_0/\Delta\omega. \quad (14)$$

Точки на осі ω , яким відповідають значення $\omega_0 \pm \Delta\omega/2$, називають точками "половинної енергії". За ширину резонансної кривої часто приймають відстань $\Delta\omega$ між точками половинної енергії. Радіоприймач налаштовують на певну станцію і розрізняють її від інших за допомогою резонансного контуру з добротністю Q , яка дорівнює декільком сотням, а інколи досягає порядку 10^4 .

Опис лабораторної установки

Для вивчення вимушених коливань у контурі використовується установка, зображена на рис.6, а електрична схема приведена на рис.7.



Рис.6.



Рис.7.

За допомогою цієї установки можна вивчити залежність напруги на конденсаторі C (перемикач $K1$ у положенні 1) або на опорах R_1-R_3 (перемикач $K1$ у положенні 2) від частоти ω зовнішнього генератора. Вимірю-

вання напруги діючої здійснюється за допомогою цифрового вольтметра V (рис.6). Активний опір контуру можна змінювати за допомогою резисторів R_1 - R_3 та перемикачів $K2 - K4$.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути звуковий генератор в мережу. Встановити на виході генератора напругу 10 В.

2. Установити перемикач $K1$ у положення 1, $K2$ у положення 1, $K3$ у положення 2 і $K4$ у положення 2 (це відповідає шунтуванню опорів R_2, R_3) При цьому в контур буде увімкнений опір R_1). Змінюючи частоту генератора $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$, знайти резонансну частоту ν_p , при якій напруга на конденсаторі буде максимальною $U_{Cm} = U_{Cm \text{ рез}}$. Значення ν_p та U_{Cm} занести до табл.1.

3. Зменшуючи й збільшуючи частоту генератора в обидва боки від резонансної частоти (узяти 8-10 значень), виміряти амплітуди напруги U_{Cm} . Значення ν і U_{Cm} занести до табл. 1

4. Перевести перемикач $K1$ у положення 2. (При цьому вольтметр V буде показувати напругу на опорі контура). Змінюючи частоту генератора, знайти резонансну частоту $\nu_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$ при якій напруга на резисторі R_1 буде максимальною. Виміряти амплі-

туду напруги $U_{max}^{R_1}$ на резисторі R_1 при резонансній частоті ν_0 . Значення R_1, ν_0 та $U_{R_1}^{max}$ занести до табл.2.

5. Зменшуючи і збільшуючи частоту генератора в обидва боки від резонансної частоти (взяти 8-10 значень частоти), обчислити амплітуди напруги $U_m^{R_1}$. Значення ν та $U_m^{R_1}$ занести до табл.5.4. Для кожного значення $U_m^{R_1}$ знайти амплітуду струму $I_m = U_m^{R_1} / R_1$ і занести результат у табл. 2.

6. Виміри п.п. 2 – 5 повторити при опорі контуру R_2 та R_3 . Вибір опорів здійснити за допомогою перемикачів $K2 - K4$.

УВАГА. Для економії часу раціональніше зафіксувати певну частоту і проводити виміри з різними опорами контуру. Потім змінити значення частоти і знову провести виміри для різних опорів. Такі виміри провести для дев'яти значень частоти по чотири значення по обидва боки від резонансної частоти.

Обробка результатів вимірювань

1. За даними табл.1 побудувати резонансні криві $U_m^R = f(\nu)$ для різних значень R .

2. Визначити добротність контуру за формулою (12) для різних значень R . За отриманими даними побудувати графік $Q = f(1/R)$, відклада-

ючи по осі ординат добротність Q , а по осі абсцис – обернений опір контуру $1/R$.

3. За даними табл.2 побудувати резонансні криві $I_m = f(\nu)$ для різних значень R .

4. Із графіків п.3 визначити значення ширини $\Delta\nu$ резонансних кривих струму та обчислити добротність контуру Q для різних значень R за формулою (14). Отримані значення Q нанести на графік п.2 і порівняти результати, отримані в п.2 і п.3.

5. Визначити коефіцієнти згасання β з формули (9)

$$\beta = \sqrt{(\omega_0^2 - \omega_{U_{\text{рез}}}^2)/2},$$

де ω_0 визначаємо з таблиці 2 як резонансну частоту, яка є однаковою для всіх опорів, а $\omega_{U_{\text{рез}}}$ – з таблиці 1 як частоти з найбільшою амплітудою коливань напруги на конденсаторі, які залежать від опору.

5. Визначити логарифмічний декремент згасання λ та побудувати графік залежності λ від опору.

6. Результати розрахунків занести до таблиці 3. Математична обробка результатів експерименту див. додатки 13, 14.

7. Написати висновки по роботі.

Контрольні питання

1. Які коливання називають вимушеними?

2. Записати диференціальне рівняння вимушених коливань у послідовному контурі. Який вигляд має загальний розв'язок цього рівняння?

3. Що таке стаціонарні вимушені коливання та який вигляд має їх рівняння?

4. За яким законом змінюється заряд та напруга на обкладинках конденсатора при вимушених коливаннях?

5. За яким законом змінюється струм від частоти в коливальному контурі при вимушених коливаннях?

6. Дати визначення явища резонансу.

7. Записати формули для амплітудної характеристики напруги на конденсаторі контура та резонансної частоти напруги.

8. Записати формули для амплітудної характеристики струму в контурі та резонансної частоти струму.

9. В чому різниця між резонансом напруги на конденсаторі і резонансом струму при вимушених коливань у послідовному контурі.

10. Який вигляд мають резонансні криві напруги на конденсаторі та струму в контурі при різних значеннях опору R ?

11. Дати визначення добротності коливального контуру. Який його фізичний зміст?

12. Як можна визначити добротність коливального контуру за параметрами резонансної кривої напруги на конденсаторі у випадку слабого згасання?

13. Як можна визначити добротність за параметрами резонансної кривої струму в контурі?
14. Що таке ширина резонансної кривої? Чому для визначення ширини резонансної кривої потрібно для нормуючих резонансних кривих I_m/I_m рез для сили струму в контурі вибрати частоти, для яких це відношення дорівнює $1/\sqrt{2} \cong 0,7$.
15. Який вигляд має векторна діаграма напруг при вимушених коливаннях у послідовному контурі?
17. Яке практичне застосування мають вимушені коливання?
18. Як використовуються вимушені коливання в класичному ламповому генераторі?

