

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА  
КАФЕДРА БІОФІЗИЧНОЇ ХІМІЇ, ФІЗИКИ І ПЕДАГОГІКИ

*Ю. В. Рассохіна, Р. О. Пишкін.*

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ  
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ «ФІЗИКА»**

*Для здобувачів денної форми навчання  
спеціальності 125 Кібербезпека та захист інформації*

Вінниця  
2024

*Затверджено на засіданні вченої ради  
факультету хімії, біології і біотехнологій ДонНУ імені Василя Стуса  
(протокол № 6 від 26.01.2024 р.)*

**Укладачі:** *Рассохіна Ю. В.*, доктор фізико-математичних наук, ст. наук. співроб., професор кафедри біофізичної хімії, фізики і педагогіки ДонНУ імені Василя Стуса;

*Пишкін Р. О.*, завідувач навчальної лабораторії загальної фізики, STEM технологій викладання і педагогіки ДонНУ імені Василя Стуса.

**Рецензенти:** *Ніколюк П. К.*, доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій ДонНУ імені Василя Стуса;

*Білинський Й. Й.*, доктор фізико-математичних наук, професор кафедри загальної фізики ВНТУ.

**Р 244** Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Фізика»: для здобувачів денної форми навчання спеціальності 125 Кібербезпека та захист інформації / укл. Ю. В. Рассохіна, Р. О. Пишкін. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2024. 104 с.

Методичні вказівки розроблені на основі програми курсу «Фізика», що викладається студентам I курсу спеціальності 125 Кібербезпека та захист інформації. Видання містить вказівки до виконання лабораторних робіт з різних тем курсу загальної фізики, а саме механіки, молекулярної фізики, електрики, оптики. У посібнику зроблений акцент на роботи з електрики, тобто дослідження електричних схем постійного і змінного струму. До кожної лабораторної роботи наведені коротка теорія, опис лабораторної установки, перелік устаткування, порядок виконання роботи і рекомендації щодо математичної обробки результатів вимірювання. До кожної роботи також наведені протоколи вимірювань, які студенти мають заповнювати безпосередньо під час виконання робіт. У посібнику до кожної лабораторної роботи наведені питання для підготовки і захисту лабораторної роботи.

**УДК 53(076.5)**

© Рассохіна Ю. В., 2024

© Пишкін Р. О., 2024

© ДонНУ імені Василя Стуса, 2024

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Загальні положення про оформлення лабораторних робіт та розрахунків похибок.....                                                                                 | 4         |
| Список основних фізичних констант .....                                                                                                                          | 7         |
| <i>Лабораторна робота № 1. Вивчення законів кінематики і динаміки поступального руху на машині Атвуда.....</i>                                                   | <i>8</i>  |
| <i>Лабораторна робота № 2. Вивчення законів обертального руху за допомогою маятника Обербека .....</i>                                                           | <i>13</i> |
| <i>Лабораторна робота № 3. Пружний центральний удар куль .....</i>                                                                                               | <i>18</i> |
| <i>Лабораторна робота № 4. Вимірювання прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника .....</i>                                                | <i>23</i> |
| <i>Лабораторна робота № 5. Вимірювання швидкості польоту кулі за допомогою балістичного маятника .....</i>                                                       | <i>27</i> |
| <i>Лабораторна робота № 6. Вимірювання питомої теплоємності металів методом охолодження.....</i>                                                                 | <i>31</i> |
| <i>Лабораторна робота № 7. Вивчення електростатичного поля.....</i>                                                                                              | <i>37</i> |
| <i>Лабораторна робота № 8. Дослідження залежності опору металу і напівпровідника від температури та визначення ширини забороненої зони напівпровідника .....</i> | <i>44</i> |
| <i>Лабораторна робота № 9. Визначення радіуса кривизни лінзи та довжини світлової хвилі за допомогою кілець Ньютона .....</i>                                    | <i>51</i> |
| <i>Лабораторна робота № 10. Визначення довжини хвилі лазерного випромінювання за допомогою дифракційної ґратки на оптичній лаві.....</i>                         | <i>57</i> |
| <i>Лабораторна робота № 11. Вивчення загасаючих електричних коливань.....</i>                                                                                    | <i>63</i> |
| <i>Лабораторна робота № 12. Вивчення явища електрорушійної сили самоіндукції .....</i>                                                                           | <i>71</i> |
| <i>Лабораторна робота № 13. Вивчення явища резонансу в електричних колах.....</i>                                                                                | <i>77</i> |
| <i>Лабораторна робота № 14. Перехідні процеси в RL-колі .....</i>                                                                                                | <i>85</i> |
| <i>Лабораторна робота № 15. RC-контур за умови змінного струму.....</i>                                                                                          | <i>89</i> |
| <i>Лабораторна робота № 16. Взаємна індукція двох соленоїдів .....</i>                                                                                           | <i>94</i> |
| Додаток А. Програмна реалізація методу найменших квадратів.....                                                                                                  | 100       |
| Додаток Б. Звіт з лабораторної роботи (зразок).....                                                                                                              | 102       |
| Перелік джерел .....                                                                                                                                             | 103       |

## ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРО ОФОРМЛЕННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ТА РОЗРАХУНОК ПОХИБОК

Кожен студент повинен мати зошит, у якому записується назва лабораторної роботи, мета роботи, основні формули, фізичні величини, які безпосередньо вимірюються (таблиця) або розраховуються за формулами, відповіді на питання щодо допуску до виконання роботи і перебіг виконання роботи. Математичні розрахунки бажано виконувати з використанням комп'ютерних програм.

*Звіт про виконання лабораторної роботи* має бути виконаний на окремих аркушах і повинен містити:

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

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

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

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

потім її середньоквадратична похибка:

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

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

**Розрахунок середнього значення і похибки** величини  $V$ , яка безпосередньо не вимірюється і розраховується за відповідною формулою, тобто  $V$  є функцією декількох величин  $V = f(\alpha, \ell, \omega)$ , які безпосередньо вимірюються –  $\alpha_i, \ell_i, \omega_i$ .

У цьому разі спочатку знаходяться середні значення  $\bar{\alpha}, \bar{\ell}, \bar{\omega}$  за формулою (1), потім – середнє значення величини  $\bar{V} = f(\bar{\alpha}, \bar{\ell}, \bar{\omega})$ , далі розраховують похибки виміряних величин  $\sigma_\alpha, \sigma_\ell, \sigma_\omega$  за формулою (2). Похибка величини  $V$  знаходиться за формулою:

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

Результат записується так:  $V = \bar{V} \pm \sigma_V$ .

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

У деяких лабораторних роботах необхідно знайти величину, яка є коефіцієнтом пропорційності у функціональній залежності  $y_i = f(x_i)$  (наприклад, температурний коефіцієнт електричного опору провідника  $\alpha$  у функції  $R_i = R_0(1 + \alpha t_i)$ ). В такому разі використовують метод найменших квадратів. Цей метод використовують тільки у тому разі, коли функціональну залежність  $y_i = f(x_i)$  можна представити у відповідній системі координат лінійною функцією. Наприклад, функція  $z_i = z_0 e^{-kt_i}$  перетвориться в лінійну функцію, якщо взяти натуральний логарифм функції  $\ln z_i = -kt_i + \ln z_0$ , тоді в системі координат  $\ln z_i - t_i$  отримаємо пряму лінію. Порівнюючи отриманий вираз із рівнянням прямої  $y_i = kx_i + b$ , маємо:  $\ln z_i$  – це  $y_i$ ,  $t_i$  – це  $x_i$ , а  $\ln z_0$  – це  $b$ . Так, формула закону Кюри–Вейса  $\chi_i = C/(T_i - \theta)$  для магнітної сприйнятливості  $\chi_i$  перетворюється в лінійну функцію саме в такий спосіб:

$$\chi_i^{-1} = C^{-1}(T_i - \theta),$$

де  $k = C$ ,  $b = \theta \cdot C^{-1}$ .

### **Метод найменших квадратів (лінійна регресія)**

Ідея методу найменших квадратів полягає в тому, щоб знайти такі  $k$  і  $b$  прямої  $y = kx + b$ , щоб її ординати  $y$  мали найменші відхилення від експериментальних значень  $y_i$ , тобто щоб сума квадратів:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n (kx_i + b - y_i)^2$$

була найменшою. Для цього необхідно, щоб виконувалися умови для частинних похідних функції  $\frac{\partial \varphi}{\partial k} = 0$  і  $\frac{\partial \varphi}{\partial b} = 0$ , з цих двох рівнянь знаходять невідомі коефіцієнти  $k$  і  $b$ . Нехтуючи викладками, наведемо формули для  $k$  і  $b$ :

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

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

Для визначення похибок  $\sigma_k$ ,  $\sigma_b$  знайдених параметрів  $k$  і  $b$  прямої  $y = kx + b$  необхідно зробити таке: розрахувати  $y_{ip} = kx_i + b$ , використовуючи виміряні  $x_i$  та знайдені  $k$  і  $b$ , потім розрахувати величину  $\varphi_m$ :

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

тоді похибка параметра  $k$  знаходиться за формулою:

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

а похибка параметра  $b$  – за формулою:

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

У процесі обробки результатів вимірювання (знаходження похибок) виконуються арифметичні дії множення і ділення. Отже, постає питання, скільки знаків (цифр) після коми залишати. Оскільки береться найбільша похибка, то роблять так: якщо приладом вимірюється величина, наприклад, до **третього** знаку після коми, то після **кожної** арифметичної дії залишають **чотири** знаки після коми, а в кінцевому підсумку четвертий знак округлюють: якщо четвертий знак дорівнює 5 і більше, то третій знак збільшують на одиницю, а четвертий знак відкидають; якщо четвертий знак менший за 5, то його відкидають.