ЛІТЕРАТУРА

1. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Фізика (Фізика для інженерів): Підручник /: — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. — 513с. - Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19035>
2. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Електрика і магнетизм. Том 2, §12.3. - К: Техніка, 1999р., 452с.
3. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Обробка результатів фізичних вимірювань. Навч. посіб./ КПІ ім. Ігоря Сікорського/: — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. — 88 с. - Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/25320>

Таблиця 1

R_1	$\nu, \Gamma \text{ц}$									
	U_{Cm}									
R_2	$\nu, \Gamma \text{ц}$									
	U_{Cm}									
R_3	$\nu, \Gamma \text{ц}$									
	U_{Cm}									

Таблица 2

№	v, Гц	R_1		R_2		R_3	
		$U_m^{R_1}$, В	I_m	$U_m^{R_2}$, В	I_m	$U_m^{R_3}$, В	I_m
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							

Таблица 3

R	$1/R$	Q_U	Q_I	β	λ_U	λ_I

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
кафедра загальної фізики

Лабораторна робота
**Вивчення інтерференції світла за
допомогою біпризми Френеля**

Протокол
Варіант № _____

Виконав _____

Група _____

Факультет _____

Мета роботи

1. Вивчення явища інтерференції хвиль і розрахунок ширини інтерференційної смуги.

2. Вивчення двопроменевої інтерференції світла за допомогою біпризми Френеля. Отримати інтерференційну картину за допомогою біпризми (експеримент).

3. Визначити характеристик світлофільтрів - довжини хвилі в максимумі пропускання та ширини смуги пропускання.

4. Провести дослідження впливу монохроматичності світла та розмірів джерела світла на інтерференційну картину.

5. Визначити невизначеність довжини хвилі пропускання для одного із світлофільтрів і записати кінцевий результат вимірювання.

6. Зробити висновки по роботі.

Інтерференція світла. Хвильові властивості світла найбільш виразно проявляють себе в інтерференції.

Під інтерференцією світла, як правило, розуміють широке коло явищ, в яких при накладанні пучків світла результуюча інтенсивність не дорівнює сумі інтенсивностей окремих пучків: в одних місцях вона більша, в інших менша, тобто виникають світлі і темні ділянки – інтерференційні смуги, які чергуються.

Для спостереження інтерференції мають виконуватися кілька умов. Перш за все хвилі повинні бути монохроматичними ($\omega_1 = \omega_2$). Світло, яке випромінюється звичайними (не лазерними) джерелами, не буває строго монохроматичним. Тому для спосте-

реження інтерференції світло від одного джерела необхідно розділити на два пучки, а потім накласти їх один на одного. Існуючі експериментальні методи отримання когерентних пучків із одного світлового пучка можна поділити на два класи. В методі ділення хвильового фронту пучок пропускається, наприклад, через два близько розташованих отвори в непрозорому екрані. Такий метод годиться тільки при досить малих розмірах джерела. В іншому методі пучок ділиться однією або декількома поверхнями, які частково відбивають і пропускають світло. Цей метод поділу амплітуди може застосовуватись і для протяжних джерел і забезпечує більшу інтенсивність.

Розглянемо інтерференцію монохроматичного світла. Нехай розділення на дві когерентні хвилі відбувається в точці O (рис.1). До точки P , в якій спостерігається інтерференційна

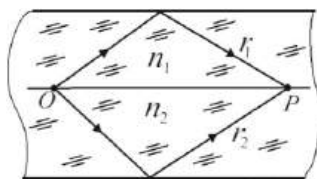


Рис.1.

картина, одна хвиля в середовищі з показником n_1 , проходить шлях r_1 , а друга — в середовищі з показником заломлення n_2 — шлях r_2 .

Згідно принципу суперпозиції, напруженість результуючого поля в точці P дорівнює їх векторній сумі:

$$\vec{E}_P = \vec{E}_1 + \vec{E}_2.$$

Враховуючи, що інтенсивності хвиль пропорційні квадратам їхніх амплітуд, для інтенсивності результуючого коливання в точці P отримаємо:

$$I_P = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\varphi, \quad (1)$$

де

$$\varphi = k_2 r_2 - k_1 r_1 + \varphi_{01} - \varphi_{02} \quad (2)$$

різниця фаз двох когерентних хвиль від одного джерела, тому $\varphi_{01} - \varphi_{02} = \text{const}$ (прийемо = 0). Враховуючи що $k_1 = 2\pi n_1 / \lambda_0$ отримаємо:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} (r_2 n_2 - r_1 n_1)$$

де $\Delta = (r_2 n_2 - r_1 n_1)$ — називається *оптичною різницею ходу*.

Якщо оптична різниця ходу дорівнює парному числу півхвиль у вакуумі:

$$\Delta = 2m \frac{\lambda_0}{2}. \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots), \quad (3)$$

то коливання, що збуджуються в точці P обома хвилями, відбуваються в однакових фазах. Число m називається *порядком інтерференції*. Тоді $\cos\varphi = 1$ і результуюча інтенсивність — максимальна:

$$I_{Pmax} = 4I_1 \quad (E_{m1} = E_{m2}).$$

Таким чином, максимум інтенсивності при накладанні двох когерентних хвиль буде у точках, для яких виконується умова: на *оптичній різ-*

ниці ходу укладається парне число півхвиль ($\lambda_0/2$).

Якщо оптична різниця ходу:

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2} \quad (m=0, \pm 1, \pm 2, \dots), \quad (4)$$

то $\varphi = (2m + 1)\pi$ і коливання, що збуджуються в точці P обома хвилями, знаходяться у протифазі, тоді $\cos\varphi = -1$ і результуюча інтенсивність в цій точці буде мінімальна:

$$I_{Pmin} = 0 \quad (E_{m1} = E_{m2}).$$

Мінімум інтенсивності отримаємо в точках, для яких *оптична різниця ходу променів вміщує непарне число півхвиль* ($\lambda_0/2$).

Розрахунок інтерференційної картини від двох когерентних джерел.

Розглянемо випадок інтерференції хвиль від двох однакових синфазних монохроматичних точкових джерел S_1 і S_2 (рис.2), які знаходяться на відстані d одне від одного в середовищі з показником заломлення $n=1$. Якщо відстань l до екрана, де спостерігаються інтерференційні смуги, набагато більша відстані між джерелами ($l \gg d$), то коливання в точці P , що збуджуються хвилями від S_1 і S_2 мають однаковий напрямок. Введемо кут θ , що утворюється напрямком на точку P з оптичною віссю. Для практично важливого випадку малих значень θ ($\theta \ll 1$), для різниці ходу мож-

на записати $\Delta \approx d \sin\theta \approx d \cdot \theta$. Так як $tg\theta \approx \theta \approx x/l$, то $\Delta \approx xd/l$.

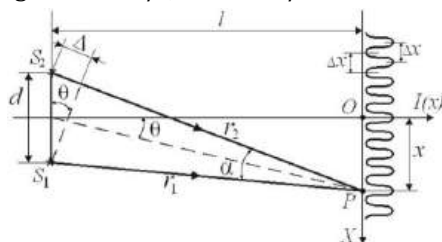


Рис.2.

Тоді отримаємо для ($I_1 = I_2 = I_0$)

$$I_P(x) = 2I_0(1 + \cos \frac{2\pi dx}{\lambda_0 l})$$

В точці, для якої $x = 0$, розташований центральний максимум, який відповідає нульовій різниці ходу, і порядок інтерференції $m = 0$. Відстань між *сусідніми максимумами* або *мінімумами* (просторовий період інтерференційної картини) визначається із умови:

$$\frac{2\pi d \cdot \Delta x}{\lambda_0 l} = 2\pi.$$

Звідки *ширина інтерференційної смуги*:

$$\Delta x = \lambda_0 l / d \quad (5)$$

Опис установки

Для вивчення інтерференції використовується установка, зображена на рис.3, а схема приведена на рис.4. Експериментальна установка це оптична лава – масивна рейка з напрямними, на якій на спеціальних підставках (рейтерах) встановлені всі елементи оптичної схеми (рис.3). Пучок світла

від освітлювача проходить через змінний світлофільтр і потрапляє на розсувну щілину, яка виконує роль лінійного джерела, а потім на біпрizmu Френеля (рис.4). Інтерференційна картина, що виникає при накладенні когерентних пучків від біпризи, спостерігається через окуляр мікрометра (рис.5).



Рис.3.

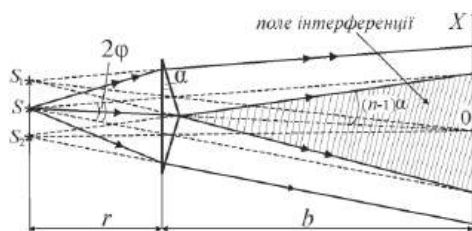


Рис.4. Інтерференційна схема за біпризмою Френеля.

У полі зору окуляра око бачить збільшене зображення інтерференційних смуг (рис.6.), а також дві діагональні візирні нитки та горизонтальну шкалу для визначення координат і ширини інтерференційних смуг. Для визначення відстані між уявними когерентними джерелами, утвореними біпризмою, між нею та окуляром встановлюється допоміжний об'єктив (збиральна лінза) з відомою фокусною відстанню F .

Порядок виконання

Щоб визначити довжину хвилі λ із формули $\Delta x = \lambda l/d$, потрібно виміряти ширину смуги Δx , відстань l від щілини до екрану та відстань між двома уявними джерелами S_1 та S_2 – d .



Рис.5.

Визначення ширини інтерференційної смуги і їх кількості

1. Переміщуючи окуляр за допомогою мікрометричного гвинта (рис.5 і 6) виставити візирну лінію на якусь темну смугу з лівого краю інтерференційної картини (рис.6) і приписати їй номер 0 (рис.7). Зафіксувати координату цієї смуги x_0 по лімбу мікрометра (рис.5).



Рис.6. Інтерференційна картина в окулярі мікроскопа.

2. Перемістити візирну лінію на якусь темну смугу, наприклад з номе-

ром $n = 10$, у правій частині інтерференційної картини і зафіксувати її координату x_n (рис.7).

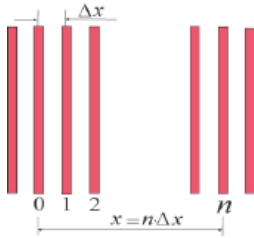


Рис.7. Схема інтерференційних смуг.

3. Вирахувати різницю координат $x = x_n - x_0$ і занести її до таблиці. Виміри п.п. 1-3 повторити 3 рази.

4. Підрахувати загальну кількість смуг N , які можна розрізнити в полі зору окуляра, та занести її до таблиці.

Визначення відстані між уявними джерелами та довжини хвилі

Вимірювання відстані d між джерелами S_1 та S_2 прямо неможливо, оскільки джерела у даному випадку уявні. Тому d необхідно виразити через інші величини, які можна виміряти експериментально.

1. Установити на рейці між біпризмою та окуляром допоміжний об'єктив (збиральну лінзу) (рис.8).

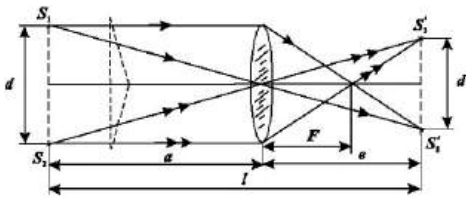


Рис.8.

2. Пересувачи її по рейці, отримати в полі зору окуляра мікрометра дві яскраві та максимально різкі лінії (рис.9), що є дійсними зображеннями S'_1 та S'_2 уявних когерентних джерел створених біпризмою S_1 та S_2 . Хід променів через лінзу показаний на рис.8.



Рис.9.

3. Виміряти відстань d' між зображеннями S'_1 і S'_2 (рис.8 і 9) за допомогою окулярмікрометра.

4. Визначити відстань між щілиною та допоміжним об'єктивом a .

5. Визначити довжину хвилі світла за формулою:

$$\lambda = \frac{\Delta x \cdot d' (a - F)^2}{a^2 F} = \frac{(x_n - x_0) \cdot d' (a - F)^2}{na^2 F} \quad (6)$$

Примітка. Число n не обов'язково повинно бути 10.

Додаткове завдання (виконується за вказівкою викладача)

1. Переконайтесь про вплив монохроматичності світла на інтерференційну картину і справедливості формули $m_{max} \leq \lambda/\Delta\lambda$. Для інтерференційної картини з фільтром підрахува-

ти максимальну кількість інтерференційних смуг, які спостерігаються в окулярі мікромметра N . Потім прибрати світлофільтр і спостерігати інтерференційну картину в білому світлі $\lambda \approx (0,4 \div 0,7)$ мкм. Знову підрахувати та занести до таблиці максимальну кількість смуг N' , що спостерігаються. Порівняти N' із N кількістю інтерференційних смуг при спостереженні картини із світлофільтром.

2. Переконайтесь про вплив розмірів джерела світла на інтерференційну картину. Для цього спостерігати інтерференційну картину із світлофільтром. За допомогою гвинта (див. інструкцію рис.10,а) дуже незначно збільшити ширину щілини і переконайтесь, що інтерференція зникає. При зменшенні ширини щілини інтерференція появляється знову.