## СПИСОК ОСНОВНИХ ФІЗИЧНИХ КОНСТАНТ

| Фізичні константи            |                                                         |
|------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Швидкість світла у вакуумі   | $c = 2.99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с}$                 |
| Прискорення вільного падіння | $g = 9.80665 \text{ м/с}^2$                             |
| Число Авогадро               | $N_A = 6.022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$        |
| Універсальна газова стала    | $R = 8.314510 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$           |
| Стала Больцмана              | $k = 1.380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$              |
| Заряд електрона              | $e = 1.60217733 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$              |
| Маса електрона               | $m_e = 9.109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$              |
| Маса протона                 | $m_p = 1.6726231 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$             |
| Маса нейтрона                | $m_n = 1.6749286 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$             |
| Стала Рідберга               | $R_y = 13.605693009(84) \text{ еВ}$                     |
| Радіус Бора                  | $a_0 = 5.2917720859(36) \cdot 10^{-11} \text{ м}$       |
| Магнетон Бора                | $\mu_B = 927.400968(20) \cdot 10^{-26} \text{ Дж/Тл}$   |
| Електрична стала             | $\varepsilon_0 = 8.85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ |
| Магнітна стала               | $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$               |
| Стала Планка                 | $h = 6.626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$ |

## Лабораторна робота № 1

### Вивчення законів кінематики і динаміки поступального руху на машині Атвуда

**Мета роботи:** дослідити закони рівноприскореного руху тіл.

**Прилади й обладнання:** машина Атвуда, тягарці, електронний блок.

#### Опис експериментальної установки

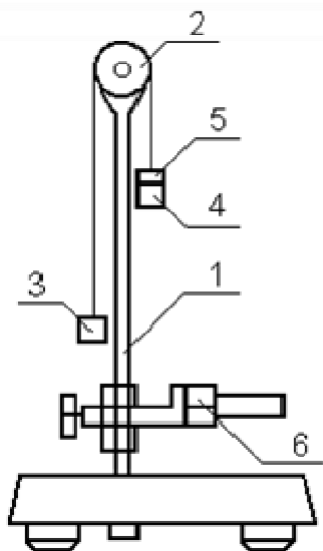


Рис. 1. Машина Атвуда

Машина Атвуда складається з укріпленого на штативі 1 блоку 2, через який перекинута нитка з підвішеними на ній однаковими вантажами 3 і 4 (рис. 1). Маса цих вантажів може бути збільшена додатковими невеликими вантажами (тягарцями) 5. Якщо на вантаж масою  $m_1$  покласти тягарець з масою  $m$ , то вся система почне рухатися рівноприскорено.

На верхньому кронштейні встановлено електромагнітне гальмо, призначене для фіксації вантажів. Верхній кронштейн можна переміщувати уздовж стійки та фіксувати у будь-якому положенні, встановлюючи такий спосіб довжину шляху рівноприскореного руху. Для визначення цього шляху на стійці є міліметрова шкала та візир.

Нижній кронштейн оснащений фотоелектричним датчиком 6 з оптичною віссю на рівні вказівника кронштейна, після перетину якої нижньою гранню вантажу, що падає, утворюється електричний сигнал, який відзначає проходження вантажами певного шляху.

На передній панелі *мілісекундоміра* розміщені такі маніпуляційні елементи: «СЕТЬ» – вимикач мережі. Натискання цієї клавіші спричиняє увімкнення напруги живлення і автоматичне скидання схем приладу (усі індикатори висвітлюють цифру нуль і світяться лампочки фотоелектричних датчиків).

«СБРОС» – установка нуля вимірювача. Натискання цієї клавіші спричиняє скидання схем мілісекундоміра.

«ПУСК» – керування електромагнітом. Натискання цієї клавіші вимикає електромагніт та генерує імпульс дозволу на вимірювання.

#### Коротка теорія

Фізична система складається із двох тіл, пов'язаних між собою (рис. 2). Ці тіла вважатимуться матеріальними точками. Обидва вантажі взаємодіють із Землею та ниткою. Отже, на кожен вантаж діють сила тяжіння та сила натягу нитки. Введемо спрощення: нитки вважатимемо невагомими та нерозтяжними. Якщо маса блоку є невеликою, порівняно з  $m_1$ , і тертя мале, то обертання блоку практично не вимагає застосування до нього обертового моменту, тому сили натягу нитки по обидва боки блоку рівні одна одній.

Нехтуючи масою нитки проти маси вантажів, можна з великим ступенем точності вважати, що вантажі рухаються рівноприскорено. Якщо не враховувати розтягнення нитки, то в кожен момент часу вантажі на її кінцях матимуть однакові за величиною прискорення.

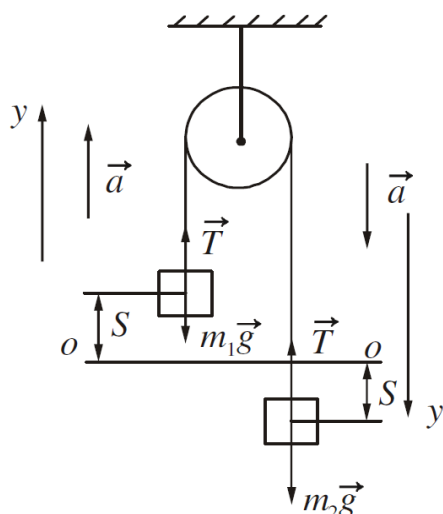


Рис. 2. Система двох тіл на блоці

Розставимо сили, що діють на кожен вантаж, вкажемо напрямок прискорення  $\vec{a}$  (рис. 2). Запишемо для кожного вантажу другий закон Ньютона:

$$T - m_1 g = m_1 a; \quad (1)$$

$$m_2 g - T = m_2 a. \quad (2)$$

Виключаючи силу натягу  $T$ , отримаємо:

$$a = g \frac{m_2 - m_1}{m_2 + m_1}. \quad (3)$$

Враховуючи, що  $m_2 = m_1 + m$  ( $m$  – маса тягарця), отримаємо:

$$a = \frac{m g}{2m_1 + m}. \quad (4)$$

## Порядок виконання роботи

### Вправа 1. Дослідження закону рівноприскореного руху

**Коротка теорія.** Рівноприскореним називається рух, за якого значення прискорення з часом не змінюється. Для рівноприскореного руху залежність шляху від часу має вигляд:

$$S = v_0 t + \frac{at^2}{2}.$$

Якщо початкова швидкість  $v_0 = 0$ , то:

$$S = \frac{at^2}{2}.$$

1. Перекиньте через блок **2** нитку з двома вантажами **3** і **4** і переконайтеся, що система знаходиться в положенні байдужої рівноваги.

2. Встановіть кронштейн зі фотодатчиком **6** у нижній частині шкали вертикальної стійки, а фотодатчик розташуйте так, щоб правий вантаж під час руху вниз проходив у центрі робочого вікна фотодатчика (за нижнє положення вантажу береться поділка шкали, що відповідає поділці на корпусі фотодатчика і є наче продовженням оптичної осі фотодатчика, яку перетинає рухомий вантаж). Встановіть правий вантаж у крайньому верхньому положенні.

3. Покладіть на правий вантаж одне з навантажень **5**. Натисніть на кнопку «ПУСК» блоку. Відбувається розгальмовування електромагніту, правий вантаж починає опускатися і таймер блоку починає відлік часу. Під час перетину правим вантажем оптичної осі фотодатчика відлік часу припиниться. Запишіть покази таймера, тобто час руху вантажів, у протокол вимірювань.

4. Визначте за шкалою пройдений вантажем шлях як відстань від нижньої основи вантажу (у верхньому положенні) до оптичної осі фотодатчика.

5. Повторіть дослід щонайменше 5 разів, змінюючи  $S$  на 2–3 см.

6. Побудуйте графік залежності  $S = f\left(\frac{t^2}{2}\right)$ .

7. Використовуючи графік, розрахуйте експериментальне значення прискорення  $a_{експ}$  як тангенс кута нахилу графіка.

8. Обчисліть теоретичне значення прискорення  $a_{теор}$  за формулою (4).

9. Порівняйте  $a_{експ}$  і  $a_{теор}$ . Зробіть висновок.

### **Вправа 2. Перевірка другого закону Ньютона**

*Коротка теорія.* Відповідно до другого закону Ньютона, добуток маси  $M$  системи тіл та її прискорення  $\vec{a}$  дорівнює векторній сумі всіх сил, що діють на систему:

$$M\vec{a} = \vec{F}, \quad (5)$$

де  $M = m_1 + m_2$  – маса системи.

Прискорення  $\vec{a}$  надається системі силою:

$$F = (m_2 - m_1)g. \quad (6)$$

Лінійна залежність прискорення  $a$  системи від сили  $F$  має підтвердити правильність другого закону Ньютона за умови, що маса системи не змінюється.

1. Покладіть усі тягарці на правий вантаж. Проведіть вимірювання часу  $t$  аналогічно до вправи 1 для значення різниці мас  $(m_2 - m_1)$ , кожна з яких дорівнює масі усіх тягарців.

2. Зніміть з правого вантажу один з дрібних тягарців і перекладіть його на лівий вантаж. Проведіть вимірювання часу  $t$  для нового значення різниці мас  $(m_2 - m_1)$ .

3. Проведіть вимірювання часу  $t$  для різних значень різниці мас  $(m_2 - m_1)$ , комбінуючи тягарці в різних поєднаннях. Перекладаючи дрібні тягарці з одного боку в інший, отримайте 5 різних варіантів різниці мас  $(m_2 - m_1)$  у межах від 2 г до 15 г.

Занесіть вимірювання у протокол. Важливо: загальна маса системи має бути незмінною. Верхнє положення правого тягарця, тобто шлях  $S$ , має бути також фіксованим.

4. Обчисліть значення прискорення  $a$  за результатами кожного досліду:

$$a = \frac{2S}{t^2}.$$

5. Розрахуйте значення сили  $F$  за формулою (6).

6. Побудуйте графік залежності прискорення від сили  $a = f(F)$ .

### **Контрольні питання та завдання**

#### ***Підготовка до роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Який закон перевіряється у вправі 1? Які величини вимірюються безпосередньо?
2. Який закон перевіряється у вправі 2? Які величини вимірюються безпосередньо?
3. Які графіки необхідно побудувати в кожній вправі?
4. Як за графіком залежності  $S = f\left(\frac{t^2}{2}\right)$  визначити прискорення  $a$ ?

#### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Який рух називається рівномірним? Запишіть формулу залежності шляху від часу для цього типу руху.
2. Який рух називається рівноприскореним? Запишіть формулу залежності шляху і швидкості від часу для цього типу руху.
3. Сформулюйте другий закон Ньютона. Запишіть формулу.
4. Зробіть висновок за результатами роботи.

### **Рекомендовані джерела**

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пищюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко; за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.
2. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Київ: Техніка, 1999. 536 с.
3. Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Юр'єв С. О. Лабораторний практикум з фізики / Львівська політехніка, 2015. 188 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 1  
**«ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ КІНЕМАТИКИ І ДИНАМІКИ  
ПОСТУПАЛЬНОГО РУХУ НА МАШИНІ АТВУДА»**

Виконав / виконала: \_\_\_\_\_

Група: \_\_\_\_\_

**Вправа 1**

Маса рухомого вантажу  $m$  \_\_\_\_\_ кг.

Маса тягарця  $m_1$  \_\_\_\_\_ кг.

| № досліду | $S_1$ , м | $t$ , с | $t^2/2$ , с <sup>2</sup> |
|-----------|-----------|---------|--------------------------|
| 1         |           |         |                          |
| 2         |           |         |                          |
| 3         |           |         |                          |
| 4         |           |         |                          |
| 5         |           |         |                          |

**Вправа 2**

| № досліду | $S$ , м | $t$ , с | $m_2 - m_1$ , кг | $a$ , м/с <sup>2</sup> | $F$ , Н |
|-----------|---------|---------|------------------|------------------------|---------|
| 1         |         |         |                  |                        |         |
| 2         |         |         |                  |                        |         |
| 3         |         |         |                  |                        |         |
| 4         |         |         |                  |                        |         |
| 5         |         |         |                  |                        |         |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 2

### Вивчення законів обертального руху за допомогою маятника Обербека

**Мета роботи:** експериментальна перевірка основного закону обертального руху твердого тіла.

**Прилади й обладнання:** маятник Обербека, набір вантажів, секундомір.

#### Опис експериментальної установки

Для виконання роботи використовується маятник Обербека, який схематично

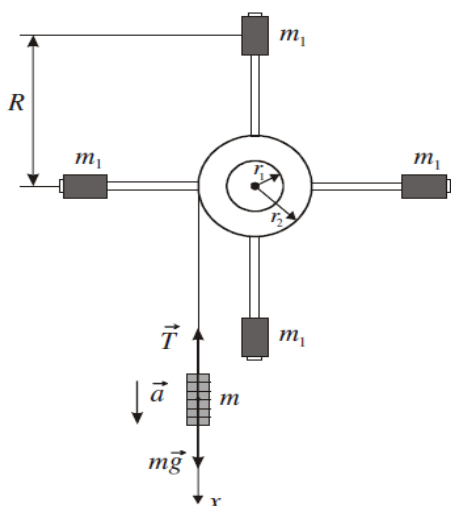


Рис. 1. Маятник Обербека

зображено на рис. 1. Сутність маятника Обербека — хрестовина, що складається з чотирьох стрижнів, укріплених на втулці під прямим кутом. На цю саму втулку насаджено два шківів різних радіусів ( $r_1$  і  $r_2$ ). На стрижнях розміщено вантажі масою  $m_1$  кожен. Вісь закріплена в підшипниках так, що вся система може обертатися навколо горизонтальної осі. Пересуваючи вантажі по стрижнях, можна змінювати момент інерції  $I$  маятника. На шківів намотується нитка, до якої прив'язаний вантаж відомої маси. Нитка натягується і створює обертаючий момент, який можна змінювати, перемотуючи нитку зі шківів на шків.

#### Загальні положення

Обертання твердого тіла постійної маси навколо нерухомої осі описується основним рівнянням динаміки обертального руху:

$$M = I\varepsilon, \quad (1)$$

де  $M$  — момент зовнішніх сил, які діють на тіло, відносно осі обертання;

$I$  — момент інерції тіла;

$\varepsilon$  — кутове прискорення.

Момент інерції  $I_1$  всієї обертової системи відносно осі обертання складається з моменту інерції хрестовини і моменту інерції вантажів:

$$I_1 = I_0 + 4 \cdot m_1 R_1^2, \quad (2)$$

де  $I_0$  — момент інерції хрестовини без вантажів відносно осі обертання;

$m_1$  — маса вантажу на стрижні;

$R_1$  — відстань від осі обертання до середини вантажу  $m_1$ .

За умови зміни відстані  $R$  від осі обертання до вантажів  $m_1$  момент інерції системи зміниться і дорівнюватиме:

$$I_2 = I_0 + 4m_1 R_2^2. \quad (3)$$

Віднімемо один вираз від іншого:

$$I_2 - I_1 = 4m_1(R_1^2 - R_2^2). \quad (4)$$

Права частина рівності (4) може бути обчислена за даними  $m_1, R_1, R_2$ .

Значення  $I_2$  та  $I_1$  визначимо за допомогою основного рівняння динаміки обертального руху (1). Обертальний момент  $M$  створюється силою натягу нитки  $T$ . Він дорівнює добутку сили натягу нитки та довжини плеча. Довжиною плеча у цьому випадку є радіус шківів.

Силу натягу нитки визначимо з другого закону Ньютона. На вантаж масою  $m$  діють дві сили: сила тяжіння  $m\vec{g}$  і сила натягу нитки  $\vec{T}$ . Під дією цих сил він рухається униз рівноприскорено з прискоренням  $a$ . Запишемо другий закон Ньютона через проєкцію на напрямок руху:

$$mg - T = ma.$$

З цього виразу випливає, що:

$$T = m(g - a). \quad (5)$$

Обертаючий момент:

$$M = T \cdot r = m(g - a) \cdot r. \quad (6)$$

Підставляючи вираз (6) у формулу (1), знайдемо момент інерції обертової системи:

$$I = \frac{M}{\varepsilon} = \frac{m \cdot (g - a) \cdot r}{\varepsilon}. \quad (7)$$

Кутове і лінійне прискорення пов'язані співвідношенням:

$$a = \varepsilon \cdot r. \quad (8)$$

Вантаж  $m$  рухається рівноприскорено, тому:

$$h = \frac{at^2}{2}.$$

Звідси отримаємо вираз для прискорення:

$$a = \frac{2h}{t^2}.$$

Тоді кутове прискорення буде дорівнювати:

$$\varepsilon = \frac{2h}{t^2 r}.$$

Підставляючи значення  $a$  та  $\varepsilon$  у вираз (7), отримаємо:

$$I = mr^2 \left( \frac{gt^2}{2h} - 1 \right). \quad (9)$$

За формулою (9) можна обчислити  $I_1$  та  $I_2$ , потім різницю моментів інерції,  $I_2 - I_1$  і перевірити рівність (4), виконання якої підтверджує справедливність основного закону динаміки обертального руху.

### Порядок виконання роботи

1. Готуючи установку до вимірювань, необхідно встановити стійку так, щоб вантаж під час опускання не зачіпав фотоелементів. Виміряйте штангенциркулем діаметри  $d$  двоступеневого шківів. До одного зі шківів прикріпіть нитку, до іншого кінця нитки підвісьте вантаж  $m$  і перекиньте нитку через верхній блок.

2. Установіть кронштейн із фотодатчиком у нижній частині шкали вертикальної стійки і розташуйте фотодатчик так, щоб вантаж  $m$  під час руху вниз проходив по центру робочого вікна фотодатчика. За нижнє положення вантажу береться відмітка шкали, що відповідає рисці на корпусі фотодатчика і є наче продовженням оптичної осі фотодатчика, яку перетинає рухомий вантаж.

3. Закріпіть вантаж  $m_1$  **посередині** стрижнів так, щоб система перебувала в стані байдужої рівноваги. Запишіть значення маси  $m_1$  вантажу на спиці, вказане на установці.

4. Виміряйте відстань  $R_1$  від осі обертання до середини вантажу  $m_1$ .

5. Запишіть значення маси  $m$  вантажу, який кріпиться до нитки, у протокол.

6. Обертаючи маятник, установіть вантаж маси  $m$  у крайньому верхньому положенні так, щоб нижня основа вантажу співпала з однією з рисок шкали вертикальної стійки. Зафіксуйте вантаж у цьому положенні. Для цього натисніть на кнопку «СЕТЬ» блоку, водночас повинен спрацювати фрикціон електромагніту.

7. Визначте за шкалою висоту  $h$  (відстань від нижньої основи вантажу в верхньому положенні до оптичної осі фотодатчика), занесіть у протокол.

8. Натисніть на кнопку «ПУСК» блоку. Відбудеться розгальмування електромагніту, вантаж почне опускатися, і таймер блоку почне відлік часу. Під час перетину вантажем оптичної осі фотодатчика відлік часу припиниться. Запишіть дані таймера, тобто час руху гирі  $t$ , у протокол вимірювань.

9. Запишіть значення  $t$  і, повернувши вантаж у верхнє положення, натисніть клавішу «СБРОС» (тільки в такій послідовності!). Дослід повторити мінімум три рази. Знайдіть середнє значення часу падіння вантажу, занесіть у протокол.

10. Прикріпіть і намотайте нитку на малий шків. Проведіть вимірювання згідно з п. 6–9.

11. Розташуйте вантажі  $m_1$  на **кінцях** стрижнів. Виміряйте відстань  $R_2$  від осі обертання до середини вантажу  $m_1$ .

12. Виконайте вимірювання згідно з п. 6–9, намотуючи нитку спочатку на великий шків, а потім на малий.

13. Обчисліть моменти інерції  $I_1$  та  $I_2$  за формулою (9). Знайдіть середнє значення моменту інерції для кожного положення вантажів, занесіть у протокол.

14. Розрахуйте різницю моментів інерції (ліва частина формули (4)).

15. Розрахуйте праву частину формули (4), використовуючи виміряні значення  $R_1, R_2$  і відоме значення  $m_1$ .

16. Порівняйте результати, отримані в п. 14 та п. 15.

### **Контрольні питання та завдання**

#### ***Підготовка до роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Сформулюйте мету роботи.
2. Які величини в роботі вимірюються безпосередньо?
3. Запишіть формулу, за якою розраховується момент інерції системи. Поясніть сенс позначень.

#### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Сформулюйте основний закон динаміки обертального руху. Запишіть формулу.
2. Дайте визначення моменту інерції системи частинок відносно осі. Від яких величин залежить момент інерції твердого тіла?
3. Сформулюйте теорему Штейнера. Запишіть формулу.
4. Який висновок можна зробити з порівняння результатів, отриманих у пунктах 14 та 15?

### **Рекомендовані джерела**

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пицюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко; за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.

2. Русаков В. Ф. Физические основы механики: учебное пособие. Винница: ДонНУ, 2015. 129 с.

3. Козицький С. В., Поліщук Д. Д. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Одеса: Астропринт, 2011. 472 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 2  
«ВИВЧЕННЯ ЗАКОНІВ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ ЗА ДОПОМОГОЮ  
МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА»

Виконав / виконала: \_\_\_\_\_

Група: \_\_\_\_\_

Маса вантажів, закріплених на спиці  $m_1$  \_\_\_\_\_ кг.

Маса вантажу, що падає  $m$  \_\_\_\_\_ кг.

Висота падіння вантажу  $h$  \_\_\_\_\_ м.

Діаметр великого шківа  $d_2$  \_\_\_\_\_ м.

Діаметр малого шківа  $d_1$  \_\_\_\_\_ м.

| № шківа | $r, м$ | $R, м$ | $t_1, с$ | $t_2, с$ | $t_3, с$ | $t_{сер}, с$ | $I, кг \cdot м^2$ | Примітка                                |
|---------|--------|--------|----------|----------|----------|--------------|-------------------|-----------------------------------------|
| 1-й     |        |        |          |          |          |              |                   | Вантажі знаходяться посередині стрижнів |
| 2-й     |        |        |          |          |          |              |                   |                                         |
| середнє |        |        |          |          |          |              |                   |                                         |
| 1-й     |        |        |          |          |          |              |                   | Вантажі знаходяться на кінцях стрижнів  |
| 2-й     |        |        |          |          |          |              |                   |                                         |
| середнє |        |        |          |          |          |              |                   |                                         |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

### Лабораторна робота № 3

#### Пружний центральний удар куль

**Мета роботи:** визначити швидкість куль, які співударяються, час співударяння, середню силу співудару.

**Прилади й обладнання:** експериментальна установка для вивчення пружного центрального удару куль.

#### Опис експериментальної установки

Схема експериментальної установки показана на рис. 1.

До штатива **1** прикріплені дві кулі **2**. Кути відхилення підвісів від вертикалі визначаються за шкалами **3**. Електромагніт **4** слугує для отримання однієї з куль у відхиленому положенні.

#### Коротка теорія

*Абсолютно пружним* називається такий удар, за якого механічна енергія тіл не переходить в інші (немеханічні) види енергії. Удар називається *центральною*, якщо кулі до удару рухаються по прямій, яка проходить через їх центри.

За абсолютно пружного удару виконуються закон збереження імпульсу і закон збереження механічної енергії. Позначимо масу першої кулі  $m_1$ , масу другої –  $m_2$ . Перша куля до удару знаходиться в стані спокою, тобто  $v_1 = 0$ . Тоді закон збереження імпульсу і закон збереження механічної енергії матимуть такий вигляд:

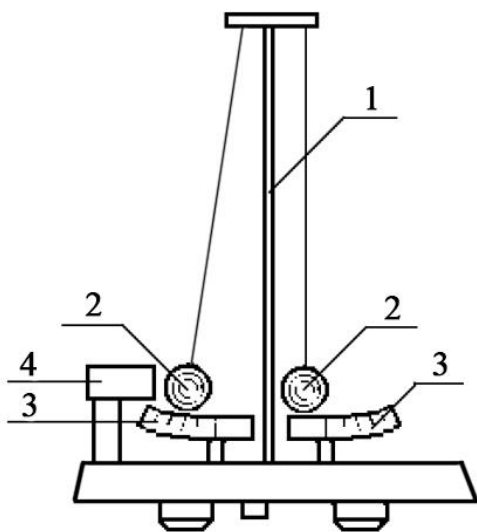


Рис. 1. Схема установки

$$m_2 v_2 = m_1 u_1 + m_2 u_2, \quad (1)$$

$$\frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}, \quad (2)$$

де  $v_2$  – швидкість другої кулі до удару;

$u_1$  та  $u_2$  – швидкості куль після удару.

Розв'язавши систему рівнянь (1)–(2), можна визначити швидкості куль після удару:

$$u_1 = \frac{2m_2 v_2}{m_1 + m_2}; \quad (3)$$

$$u_2 = \frac{(m_2 - m_1)v_2}{m_1 + m_2}. \quad (4)$$

Якщо маси куль однакові, то з (3) випливає, що  $u_1 = v_2$ , а з (4) випливає, що  $u_2 = 0$ .

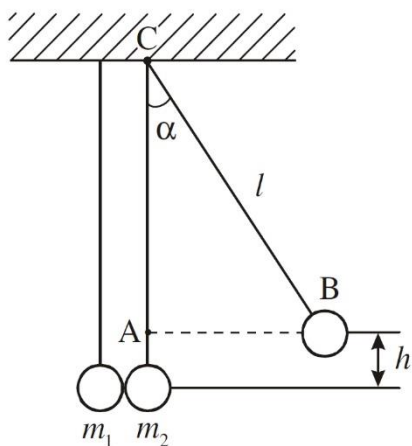


Рис. 2. Пружний центральний удар куль

Це означає, що кулі «обмінялися» швидкостями, тобто друга куля після удару зупиняється, а перша набуває швидкості, яку мала друга до удару.

Відведемо кулю масою  $m_2$  від положення рівноваги на кут  $\alpha$  (рис. 2). За таких умов вона підніметься на висоту  $h$  і набуде потенціальної енергії:

$$W_{\text{п}} = m_2 gh. \quad (5)$$

У момент удару потенційна енергія повністю переходить у кінетичну:

$$W_{\text{к}} = \frac{m_2 v_2^2}{2}. \quad (6)$$

Згідно із законом збереження механічної енергії:

$$m_2 gh = \frac{m_2 v_2^2}{2}. \quad (7)$$

Звідси:

$$v_2 = \sqrt{2gh}. \quad (8)$$

З  $\triangle ABC$  (див. рис. 2) випливає, що:

$$\cos \alpha = \frac{l - h}{l}.$$

Тоді:

$$h = l(1 - \cos \alpha). \quad (9)$$

Підставимо (9) у співвідношення (8), отримаємо:

$$v_2 = \sqrt{2gl(1 - \cos \alpha)}. \quad (10)$$

Для визначення сили  $\vec{F}$  співудару куль використаємо другий закон Ньютона в такому вигляді:

$$\vec{F} \cdot \Delta t = m_2 \Delta \vec{v}, \quad (11)$$

де  $\Delta t = t$  – час співударяння кульок;

$\Delta v = u_2 - v_2$  – зміна швидкості другої кульки.

Оскільки  $u_2 = 0$ , то:

$$F = \frac{m_2 v_2}{t}. \quad (12)$$

Масу кульки розрахуємо за її густиною і відомим радіусом:

$$m_2 = \frac{4}{3} \rho \pi r^3, \quad (13)$$

де  $r = 0.015$  м – радіус кулі,  $\rho = 7\,700$  кг/м<sup>3</sup> – густина матеріалу (сталь).

### **Порядок виконання роботи**

#### ***Вправа 1. Експериментальні вимірювання***

1. Зафіксуйте у протоколі вимірювань параметри установки.
2. На пульті блоку натисніть кнопку «СБРОС», водночас на табло індикації висвітяться нулі, на електромагніт буде подано напругу.
3. Відведіть праву кулю на кут  $\alpha = 5^\circ$  та зафіксуйте її за допомогою електромагніту, зупиніть іншу кулю, якщо вона колихається.
4. Натисніть кнопку «ПУСК», водночас відбудеться удар куль. За допомогою шкал візуально визначте кути відскоку  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$ . За таймером блоку визначте час співударяння куль. Повторіть дослід 5 разів і занесіть дані у протокол.
5. Виконайте вимірювання відповідно до пунктів 2–4, відхиляючи кульку  $m_2$  на кут  $\alpha = 10^\circ$ , а потім на кут  $\alpha = 15^\circ$ .
6. Розрахуйте середній час співударяння куль для кожного кута.

#### ***Вправа 2. Порядок розрахунків***

1. За формулою (10) визначте швидкість кулі в момент удару для кожного кута відхилення кулі.
2. За формулою (13) розрахуйте масу кулі.
3. За формулою (12) розрахуйте середню силу співудару куль для кожного кута відхилення кулі.
4. Зробіть висновок за результатами роботи.

### **Контрольні питання та завдання**

#### ***Підготовка до роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. У чому полягає мета роботи?
2. Які фізичні величини вимірюються безпосередньо (прямі вимірювання)?
3. Запишіть формулу, за якою розраховується швидкість куль у момент удару, поясніть зміст кожного позначення, що входять до цієї формули.
4. Запишіть формулу, за якою розраховується середня сила співудару куль, поясніть зміст кожного позначення, що входять до цієї формули.

## ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Який удар називається абсолютно пружним? Які закони збереження застосовуються до абсолютно пружного удару куль?
2. Сформулюйте закон збереження імпульсу та закон збереження механічної енергії.
3. Який удар називається непружним? Які закони збереження застосовуються до непружного удару куль?

## **Рекомендовані джерела**

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пицюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко; за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.
2. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Київ: Техніка, 1999. 536 с.
3. Лопатинський І. Є., Зачек І. Р., Юр'єв С. О. Лабораторний практикум з фізики / Львівська політехніка, 2015. 188 с.
4. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета «MATHCAD». Київ: НУХТ, 2011. 114 с.
5. Козицький С. В., Поліщук Д. Д. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Одеса: Астропринт, 2011. 472 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 3  
«ПРУЖНИЙ ЦЕНТРАЛЬНИЙ УДАР КУЛЬ»

Виконав / виконала: \_\_\_\_\_

Група: \_\_\_\_\_

Параметри установки:

Довжина підвісу куль  $l =$  \_\_\_\_\_ м.