Обробка результатів для кожного із змінних світлофільтрів

1. За даними таблиці обчислити середнє значення відстані для n смуг інтерференції, як

$$\langle x \rangle = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 (x_{ni} - x_{0i}),$$

та ширину інтерференційної смуги $\Delta x = \frac{\langle x \rangle}{n}$ (n може бути 1, 2, ..., 10 і т.д. див.рис.7). Величину Δx занести до таблиці.

2. За даними таблиці обчислити та занести до неї середнє значення відстані між дійсними S'_1 і S'_2 зобра-

женнями уявних джерел S_1 та S_2 в об'єктиві окуляра мікромметра

$$\langle d' \rangle = \frac{1}{3} \cdot \sum_{i=1}^3 d'_i.$$

3. За даними таблиці та формулою (6) розрахувати та занести до неї довжину хвилі λ в максимумі пропускання світлофільтра.

4. Використовуючи отримане значення λ та максимальну кількість смуг $N \approx 2m_{max}$ із таблиці, за формулою $m_{max} = \lambda / \Delta \lambda$ оцінити ширину смуги пропускання $\Delta \lambda$ і занести її до таблиці.

5. Розрахувати невизначеність $U(\lambda)$, визначення довжини хвилі для одного із фільтрів (див. інструкцію до роботи та додаток 15). Записати кінцевий результат вимірювання.

6. Зробити висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. У чому суть явища інтерференції?
2. При яких умовах має місце явище інтерференції?
3. Який зв'язок між явищем інтерференції і додаванням коливань однакового напрямку з однаковими частотами?
4. Дати визначення когерентності хвиль. Які властивості когерентних хвиль? Чому світлові хвилі, що випускаються звичайними джерелами, не когерентні?
5. Які джерела світла називаються монохроматичними? Чи завжди монохроматичні джерела світла є когерентними?

6. Які відомі способи отримання когерентних хвиль оптичного діапазону? Привести приклади. Пояснити їх суть.

7. Чому відстань між когерентними джерелами коливань S_1 і S_2 повинна бути значно меншою відстані від цих джерел до екрану, на якому спостерігається інтерференція?

8. Що представляє собою світло у вузькому і широкому розумінні?

9. Дати визначення оптичної довжини шляху. Що називається оптичною і геометричною різницею ходу променів (хвиль)?

10. Як визначається інтенсивність світла?

11. Як змінюється довжина світлової хвилі при переході із одного середовища в інше з різними показниками заломлення. Відповідь пояснити і аргументувати.

12. Записати та пояснити умову максимального підсилення та послаблення електромагнітних хвиль внаслідок інтерференції.

13. На що вказувала відсутність інтерференції променів, які поляризовані у взаємно перпендикулярних напрямках?

14. Дати визначення ширини інтерференційної смуги. Від яких величин залежить ширина інтерференційної смуги?

15. Дати визначення часу когерентності та довжини когерентності. Чому максимальна різниця ходу двох когерентних променів не повинна переви-

шувати довжину когерентності при спостереження інтерференції?

16. Як визначається максимально можливий порядок інтерференції? Від чого він залежить?

17. Пояснити, чому для видимого світла, для якого $\Delta\lambda \sim \lambda$, ми бачимо цілий ряд різнокольорових інтерференційних смуг?

19. Як впливають розміри джерела світла на якість інтерференційної картини? Що таке апертура інтерференції і що вона визначає?

20. Побудувати хід променів від лінійного джерела світла через біпризму Френеля та показати зону інтерференції.

1. 20 Чому заломлюючі кути біпризми повинні бути дуже малими? Відповідь аргументувати.

21. Розкажіть про призначення приладів, які використовуються у лабораторній роботі.

22. Розкажіть порядок виконання роботи та обробки результатів вимірювань.

23. Наведіть приклади інтерференції електромагнітних хвиль у природі та техніці. Розкажіть про застосування явища інтерференції.

24. Пояснити явище «втрати півхвилі» при відбиванні хвиль від перешкоди

Таблиця 1

світлофільтр:	червоний	зелений
N'		
N		
n		
$x_i, \text{мм}$		
$x = \langle x_i \rangle, \text{мм}$		
$d', \text{мм}$		
$d' = \langle d' \rangle, \text{мм}$		
$F, \text{мм}$		
$a, \text{мм}$		
$\lambda, \text{мкм}$		
$\Delta\lambda, \text{мкм}$		
$U(\lambda), \text{мкм}$		
кінцевий запис результату $\lambda = \langle \lambda \rangle \pm U(\lambda)$ мкм		
$\delta\lambda, \%$		

ЛІТЕРАТУРА

1.Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Фізика (Фізика для інженерів): Підручник /:

– Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського,

2017. – 513с. - Доступ:

<http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19035>.

2.Кучерук І.М., Горбачук І.І. Загальний курс фізики. Оптика. Квантова фізика. Том 3, §3.1-§3.6. - К: Техніка, 1999р. – 511с.

3.Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Обробка результатів фізичних вимірювань. Навч. посіб./ КПІ ім .Ігоря Сікорського/:

– Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 88 с. - Доступ:

<http://ela.kpi.ua/handle/123456789/25320>.

4.Бурдаков А.В., Жабітенко М.К., Оліх О.Я., Подолян А.О. Лабораторний практикум з курсу «Оптика» для студентів природничих факультетів.

– К.: Видавничо - поліграфічний центр «Київський університет», 2006.–74с.

Лабораторна робота
Вивчення дифракційної решітки

Протокол

Варіант № _____

Виконав _____

Група _____

Факультет _____

Мета роботи

1. Вивчити явище дифракції світла за допомогою дифракційної решітки.
2. Визначити сталу (період) дифракційної решітки.
3. Визначити довжини хвиль ліній випромінювання лазера.
4. Розрахувати кутову дисперсію та (додаткове завдання: роздільну здатність дифракційної решітки).
5. Розрахувати невизначеність визначення довжини хвилі випромінювання лазера.
6. Записати кінцевий результат визначення довжини хвилі випромінювання лазера.
7. Зробити висновки по роботі.

Опис лабораторної установки

Лабораторна установка показана на рис.1, а оптична схема на рис.2. Джерелами світла є три лазери, що генерують практично плоскі й монохроматичні світлові хвилі в синій, зеленій та червоній областях спектра, відповідно. Паралельний пучок променів від джерела 1 (лазер) із заданою

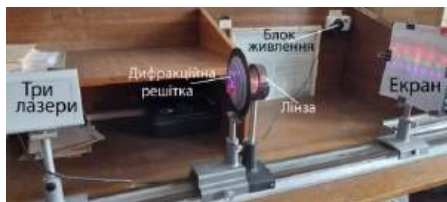


Рис.1.Лабораторна установка.

довжиною хвилі λ падає по нормалі на дифракційну решітку 2 з вертикальними щілинами і після неї – на збиральну лінзу 3 з відомою фокусною відстанню F . У фокальній площині

лінзи встановлений екран 4 для спостереження дифракційної картини (рис.1). Екран обладнаний горизонтальною лінійкою для визначення координати x точки, в яку приходять промені з відповідним кутом дифракції ϕ .

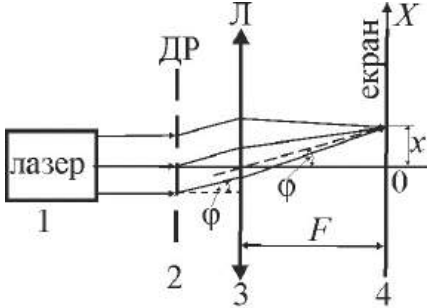


Рис.2. Оптична схема лабораторної установки. 1 – три лазери, 2 – дифракційна решітка, 3 – збиральна лінза, 4 – екран.

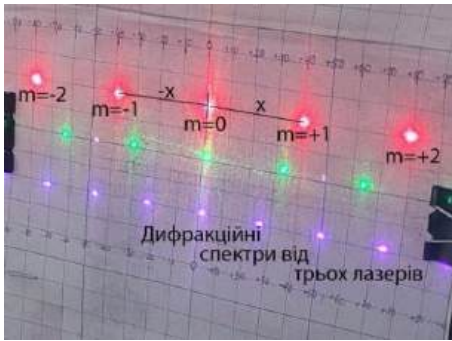


Рис.3. Дифракційні спектри на екрані.

Порядок виконання завдання

1. Визначення періоду дифракційної решітки

$$d \sin \phi = m \lambda, \quad (1)$$

де ($m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$).

Умова (1) визначає положення максимумів інтенсивності, які називаються *головними*. Число m визна-

чає *порядок головного максимуму*. Максимум нульового порядку тільки один, максимумів 1-го, 2-го і т. д. порядків є по два. Інтенсивність головних максимумів в N^2 раз більша інтенсивності I_ϕ , яку дає одна щілина в напрямку, що визначається кутом ϕ .

1. Ознайомитись із інструкцією на робочому місці та занести до таблиці 1 вказану (вважається відомою) довжину хвилі випромінювання зеленого лазера $\lambda_2 = 0,532$ мкм. Занести до таблиць 1 і 2 фокусну відстань лінзи F .

2. Згідно з інструкцією на робочому місці ввімкнути зелений лазер. Переконатися, що світловий пучок потрапляє в центральну зону дифракційної ґратки. Встановити між екраном і ґраткою лінзу (рис.1 і 2) в такому положенні, щоб дифракційна картина на екрані була найчіткішою (рис.3).

3. Визначити та занести до відповідних колонок таблиці 1 координати головних максимумів – покази x_m і x_{-m} на лінійці по обидва боки від центрального максимуму (рис.3). Виміри виконати для порядків $m = 1, 2, 3$. Наприклад. Для зеленого світла на рис.3 $x_{+1} = 33\text{мм} = 3,3\text{см}$, а $x_{-1} = 30\text{мм} = 3,0\text{см}$.

4. Для кожного порядку m обчислити та занести до таблиці 1 зна-

чення координат головних максимумів $x = \frac{x_m + x_{-m}}{2}$ і синуса кута дифракції:

$$\sin \varphi = \frac{x}{\sqrt{F^2 + x^2}} \quad (2)$$

5. За формулою (1) обчислити і занести до таблиці 1 значення періоду ґратки d_m для $m = 1, 2, 3$.

6. За результатами п.5 обчислити та занести до таблиці 1 середнє значення періоду ґратки $\langle d \rangle = (d_1 + d_2 + d_3)/3$.

2. Визначення довжини хвилі випромінювання лазерів

Занести до таблиці 2 величину періоду ґратки $\langle d \rangle$ з таблиці 1.

1. Замість зеленого лазера ввімкнути червоний.

2. Визначити та занести до відповідних колонок таблиці 2 відносні координати головних максимумів червоного світла – покази x_m і x_{-m} на лінійці по обидва боки від центрального максимуму. Виміри виконати для порядків $m = 1, 2, 3$. Наприклад: для червоного світла на рис.3 $x_{+1} = 40\text{мм} = 4,0\text{см}$, а $x_{-1} = 38\text{мм} = 3,8\text{см}$

3. Для кожного порядку m обчислити та занести до таблиці 2 значення координат головних максимумів $x = \frac{x_m + x_{-m}}{2}$ і синуса кута дифракції:

$$\sin \varphi = \frac{x}{\sqrt{F^2 + x^2}}$$

4. За формулою (1) обчислити і занести до таблиці 2 значення довжини хвилі λ_m для $m = 1, 2, 3$ для червоного кольору.

5. Для червоного кольору обчислити середнє значення $\langle \lambda \rangle = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)/3$ і занести його до таблиці 2.

6. Замість червоного лазера ввімкнути синій. Переконайся, що світловий пучок потрапляє в центральну зону дифракційної ґратки.

7. Виконати виміри та обчислення, як в п.п. 2 ÷ 5 для синього кольору. Результати занести до відповідної частини таблиці 2.

8. За схемою, яка приведена в додатках до роботи, виконати розрахунки невизначеності визначення довжини хвилі світла лазера для першого порядку спектру.

9. Записати кінцевий результат визначення довжини хвилі випромінювання лазера.

3. Визначення кутової дисперсії дифракційної ґратки

1. За даними таблиць 1 і 2 обчислити та занести до таблиці 3 різницю довжин хвиль зеленого та синього $\Delta_{3-c} = \lambda_3 - \lambda_c$ і червоного та зеленого лазерів $\Delta_{4-3} = \lambda_4 - \lambda_3$.

2. Через синуси кутів, які приведені в табл.1 і табл.2 обчислити та занести до табл.3 величини $\varphi_c, \varphi_3, \varphi_4$ в радіанах.

3. Обчислити та занести до таблиці 3 різницю кутів між головними максимумами зеленого та синього лазера $\Delta\varphi_{зс} = \varphi_з - \varphi_с$ і червоного та зеленого лазера $\Delta\varphi_{чз} = \varphi_ч - \varphi_з$.

4. Для обчислення кутової дисперсії використаємо формулу:

$$D_{\varphi} \cong \frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}.$$

Тоді обчислення дисперсії виконати за такими співвідношеннями:

$$D_{\varphi 1} \cong \frac{\varphi_з - \varphi_с}{\lambda_з - \lambda_с} \text{ і } D_{\varphi 2} \cong \frac{\varphi_ч - \varphi_з}{\lambda_ч - \lambda_з} \quad (3)$$

для першого і другого порядку дифракційних спектрів.