Радіус кулі  $r =$  \_\_\_\_\_ м.

Густина матеріалу кулі  $\rho =$  \_\_\_\_\_ кг/м<sup>3</sup>.

| № досліду | $\alpha$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $t, c$ | $\alpha$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $t, c$ | $\alpha$ | $\alpha_1$ | $\alpha_2$ | $t, c$ |
|-----------|----------|------------|------------|--------|----------|------------|------------|--------|----------|------------|------------|--------|
| 1         | 5°       |            |            |        | 10°      |            |            |        | 15°      |            |            |        |
| 2         |          |            |            |        |          |            |            |        |          |            |            |        |
| 3         |          |            |            |        |          |            |            |        |          |            |            |        |
| 4         |          |            |            |        |          |            |            |        |          |            |            |        |
| 5         |          |            |            |        |          |            |            |        |          |            |            |        |
| середнє   |          |            |            |        |          |            |            |        |          |            |            |        |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 4

### Вимірювання прискорення вільного падіння за допомогою математичного маятника

**Мета роботи:** експериментальна перевірка закономірностей руху математичного маятника.

**Прилади й обладнання:** маятник універсальний.

#### Теоретичні відомості

*Математичним маятником* називають тіло малого розміру (матеріальну точку), що підвішене до нерухомої точки (осі) на невагомій нерозтяжній нитці, яке рухається, відхиляючись від положення рівноваги на малий кут у вертикальній площині під дією сили тяжіння (рис. 1). У полярних координатах рівняння руху такої системи має вигляд:

$$ml^2\ddot{\varphi} = -mgl \cdot \sin \varphi$$

або

$$\ddot{\varphi} + \omega_0^2 \cdot \sin \varphi = 0,$$

де  $\omega_0^2 = g/l$  і  $\omega_0 = \sqrt{g/l}$  – власна частота коливань математичного маятника.

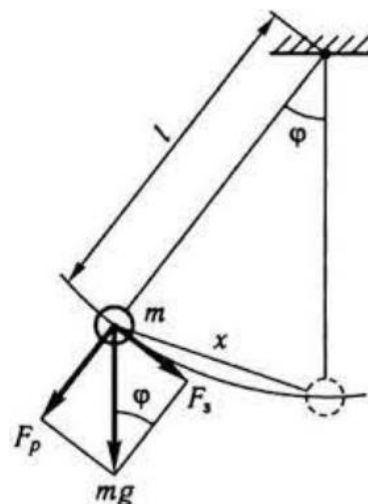


Рис. 1. Математичний маятник

За малих кутів відхилення маятника, для яких можна вважати, що  $\sin \varphi \approx \varphi$ , воно зводиться до рівняння гармонічних коливань:

$$\ddot{\varphi} + \omega_0^2 \cdot \varphi = 0. \quad (1)$$

Розв'язок цього рівняння може бути записаний у вигляді;

$$\varphi = A \cos(\omega_0 t + \delta), \quad (2)$$

де  $A$  – амплітуда коливання;

$\delta$  – початкова фаза коливання.

Отже, математичний маятник здійснює гармонічні коливання з частотою  $\omega_0 = \sqrt{g/l}$  і періодом:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

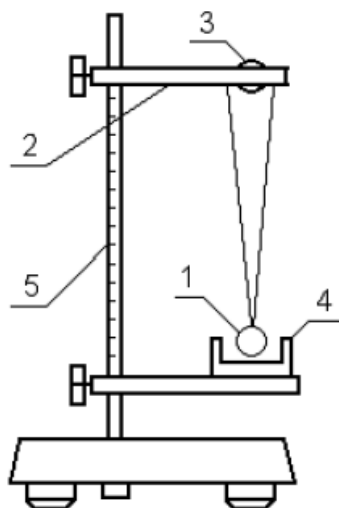


Рис. 2. Схема експериментальної установки

Схему установки представлено на рис. 2. Математичним маятником є металева куля **1**, яка підвішена на двох капронових нитках до кронштейна **2**. На цьому ж кронштейні розташовано гвинт **3**, який дає змогу змінювати довжину підвісу. На нижньому кронштейні закріплено фотодатчик **4**, відстань між кронштейнами визначається за нанесеною на штатив шкалою **5**.

### Порядок виконання роботи

1. Установіть нижній кронштейн з фотодатчиком **4** у крайнє нижнє положення шкали **5** так, щоб верхня площина кронштейна співпадала з однією з рисок шкали. Встановіть верхній кронштейн так, щоб куля **1** математичного маятника опинилася у робочій зоні фотодатчика. Обертаючи гвинт **3**, досягніть такого положення кульки, за якого її центр буде збігатися за висотою з рисою на фотодатчику.

2. За шкалою на вертикальній стійці визначте довжину підвісу математичного маятника, зафіксуйте її у протокол.

3. Увімкніть живлення перемикачем «СЕТЬ» із дозволу викладача.

4. Приведіть математичний маятник у коливальний рух, відхиливши металеву кульку на невеликий кут (приблизно 5 градусів), після чого натисніть кнопку «ПУСК» на блоці. За показами таймера визначте значення часу  $t_1$  для  $N = 50$  коливань маятника. Після цього натисніть кнопку «СТОП».

5. Визначте середнє значення періоду коливань маятника за формулою  $T_1 = t_1/N$ , де  $t_1$  – час коливань,  $N$  – кількість коливань. Зафіксуйте дані у протоколі.

6. Перемістіть угору кронштейн із фотодатчиком на два сантиметри за шкалою вертикальної стійки. Обертаючи гвинт **3**, досягніть такого положення кульки, за якого її центр буде співпадати за висотою з рисою на фотодатчику. За шкалою вертикальної стійки визначте довжину математичного маятника  $\ell_2$ , для цієї довжини виміряйте період  $T_2$ . Далі виміряйте періоди коливань  $T_3, T_4, T_5$  за п. 4–5 для  $\ell_3, \ell_4, \ell_5$ , зменшуючи щоразу довжину підвісу маятника на 2 см. Занесіть дані у протокол.

7. Розрахуйте прискорення вільного падіння двома способами: за графіком і за формулою  $g_i = \frac{4\pi^2 \ell_i}{T_i^2}$ . Для цього необхідно побудувати графік залежності квадрата періоду коливань  $T_i^2$  від довжини підвісу маятника  $\ell_i$ . Апроксимувати отриману залежність прямою лінією  $T_i^2 = k\ell_i + b$ . Знайти коефіцієнт нахилу  $k$  методом найменших квадратів як тангенс кута нахилу, а потім знайти величину прискорення вільного падіння  $g = 4\pi^2/k$  та його похибку. Далі треба знайти величину  $g$  за формулою  $g_i = \frac{4\pi^2 \ell_i}{T_i^2}$ , похибку  $\sigma_g$  і порівняти значення  $g$ , знайдені різними методами.

8. Порівнюючи теоретичні та експериментальні значення прискорення вільного падіння, знайдіть відносну похибку за формулою:

$$\eta = \frac{|g_e - g_T|}{g_T} \cdot 100\%.$$

9. Вимкніть обладнання після закінчення дослідів, покажіть результати викладачу.

### ***Підготовка до роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Від чого залежить похибка вимірювання періоду коливань маятника?
2. За яких умов кульку, підвішену на нитці до кронштейна, можна вважати математичним маятником?
3. Які величини вимірюються у цій роботі?
4. Виведіть формулу для визначення похибки прискорення вільного падіння.

### **Контрольні питання та завдання**

#### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Від чого залежить прискорення сили земного тяжіння?
2. Поясніть, чому на екваторі і на полюсах Землі прискорення вільного падіння мають різну величину?
3. Як зміниться рух кульки маятника, якщо підвіс (кронштейн) буде рухатися вертикально униз із прискоренням  $a \geq g$ , догори –  $a \leq g$ ?
4. Чому Земля, яка притягується Сонцем, не падає на Сонце, а довільний предмет, який притягується Землею, падає на Землю?

### **Рекомендовані джерела**

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пицюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко; за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.

2. Русаков В. Ф. Фізичні основи механіки: навчальний посібник. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 144 с.

3. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Київ: Техніка, 1999. 536 с.

4. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета mathcad. Київ: НУХТ, 2011. 114 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 4  
**«ВИМІРЮВАННЯ ПРИСКОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПАДІННЯ  
ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИЧНОГО МАЯТНИКА»**

Виконав / виконала: \_\_\_\_\_

Група: \_\_\_\_\_

| № досліду | $l, м$ | $N$ | $t, с$ | $T, с$ |
|-----------|--------|-----|--------|--------|
| 1         |        |     |        |        |
| 2         |        |     |        |        |
| 3         |        |     |        |        |
| 4         |        |     |        |        |
| 5         |        |     |        |        |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

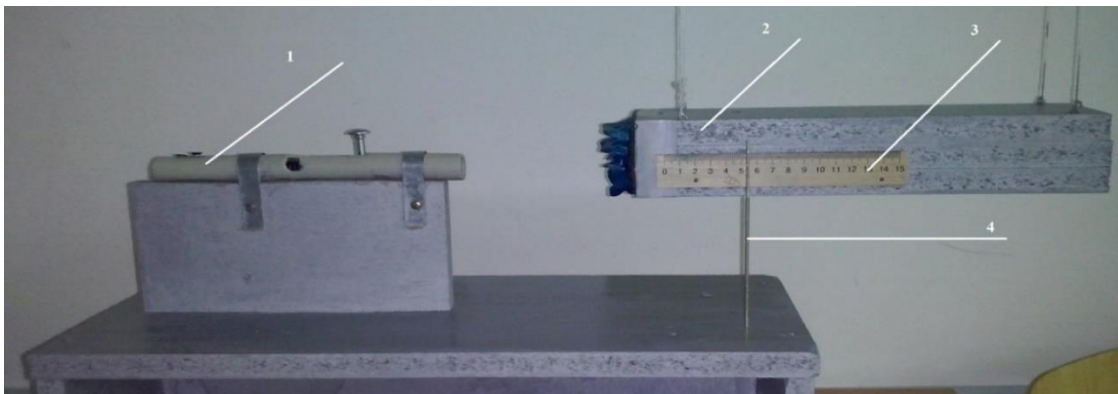
*Лабораторна робота № 5*  
**Вимірювання швидкості польоту кулі**  
**за допомогою балістичного маятника**

**Мета роботи:** засвоєння методики використання балістичного маятника для визначення швидкості польоту кулі.

**Прилади й обладнання:** балістичний маятник, пружинна гармата, набір куль різної маси, міліметрова шкала.

**Опис установки**

Балістичний маятник являє собою важке тіло, підвішене на подвійному біфілярному підвісі (рис. 1). Для визначення зміщення маятника **2** використовується закріплена на маятнику лінійка **3** і стрижень **4**. Пружинна гармата **1** потрібна для набрання швидкості кулею. Поверхня маятника, у яку влучає куля, вкрита пластиком, щоб куля застрягла в ньому і взаємодія була непружна.