5. За формулою $D_{\varphi} = \frac{m}{d \cos\varphi}$ розрахувати значення кутової дисперсії і порівняти їх із експериментальними значеннями. Проаналізувати отримані результати.

6. Провести обробку експериментальних даних за допомогою програми, яка приведена в додатках до лабораторної роботи в практикумі та записати кінцеві результати обчислень.

7. Зробити висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. Що таке дифракція світла та за яких умов вона спостерігається?
2. Що визначає кількість дифрагованих пучків при дифракції світла на одній щілині?
3. Як пояснити розбіжність променя лазера?

4. Що таке дифракційна решітка та якими параметрами вона характеризується?

5. Опишіть дифракційну картину від ґратки. Чим вона відрізняється від такої для однієї щілини?

6. Як впливає дифракція від однієї щілини на дифракційну картину дифракційної решітки?

7. За яких умов спостерігаються головні максимуми дифракції на решітці?

8. Пояснити, чому відстань між дифракційними максимумами на рис.14 збільшується при переході від синього світла до червоного?

9. Якщо решітка складається з N щілин, то в скільки разів інтенсивність у головному максимумі дифракції на екрані відрізняється від інтенсивності, що створюється в цій точці однією щілиною?

10. Від чого і як залежить ширина дифракційних максимумів?

11. Яке найменше значенні періоду решітки дозволяє з її допомогою спостерігати дифракцію?

12. Дати визначення кутової дисперсії решітки? Що вона визначає? Від чого та як вона залежить?

13. Що називається лінійною дисперсією решітки? Що вона визначає? Встановити зв'язок між лінійною та кутовою дисперсією решітки при великих кутах дифракції.

14. Як, згідно з теорією, мають співвідноситися величини кутової дисперсії решітки в довгохвильовій та короткохвильовій областях спектра? Чи узгоджуються результати експерименту з таким висновком?

15. Поясніть, чому кутова дисперсія решітки практично не залежить від довжини хвилі світла?

16. Як співвідносяться величини кутової дисперсії решітки для першо-

го і другого порядків спектру? Відповідь пояснити.

17. Пояснити порядок визначення періоду ґратки та довжини хвилі випромінювання лазерів. Чому координати дифракційних максимумів потрібно вимірювати по обидва боки від центрального максимуму?

18. Дати визначення роздільної здатності дифракційної решітки. Що необхідно знати, щоб її визначити?

Таблиця 1

$\lambda_3 = 0,532$ мкм, $F = \underline{\hspace{2cm}}$ мм							
зелений	m	x_m , мм	x_{-m} , мм	$\langle x \rangle$, мм	$\sin\varphi$	d_m , мкм	$\langle d \rangle$, мкм
	1						
	2						
	3						
кінцевий запис результату:				$d = \langle d \rangle \pm U(d) =$			

Таблиця 2

$\langle d \rangle = \underline{\hspace{2cm}}$ мкм, $F = \underline{\hspace{2cm}}$ мм						
m	x_m , мм	x_{-m} , мм	$\langle x \rangle$, мм	$\sin\varphi$	λ_m , мкм	$\langle \lambda \rangle$, мкм
Червоний	1					
	2					
	3					
	відповідь:			$\lambda_q = \langle \lambda \rangle \pm U(\lambda)$		=
Синій	1					
	2					
	3					
	відповідь:			$\lambda_c = \langle \lambda \rangle \pm U(\lambda)$		=

Таблиця 3

$\Delta\lambda_{3-c} =$	__МКМ		
t	1	2	3
φ_3 , рад			
φ_c , рад			
φ_{ch} , рад			
$\Delta\varphi_{3-c}$, рад			
$\Delta\varphi_{ch-3}$, рад			
D_{3-c} , мкм ⁻¹			
D_{ch-3} , мкм ⁻¹			
$\langle D \rangle$, мкм ⁻¹			
теор. D_c , мкм ⁻¹			
теор. D_3 , мкм ⁻¹			
теор. D_{ch} , мкм ⁻¹			
$\langle D_{теор} \rangle$, мкм ⁻¹			
δ , %			

ЛІТЕРАТУРА

1. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Фізика (Фізика для інженерів): Підручник /: - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017.- 513с. - Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19035>.
2. Кучерук І.М., Горбачук І.І. Загальний курс фізики. Оптика. Квантова фізика. Том 3, §§4.1, 4.3, 4.4. - К: Техніка, 1999р.
3. Лопатинський Е.С., Зачек І. Р., Ільчук Г. А., Романишин Б.М.. Фізика. Підручник. – Львів: Афіша, 2009.-386с.
3. Скіцько І.Ф., Скіцько О.І. Обробка результатів фізичних вимірювань. Навч. посіб./ КПІ ім. Ігоря Сікорського/: -Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.- 88 с. - Доступ: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/25320>.
4. Бурдаков А.В., Жабітенко М.К., Оліх О.Я., Подолян А.О. Лабораторний практикум з курсу «Оптика» для студентів природничих факультетів. – К.: Видавничо - поліграфічний центр «Київський університет», 2006. – 37-42с

ЗАТВЕРДЖЕНО

на засіданні кафедри загальної фізики
 Протокол №6 від 09.05. 2024р.
 Протоколи до лабораторних робіт
 підготували доцент І.Ф.Скіцько і старший
 викладач Н.М.Бруква.

Довідникові таблиці

1. ОСНОВНІ ТРИГОНОМЕТРИЧНІ ФОРМУЛИ

$\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$ $\sec^2 \alpha - \operatorname{tg}^2 \alpha = 1$ $\operatorname{csc}^2 \alpha - \operatorname{ctg}^2 \alpha = 1$ $\sin \alpha \cdot \operatorname{csc} \alpha = 1$ $\cos \alpha \cdot \sec \alpha = 1$ $\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \alpha = 1$	$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \sin \beta$ $\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta$ $\operatorname{tg}(\alpha \pm \beta) = \frac{\operatorname{tg} \alpha \pm \operatorname{tg} \beta}{1 \mp \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta}$ $\operatorname{ctg}(\alpha \pm \beta) = \frac{\operatorname{ctg} \alpha \cdot \operatorname{ctg} \beta \mp 1}{\operatorname{ctg} \beta \pm \operatorname{ctg} \alpha}$
$\sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2 \alpha}}$ $\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}$ $\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cos \alpha$ $\cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha$ $\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2 \operatorname{tg} \alpha}{1 - \operatorname{tg}^2 \alpha}$ $\operatorname{ctg} 2\alpha = \frac{\operatorname{ctg}^2 \alpha - 1}{2 \operatorname{ctg} \alpha}$	$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$ $\sin \alpha - \sin \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$ $\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cos \frac{\alpha - \beta}{2}$ $\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$ $\operatorname{tg} \alpha \pm \operatorname{tg} \beta = \frac{\sin(\alpha \pm \beta)}{\cos \alpha \cdot \cos \beta}$ $\operatorname{ctg} \alpha \pm \operatorname{ctg} \beta = \pm \frac{\sin(\alpha \pm \beta)}{\sin \alpha \cdot \sin \beta}$
$\sin(\alpha/2) = \sqrt{\frac{1 - \cos \alpha}{2}}$ $\cos(\alpha/2) = \sqrt{\frac{1 + \cos \alpha}{2}}$	$2 \sin \alpha \sin \beta = \cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)$ $2 \cos \alpha \cos \beta = \cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)$ $2 \sin \alpha \cos \beta = \sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta)$