*Рис. 1. Загальний вигляд установки для вимірювання швидкості польоту кулі з допомогою балістичного маятника*

**Методичні вказівки до виконання роботи**

Маятник після потрапляння в нього кулі рухається поступально. У цьому пристрої час  $t$  зіткнення кулі з маятником малий, порівняно з періодом  $T$  коливань маятника, тому систему «куля-маятник» у процесі зіткнення можна вважати замкнутою й застосувати до неї закон збереження імпульсу. Для абсолютно непружного удару закон збереження імпульсу має вигляд:

$$mv = (M + m)u, \quad (1)$$

де  $m$  – маса кулі;

$M$  – маса маятника;

$v$  – швидкість кулі перед ударом;

$u$  – швидкість маятника з кулею після удару.

Враховуючи, що  $M \gg m$ , з рівняння (1) можна отримати:

$$v = \frac{M}{m}u. \quad (2)$$

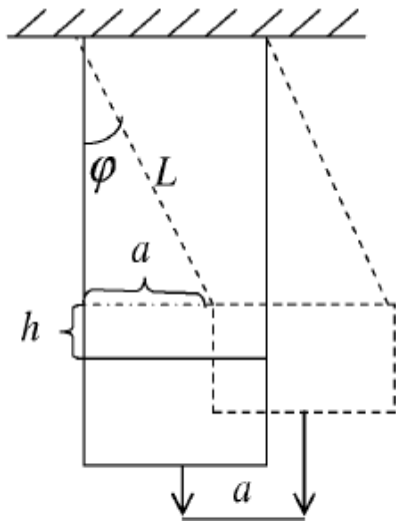


Рис. 2. Вимірювані параметри

Після удару маятник відхилиться від положення рівноваги й підніметься на висоту  $h$  (рис. 2). Нехтуючи в цьому процесі тертям об повітря, із закону збереження механічної енергії отримаємо:

$$\frac{(M+m)}{2} u^2 = (M+m)gh. \quad (3)$$

Знайшовши  $u$  з (3) і підставивши у (2), знайдемо:

$$v = \frac{M}{m} \sqrt{2gh}. \quad (4)$$

Величину  $h$  можна визначити, вимірявши кут  $\varphi$  відхилення маятника від положення рівноваги:

$$h = 2L \sin^2 \frac{\varphi}{2}, \quad (5)$$

де  $L$  – довжина нитки. Тоді:

$$v = \frac{2M}{m} \sqrt{gL} \cdot \sin \frac{\varphi}{2}. \quad (6)$$

У цій роботі зручніше визначити не кут  $\varphi$ , а висоту  $h$  через горизонтальне зміщення  $a$ :

$$h = L - \sqrt{L^2 - a^2}. \quad (7)$$

Тоді формула для розрахунку швидкості кулі буде мати вигляд:

$$v = \frac{M}{m} \sqrt{2g(L - \sqrt{L^2 - a^2})}. \quad (8)$$

Так, для вимірювання швидкості кулі необхідно знати масу кулі  $m$ , масу маятника  $M$ , довжину підвісу маятника  $L$ , прискорення вільного падіння  $g$ , та виміряти величину зміщення маятника  $a$ .

Відносна похибка швидкості кулі буде розраховуватися за формулою:

$$\frac{\sigma_v}{v} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_M}{M}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_g}{2g}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\sigma_L}{\sqrt{L^2 - a^2}}\right)^2 + \left(\frac{a\sigma_a}{2L\sqrt{L^2 - a^2}}\right)^2}. \quad (9)$$

### Порядок виконання роботи

1. Запишіть маси  $m_1$  і  $m_2$  двох куль у протокол.
2. Помістіть кулю у пружинну гармату, зробіть постріл і виміряйте горизонтальне зміщення  $a_i$  маятника.

3. Зробіть 5 пострілів, знайдіть середнє значення зсуву маятника  $\langle a \rangle$  та його похибку. Результати вимірювань занесіть у таблицю протоколу вимірювань.
4. Визначте швидкість польоту кулі за формулою (8). Значення маси маятника візьміть  $M = 0.95$  кг й довжини нитки  $L = 1.84$  м.
5. Підрахуйте похибку  $\sigma_v$  швидкості кулі за формулою (9).
6. Для кулі іншої маси повторіть дії згідно з пунктами 1–5.
7. Після закінчення дослідів покажіть результати викладачу.

### **Підготовка до роботи**

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Сформулюйте мету роботи.
2. Що прийнято за основу методу вимірювання швидкості кулі в роботі?
3. Сформулюйте закони збереження імпульсу і механічної енергії.
4. Який рух твердого тіла називають поступальним?
5. З якою метою у роботі використовується пластилін?
6. Що називають замкнутою системою?
7. Чому систему «куля–маятник» можна вважати замкнутою?
8. На яких припущеннях побудована теорія дослідів?
9. Викладіть перебіг роботи.

### **Контрольні питання та завдання**

#### **Захист роботи**

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Сформулюйте і доведіть закон збереження імпульсу.
2. Що таке повна механічна енергія?
3. Сформулюйте і доведіть закон збереження механічної енергії.
4. Чи може механічна енергія не зберігатися? Чому дорівнює її зміна?
5. Що таке пружний і непружний удар?
6. У якому з процесів, що відбуваються у цій роботі, виконується, а в якому – не виконується закон збереження механічної енергії?
7. Чи виконується в цій роботі закон збереження імпульсу?
8. Від чого залежить швидкість польоту кулі у цьому експерименті?

### **Рекомендовані джерела**

1. Русаков В. Ф. Фізичні основи механіки: навчальний посібник. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 144 с.
2. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Київ: Техніка, 1999. 536 с.
3. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета mathcad. Київ: НУХТ, 2011. 114 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 5  
«ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ПОЛЬОТУ КУЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ  
БАЛІСТИЧНОГО МАЯТНИКА»

Виконав / виконала: \_\_\_\_\_

Група: \_\_\_\_\_

Маса маятника  $M$  \_\_\_\_\_ кг.

Довжина нитки  $L$  \_\_\_\_\_ м.

| № досліду                   | $m_1 =$ _____ кг | $m_2 =$ _____ кг |
|-----------------------------|------------------|------------------|
|                             | $a_1, м$         | $a_2, м$         |
| 1                           |                  |                  |
| 2                           |                  |                  |
| 3                           |                  |                  |
| 4                           |                  |                  |
| 5                           |                  |                  |
| Середнє $\langle a \rangle$ |                  |                  |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 6

### Вимірювання питомої теплоємності металів методом охолодження

**Мета роботи:** визначити питому теплоємність невідомого металу методом порівняння кінетики охолодження двох зразків, один з яких виготовлений із металу з відомою питомою теплоємністю.

**Прилади й обладнання:** установка для визначення теплоємності металів, набір зразків, секундомір.

### Теоретичні відомості

*Теплоємність* – це фізична величина, яка визначається кількістю теплоти, яку потрібно надати тілу для підвищення його температури на один градус:

$$C = \frac{dQ}{dT}, [\text{Дж}/^\circ\text{K}].$$

*Питома теплоємність* – характеристика речовини, яка вказує кількість теплоти, необхідної для нагрівання одиниці маси речовини на  $1^\circ\text{C}$ , або ж кількість теплоти, що виділяється під час охолодження одиниці маси речовини:

$$c = \frac{C}{m}, [\text{Дж}/^\circ\text{K} \cdot \text{кг}].$$

Закон Дюлонга і Пті, який був відкритий у 1819 році, визначає *питому теплоємність* твердого тіла за формулою:

$$c = \frac{3R}{M},$$

де  $c$  – питома теплоємність;

$R$  – універсальна газова стала;

$M$  – молярна маса речовини.

Закон Дюлонга і Пті справедливий для температур, вищих за *температуру Дебая*. Для того, щоб підвищити температуру, потрібно збільшити кінетичну енергію руху кожного з атомів твердого тіла. Однак внаслідок сильної взаємодії атомів між собою збільшення кінетичної енергії потребує рівного за величиною збільшення потенціальної енергії. Тому теплоємність твердого тіла є вдвічі більшою за теплоємність ідеального газу. Для теплоємності твердого тіла закон Дюлонга і Пті можна переписати у вигляді:

$$c = 3k_B N,$$

де  $c$  – теплоємність,  $k_B$  – стала Больцмана,  $N$  – кількість атомів у кристалі.

Для справедливості закону Дюлонга і Пті необхідно, щоб енергії теплового руху вистачало для збудження всіх можливих типів коливань у твердому тілі. За

низьких температур деякі з коливань не збуджуються. Це явище зумовлене законами квантової статистики (у цьому випадку – статистики Бозе–Ейнштейна). Тому за низьких температур закон Дюлонга і Пті не діє.

Як було встановлено Дюлонгом і Пті, молярна теплоємність твердих одноатомних тіл майже однакова і дорівнює:

$$c_M = 3R.$$

Закон Дюлонга і Пті є дійсним для твердих одноатомних тіл за достатньо високих температур. Для більшості тіл (зокрема для металів) такою високою температурою є вже кімнатна температура.