2. ФОРМУЛИ ДЛЯ НАБЛИЖЕНИХ РОЗРАХУНКІВ

$$\frac{1}{1 \pm x} \approx 1 \mp x, \quad x < 0,031$$

$$(1 \pm x)^{1/2} \approx 1 \pm \frac{1}{2}x, \quad x < 0,085$$

$$\exp(\pm x) \approx 1 \pm x + \frac{1}{2}x^2, \quad x < 0,045$$

$$\ln(1 \pm x) \approx \pm x, \quad x < 0,045$$

$$\sin x \approx x, \quad x < 0,077 \text{ рад (4,4}^\circ\text{)}$$

$$\cos x \approx 1 - \frac{1}{2}x^2, \quad x < 0,387 \text{ рад (22,2}^\circ\text{)}$$

3. ДЕЯКІ ЧИСЛА

$$e = 2,718282$$

$$\lg e = 0,434294$$

$$\ln 10 = 2,302585$$

$$\lg x = 0,4343 \ln x$$

$$\ln x = 2,3026 \lg x$$

$$\pi = 3,1415926$$

$$\pi^2 = 9,869624$$

$$\sqrt{\pi} = 1,7724538$$

4. ДЕСЯТИЧНІ ПРИСТАВКИ ДО ОДИНИЦЬ

Г – гіга (10^9)	г – гекто (10^2)	мк – мікро (10^{-6})
М – мега (10^6)	с – санти (10^{-2})	н – нано (10^{-9})
к – кіло (10^3)	м – мілі (10^{-3})	п – піко (10^{-12})

5. ТАБЛИЦЯ ПОХІДНИХ ТА ІНТЕГРАЛІВ

Функція	Похідна	Функція	Похідна	Функція	Похідна
x^n	nx^{n-1}	$\sin x$	$\cos x$	$\arcsin x$	$\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
$\frac{1}{x}$	$-\frac{1}{x^2}$	$\cos x$	$-\sin x$	$\arccos x$	$-\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
$\frac{1}{x^n}$	$-\frac{n}{x^{n+1}}$	$\operatorname{tg} x$	$\frac{1}{\cos^2 x}$	$\operatorname{arctg} x$	$\frac{1}{1+x^2}$
\sqrt{x}	$\frac{1}{2\sqrt{x}}$	$\operatorname{ctg} x$	$-\frac{1}{\sin^2 x}$	$\operatorname{arcctg} x$	$-\frac{1}{1+x^2}$
e^x	e^x	\sqrt{u}	$\frac{u'}{2\sqrt{u}}$	$\operatorname{sh} x$	$\operatorname{ch} x$
e^{nx}	ne^{nx}	$\ln u$	$\frac{u'}{u}$	$\operatorname{ch} x$	$\operatorname{sh} x$
a^x	$a^x \ln a$	$\frac{u}{v}$	$\frac{vu' - v'u}{v^2}$	$\operatorname{th} x$	$\frac{1}{\operatorname{ch}^2 x}$
$\ln x$	$\frac{1}{x}$			$\operatorname{cth} x$	$-\frac{1}{\operatorname{sh}^2 x}$

6. ГУСТИНИ РЕЧОВИН

Тверді речовини	ρ , г/см ³	Тверді речовини	ρ , г/см ³
АЛМАЗ	3,5	МОЛБДЕН	10,2
АЛЮМІНІЙ	2,7	НАТРІЙ	0,97
ВОЛЬФРАМ	19,1	НІКЕЛЬ	8,9
ГРАФІТ	1,6	ОЛОВО	7,4
ЗАЛІЗО(СТАЛЬ)	7,8	ПЛАТИНА	21,5
ЗОЛОТО	19,3	КОРОК	0,20
КАДМІЙ	8,65	СВИНЕЦЬ	11,3

КОБАЛЬТ	8,9	СРІБЛО	10,5
ЛІД	0,916	ТИТАН	4,5
МІДЬ	8,9	УРАН	19,0
МОЛІБДЕН	10,2	ПОРЦЕЛЯНА	2,3

Рідини	ρ , г/см ³	Гази(за нормальних умов)	ρ , мг/см ³
ЦИНК	7,0		
БЕНЗОЛ	0,88		
ВОДА	1,00	АЗОТ	1,25
ГЛЦЕРИН	1,26	АМІАК	0,77
КАСТОРОВЕ МАСЛО	0,90	ВОДЕНЬ	0,09
ГАС	0,80	ПОВІТРЯ	1,293
РТУТЬ	13,6	КИСЕНЬ	1,43
СПИРТ	0,79	МЕТАН	0,72
ВАЖКА ВОДА	1,1	ВУГЛЕКИСЛИЙ ГАЗ	1,98
ЕФІР	0,72	ХЛОР	3,21

7. ДІЕЛЕКТРИЧНІ ПРОНИКНОСТІ (відносні)

Діелектрик	ϵ	Діелектрик	ϵ
ВОДА	81	СЛЮДА	7,5
ПОВІТРЯ	1,00058	СПИРТ	26
ГАС	2,0	СКЛО	6,0
ПАРАФІН	2,0	ПОРЦЕЛЯНА	6,0
ПЛЕКСИГЛАС	3,5	ЕБОНІТ	2,7
ПОЛІЕТИЛЕН	2,3		

8. ПИТОМИЙ ОПІР ПРОВІДНИКІВ

Провідник	Питомий опір (якщо $t = 20^{\circ}\text{C}$) ρ , нОм · м	Температурний коефіцієнт $\alpha \cdot 10^3$, K^{-1}
АЮМІНІЙ	26	4,5
ВОЛЬФРАМ	50	4,8
ЗАЛІЗО	90	6,5
ЗОЛОТО	20	4,0
МІДЬ	16	4,3
СВИНЕЦЬ	190	4,2
СРІБЛО	15	4,1
ГРАФІТ	3900	-0,8

9. ВЛАСТИВОСТІ ФЕРОМАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Матеріали магніто-жорсткі	Склад (%), останнє залізо	Коерцитивна сила, А/м	Залишкова індукція, Тл
Сталь вуглецева	0,9C, 1Mn	4000	1,00
Сталь вольфрамова	0,4C, 6W	5200	1,05
Сталь кобальтова	1,0C, 3Co, 4Cr, 0,4Mn	6400	1,00
Альніко	19Ni, 10Al, 18Co, 3Cu	52000	0,90
Платина – залізо	78Pt	120000	0,60
Платина – кобальт	77Pt, 23Co	320000	0,50

Матеріали магніто - м'яккі	% домішки	Відносна початкова проникність	Відносна максим. проникність	Коерцитивна сила, А/м	Залишкова індукція, Тл
Залізо чисте	0,05 дом.	10000	200000	4	2,15
Залізо технічне	0,20 дом.	150	5000	80	2,15
Сталь	0,2 C	120	2000	140	2,12

Пермалой	78,5 Ni-Fe	8000	100000	4	1,08
Нікель	99 Ni	110	600	56	0,61
Ферит	Ni – Zn	1000	2000	8	0,25

10. ДОВЖИНИ ХВИЛЬ ГОЛОВНИХ ФРАУНГФЕРОВИХ ЛІНІЙ

Довжина хвилі, мкм	Колір лінії	Елемент, який випромінює лінію
0,7665	ТЕМНО-ЧЕРВОНА	K
0,7065	ЧЕРВОНА	He
0,6563	ЧЕРВОНА	H
0,5893	ЖОВТА	Na
0,5873	ЖОВТА	He
0,5461	ЗЕЛЕНА	Hg
0,4861	ГОЛУБА	H
0,4358	СИНЯ	Hg
0,4340	СИНЯ	H
0,4047	ФІОЛЕТОВА	Hg

11. ДОВЖИНИ ХВИЛЬ ЯСКРАВИХ ЛІНІЙ В СПЕКТРІ РТУТНОЇ ЛАМПИ

Забарвлення лінії	Довжина хвилі, мкм
Жовте	0,57907
Жовте	0,57696
Зелене	0,54607
Голубе	0,49160
Синє	0,43583
Фіолетове	0,40778
Фіолетове	0,40466

12. ПОКАЗНИКИ ЗАЛОМЛЕННЯ

Речовина	n	Речовина	n
ПОВІТРЯ	1,00029	СКЛО	1,50
ВОДА	1,33	АЛМАЗ	2,42

Примітка: відомо, що, показники заломлення залежать від природи речовини та довжини хвилі світла, тому наведені в цій таблиці значення n потрібно розглядати як умовні.

Довжина хвилі λ , мкм	КОЛІР	Ісландський шпат		Кварц	
		n_e	n_o	n_e	n_o
0,687	ЧЕРВОНИЙ	1,484	1,653	1,550	1,541
0,656	ОРАНЖЕВИЙ	1,485	1,655	1,551	1,542
0,589	ЖОВТИЙ	1,486	1,658	1,553	1,544
0,527	ЗЕЛЕНИЙ	1,489	1,664	1,556	1,547
0,486	БЛАКИТНИЙ	1,491	1,668	1,559	1,550
0,431	СИНЬО-ФІОЛЕТОВИЙ	1,495	1,676	1,564	1,554
0,400	ФІОЛЕТОВИЙ	1,498	1,683	1,568	1,558

13. КОЕФІЦІЄНТ ПОВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ a_T І ПИТОМИЙ ОПІР (ρ) ВОЛЬФРАМУ ПРИ РІЗНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ (T)

T, К	a_T , відн. од.	ρ , нОм·м
1000	0,115	257
1500	0,194	418
2000	0,260	591
2500	0,303	772
3000	0,334	962
3500	0,351	1157

14. ОСНОВНІ ФІЗИЧНІ КОНСТАНТИ

Швидкість світла у вакуумі	$c = \begin{cases} 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с} \\ 2,998 \cdot 10^{10} \text{ см/с} \end{cases}$
Гравітаційна стала	$G = \begin{cases} 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2) \\ 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см}^3/(\text{г} \cdot \text{с}^2) \end{cases}$
Стандартне прискорення вільного падіння	$g = \begin{cases} 9,807 \text{ м/с}^2 \\ 980,7 \text{ см/с}^2 \end{cases}$
Число Авогадро	$N_A = \begin{cases} 6,025 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1} \\ 6,025 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \end{cases}$
Універсальна газова стала	$R = \begin{cases} 8,314 \text{ Дж/моль} \\ 8,314 \cdot 10^7 \text{ ерг/моль} \end{cases}$
Стала Больцмана	$k = \begin{cases} 1,380 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \\ 1,380 \cdot 10^{-16} \text{ ерг/К} \end{cases}$
Елементарний заряд	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Маса електрона	$m_e = \begin{cases} 0,911 \cdot 10^{-30} \text{ кг} \\ 0,911 \cdot 10^{-27} \text{ г} \\ 0,511 \text{ МеВ} \end{cases}$
Питомий заряд електрона	$\frac{e}{m_e} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Маса протона	$m_p = \begin{cases} 1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг} \\ 1,672 \cdot 10^{-24} \text{ г} \end{cases}$
Стала Стефана-Больцмана	$\sigma = \begin{cases} 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4) \\ 5,67 \cdot 10^{-5} \text{ ерг}/(\text{с} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{К}^4) \end{cases}$
Стала закону зміщення Віна	$b = 0,29 \text{ см} \cdot \text{К}$
Стала Планка	$\hbar = \begin{cases} 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \\ 1,054 \cdot 10^{-27} \text{ ерг} \cdot \text{с} \\ 0,6582 \cdot 10^{-15} \text{ еВ} \cdot \text{с} \end{cases}$
Стала Рідберга	$R_\lambda = \begin{cases} 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1} \\ 1,097 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1} \end{cases}$ $R_\omega = 2,067 \cdot 10^{16} \text{ рад/с}$
Перший Боровський радіус	$r_1 = \begin{cases} 0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м} \\ 0,529 \cdot 10^{-8} \text{ см} \end{cases}$
Енергія зв'язку електрона в атомі водню	$W = 13,56 \text{ еВ}$

Атомна одиниця маси	$1 \text{ а.о.м.} = \begin{cases} \frac{1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг}}{1,660 \cdot 10^{-24} \text{ г}} \\ 931,4 \text{ МеВ} \end{cases}$
Електрична стала	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ м/Ф}$
Магнітна стала	$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$