Процес охолодження твердого тіла з часом описується законом Ньютона. Закон Ньютона охолодження тіла (металу) з часом записується у вигляді диференціального рівняння:

$$\frac{dT}{dt} = k(T_0 - T),$$

де  $T_0$  – температура навколишнього середовища (довкілля або кімнати, де охолоджується тіло),  $t$  – час,  $T$  – поточна температура тіла.

Його розв’язок має вигляд:

$$T = T_0 + (T_{in} - T_0)e^{-kt}, \quad (1)$$

де  $T_{in}$  – початкова температура, з якої починається процес охолодження,  $(T_{in} - T_0)$  – різниця температур у початковий момент часу  $t = 0$ .

Коефіцієнт охолодження тіла  $k$ , що записаний у згасаючій експоненті, виражається через такі параметри:

$$k = \frac{\alpha \cdot S}{m \cdot c}, \quad (2)$$

де  $\alpha$  [Вт/(м<sup>2</sup> · °K)] – коефіцієнт тепловіддачі, тобто кількість теплоти, що віддається з 1 м<sup>2</sup> поверхні за одиницю часу за умови одиничного температурного натиску; він є також функцією процесу тепловіддачі і величиною розрахунковою, а не табличною; визначається експериментально;  $S$  – площа поверхні тіла, що охолоджується;  $m$  – його маса;  $c$  – питома теплоємність (яка, до речі, теж є функцією процесу).

Теоретичний графік процесу охолодження твердого тіла має такий вигляд:

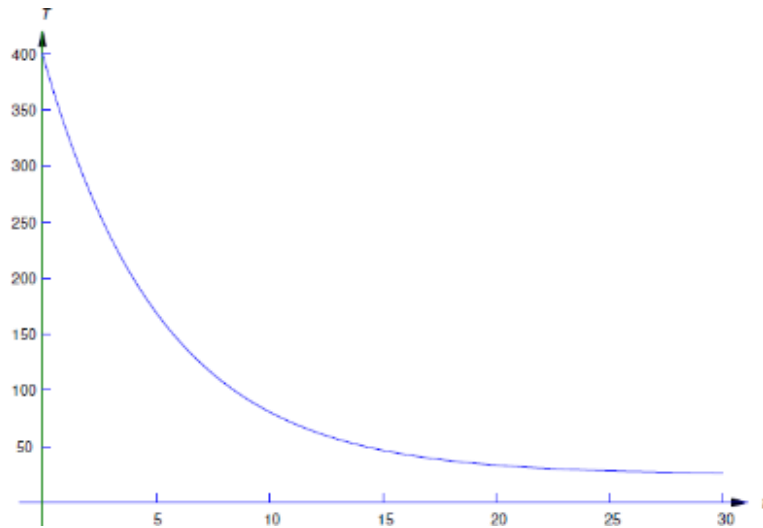


Рис. 1. Залежність температури тіла, що охолоджується, від часу

Тобто в процесі охолодження температура тіла наближається за експоненціальним законом до температури довкілля  $T_0$ .

Якщо маємо два металеві зразки однакової маси, площі і однаковими температурними коефіцієнтами тепловіддачі  $\alpha$ , але різними питомими теплоємностями  $c_{1(2)}$ , то:

$$k_1 c_1 = k_2 c_2 = \frac{\alpha \cdot S}{m} = \text{Const.} \quad (3)$$

Звідки випливає, що якщо відома питома теплоємність першого зразка, то питома теплоємність невідомого зразка буде дорівнювати:

$$c_2 = \frac{k_1}{k_2} c_1. \quad (4)$$

Коефіцієнти затухання  $k_{1(2)}$  можна знайти з експериментальних даних за охолодженням тіл із відомою і невідомою теплоємністю. З рівняння (1) випливає, що:

$$Y(t) = \ln \frac{T - T_0}{T_{in} - T_0} = -kt, \quad (5)$$

тобто функція  $Y(t)$  вже *лінійно* залежить від часу з кутовим коефіцієнтом (похідною), що дорівнює  $-k$ . Кутовий коефіцієнт визначається з таблиці даних вимірювань температури тіла від часу в процесі його охолодження  $T = T(t)$ , наприклад, за методом найменших квадратів.

Отже, питому теплоємність досліджуваного металу  $c_2$  можна визначити, порівнюючи швидкість його охолодження зі швидкістю охолодження еталонного зразка. Для цього використовують спеціальну установку, зображену на рис. 2 і 3.

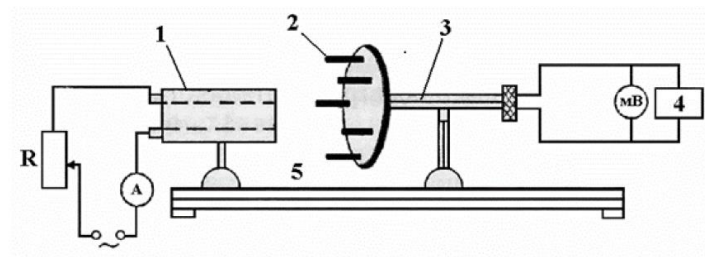


Рис. 2. Установка для визначення питомої теплоємності металів методом охолодження

У кільцевій муфельній печі 1 нагрівають зразки 2, які містять усередині спаї термопари 3, з'єднаної з мілівольтметром і потенціометром 4 (знаходиться у середині вимірювального блоку).

### Порядок виконання роботи

1. Увімкніть блок 1 і 2 лабораторної установки перемикачем «СЕТЬ» (із дозволу викладача!).
2. Ручкою 3 «ОБРАЗЕЦ» виставіть значення 1 (перший зразок).
3. Кнопкою 5 «НАГРЕВ» увімкніть нагрів «WARM» муфельної печі 1.

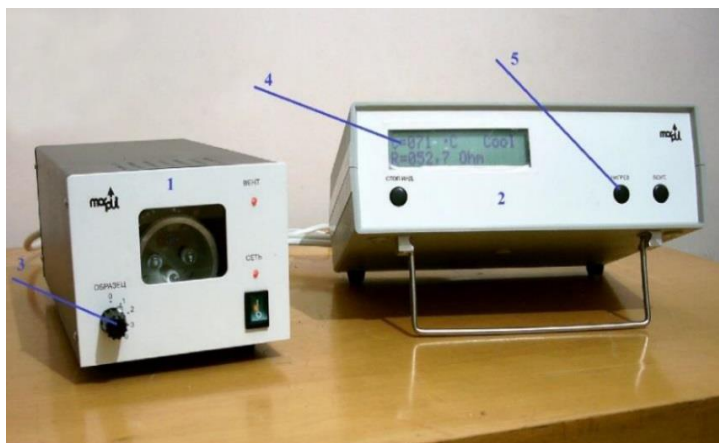


Рис. 3. Загальний вигляд установки

4. Дочекайтеся досягнення температури за індикатором 4 значення  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  (автоматично вимкнеться нагрів і увімкнеться охолодження «COOL»).

5. Із цього моменту часу, як увімкнулося охолодження, починайте відлік часу  $t$  за секундоміром, і через кожну хвилину охолодження (спочатку процесу можна вимірювати із кроком 30 с) знімаємо показники температури  $T$  за індикатором 4, до досягнення значення  $\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (кімнатна температура).

6. Значення температури  $T$  зразка та часу  $t$  за секундоміром під час охолодження запишіть у таблицю протоколу вимірювань.
7. Побудуйте графік залежності температури зразка від часу  $T = f(t)$ .
8. Аналогічні дослідження (п. 2–7) виконайте для зразка 2. Бажано починати вимірювання з однієї і тієї ж температури.
9. Перерахуйте залежність  $T(t)$  у функцію  $Y(t)$  за формулою (5). Побудуйте точкові графіки і за методом найменших квадратів знайдіть кутовий коефіцієнт  $k_{1(2)}$  для кожного зразка. Побудуйте для порівняння отриману пряму  $Y(t) = -kt$ .

10. За формулою (4) визначте  $c_2$ , взявши значення  $c_1$  з таблиці питомих теплоємностей для твердих матеріалів (для міді). Досліджувані зразки мають невеликий об'єм і близькі значення густини, тому  $m_1$  та  $m_2$  приймаємо майже рівними з однаковими поверхнями  $S$ , а також однаковими коефіцієнтами тепловіддачі.

11. Обчисліть абсолютну і відносну похибки експерименту.

### **Контрольні питання та завдання**

#### ***Підготовка до роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Чому питома теплоємність однієї і тієї самої речовини у різних агрегатних станах різна?
2. Як визначити похибку вимірювання температури?
3. Від чого залежить швидкість охолодження тіла?
4. Яке рівняння описує процес охолодження твердого тіла?

#### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Що називають теплоємністю і питомою теплоємністю? У яких одиницях їх вимірюють?
2. Сформулюйте закон Дюлонга і Пті для теплоємності. Що таке температура Дебая?
3. Сформулюйте закон Ньютона охолодження твердого тіла з часом.
4. Чому площі  $S_1$  і  $S_2$  зразків мають бути однаковими?
5. Визначте кількість теплоти, яку віддає 1 кг міді під час охолодженні від температури 100 °С до 20 °С. Питому теплоємність міді взяти з довідника.

### **Рекомендовані джерела**

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пицюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко; за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.

2. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета mathcad. Київ: НУХТ, 2011. 114 с.

3. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Київ: Техніка, 1999. 536 с.



## Лабораторна робота № 7

### Вивчення електростатичного поля

**Мета роботи:** дослідити електростатичне поле, яке створюється зарядженими тілами, застосовуючи метод електростатичних моделей. Вивчити характеристики електростатичного поля.

**Прилади й обладнання:** лабораторна установка ФПЕ-31.

#### Теоретична частина

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

*Напруженість електричного поля*  $\vec{E}$  – векторна фізична величина, силова характеристика електричного поля, чисельно дорівнює силі, яка діє на одиничний позитивний заряд, який розміщено у цій точці поля:

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

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

*Потенціал*  $\varphi$  – скалярна фізична величина, енергетична характеристика електростатичного поля, чисельно дорівнює потенціальній енергії, якою б володів одиничний позитивний заряд у цій точці поля:

$$\varphi = \frac{W_n}{q}.$$

Між напруженістю та потенціалом  $\varphi$  існує такий взаємозв'язок:

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

Вектор напруженості спрямований у бік зменшення потенціалу. У випадку однорідного поля:

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

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

$\Delta r$  – відстань між поверхнями (точками  $r_1$  і  $r_2$ ,  $\Delta r = r_1 - r_2$ ) з потенціалами  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ .

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

Експериментально простіше виміряти потенціал поля, ніж його напруженість.

Під час вивчення розподілу потенціалу електростатичного поля застосовується метод зондів (метод електростатичних моделей). Сутність методу зондів полягає в тому, що в досліджувану точку поля вводиться додатковий електрод-зонд. Він зроблений так, щоб мінімально порушувати своєю присутністю досліджуване поле.

### Пристрій та принцип роботи

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

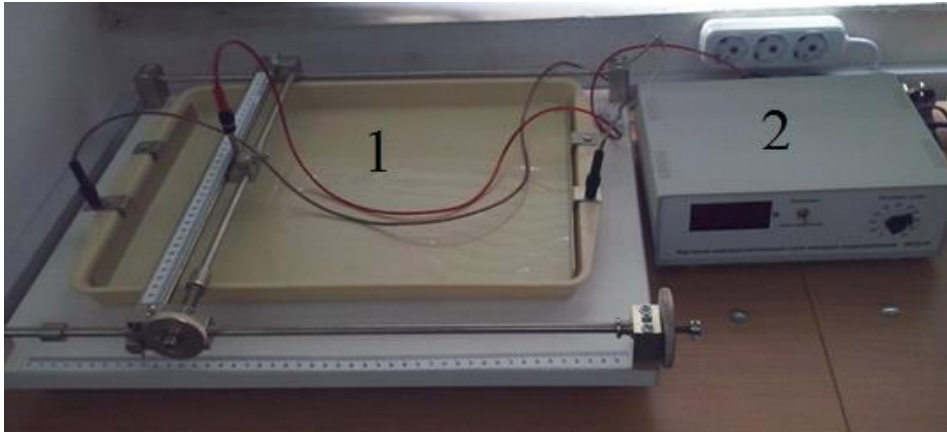


Рис. 1. Зовнішній вигляд установки для вимірювання потенціалу поля

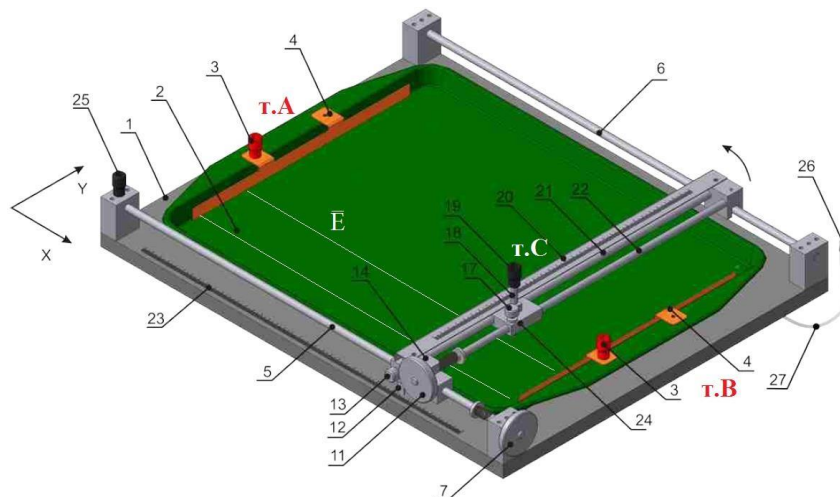


Рис. 2. Зовнішній вигляд електростатичної ванни:

1 – піддон; 2 – ванна; 3 – клєми; 4 – електроди; 5, 6 – напрямні по осі X; 7 – штурвал для точного переміщення по ОХ; 14 – повзунок з пристроєм переміщення по ОУ; 13 – фіксуючий гвинт; 21, 22 – пристрій позиціонування по ОУ; штурвал 11 для точного позиціонування по ОУ; 24 – повзунок з зондом 18; 19 – клєма; 12 – вказівники відліку; 23, 20 – шкали відліку; 26, 27 – зливний шланг.

Пристрій № 1 (рис. 1) призначений для створення однорідного постійного електричного поля (електростатичного поля). Він складається з піддона **1**, на якому

встановлена ванна **2** (у ванні міститься вода, рис. 2). Вода слугує середовищем, у якому створюється електростатичне поле за допомогою двох металевих електродів **4**, розміщених на протилежних сторонах ванни. На електродах встановлено клема **3** для підключення до вимірювального пристрою. До електродів прикладається постійна різниця потенціалів:

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

де  $\varphi_A, \varphi_B$  – потенціали електродів.

Для вимірювання потенціалу електростатичного поля та його напруженості в різних точках поля (ванни) застосовується механізм *позиціонування*. Система позиціонування зонда складається з пристрою переміщення по осі X і пристрою переміщення по осі Y. Пристрій переміщення по осі X складається з рухомої **5** і нерухомої **6** напрямних. Рухома напрямна **5** може переміщуватися на відстань приблизно 10 мм за допомогою штурвала **7** для точного позиціонування по осі X.

По рухомій напрямній **5** переміщується повзунок **14** із пристроєм переміщення по осі Y. За допомогою гвинта **13** повзунок **14** фіксується на напрямній **5**. Пристрій переміщення по осі Y також складається з рухомої **22** і нерухомої **21** напрямних. Рухома напрямна **22** також може переміщуватися на відстань приблизно 10 мм за допомогою штурвала **11** для точного позиціонування зонда по осі Y.

Вимірювання *різниці потенціалів* у довільній точці ванни (наприклад, у точці C) здійснюється зондом за допомогою *компенсаційного методу*. Цей метод дає змогу звести до мінімуму викривлення електричного поля, які створює зонд. Суть компенсаційного методу полягає в тому, щоб *компенсувати струм*, який протікає між зондом (т. C) з потенціалом  $\varphi_C$  і точкою B з потенціалом  $\varphi_B$ . Для цього до зонду прикладають так звану опорну напругу ( $U_{оп} = \varphi_B - \varphi_C$  з протилежною полярністю  $\varphi_B > \varphi_C$ ).

Для створення потенціалів  $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$  застосовується пристрій № 2 установки, який являє собою джерело напруги та індикації (рис. 2). На передній панелі вимірювального пристрою **2** розміщені: тумблер перемикач режиму вимірювання, перемикач опорного потенціалу, індикатор «В». У режимі «ЭЛЕКТРОДЫ» на індикаторі «В» відображається значення напруги на електродах у вольтах. У режимі «НОЛЬ-ИНДИКАТОР» індикатор показує різницю між потенціалом у цій точці поля та опорним потенціалом.

Перемикач опорного потенціалу дає змогу встановити опорний потенціал, рівний: 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1 від різниці потенціалів, що подається на електроди.

Джерело живлення підключається до мережі 220 В, 50 Гц.

Принцип дії установки полягає в дослідженні електростатичного поля за *методом електролітичної ванни*. Відповідно до цього методу, електроди занурені у ванну, заповнену слабо провідною рідиною (водопровідна вода). Між електродами створюється *різниця потенціалів* і за допомогою зонда компенсаційним методом визначаються потенціали різних точок. Лінії струму і розподіл потенціалу у слабо провідній рідині будуть збігатися з силовими лініями і розподілом потенціалу в статичному полі між тими ж електродами.

За допомогою перемикача на вимірювальному пристрої встановлюють опорний потенціал. Переміщаючи зонд за допомогою системи позиціонування, досягають мінімального значення різниці між потенціалом зонда й опорним потенціалом на нуль-індикаторі. Потенціал зонда в цьому випадку дорівнює опорному потенціалу. Координати точки відраховуються за допомогою шкал **23** і **20** і показчиків **12**.

### Порядок виконання роботи

#### *Поле плоских электродів*

1. Заповніть ванну водою.
  2. На листі міліметрового паперу формату А3 накресліть координатні осі  $X$  та  $Y$  (якщо на листі А4, то ліпше в масштабі 1 : 2), та нанесіть контури електродів.
  3. Увімкніть (із дозволу викладача) вимірювальний пристрій.
  4. Зафіксуйте напругу на електродах (переведіть тумблер режиму вимірювання в положення «ЭЛЕКТРОДЫ»).
  5. Встановіть перемикач опорного потенціалу «ПОТЕНЦИАЛ ЗОНДА» на пристрої № 2 в положення 0.1, розрахуйте відповідний потенціал (наприклад: якщо перемикач опорного потенціалу «0.1», а напруга між електродами становить  $\sim 8$  В, це означає, що опорний потенціал дорівнює:  $0.1 \cdot 8 = 0.8$  В).
  6. Переведіть тумблер режиму вимірювання в положення «НУЛЬ-ИНДИКАТОР».
  7. Переміщуйте зонд спочатку по  $Ox$ , а потім по  $Oy$  у ванні за допомогою напрямних 5, 6, 21, 22 та штурвалів 7, 11 до встановлення *мінімального значення різниці потенціалів* на індикаторі (тобто значення, максимально близького до 0).
- Примітка: якщо виникають коливання поверхні води, то для стабілізації показань дочекайтесь припинення процесу коливань.*
8. Виміряйте координати положення зонда за допомогою шкал та показчиків, нанесіть їх на координатну площину.
  9. Переміщуючи зонд, визначте координати ще 5 точок із таким самим значенням потенціалу.
  10. Виконайте вимірювання відповідно до п. 5–7 для інших опорних потенціалів (0.3, 0.5, 0.7, 0.9).

11. Завершивши роботу, вимкніть вимірювальний пристрій за допомогою вимикача «СЕТЬ».

12. За отриманими точками проведіть лінії рівного потенціалу. Накресліть картину силових ліній.

13. Розрахуйте п'ять значень напруженості  $E$  для різних  $\Delta r$  та  $\Delta \phi_{12}$ .

14. Запишіть кінцевий результат для напруженості однорідного поля у вигляді:

$$E = \bar{E} \pm \Delta E.$$

15. Знайдіть відносну похибку вимірювань.

### **Контрольні питання та завдання**

#### ***Підготовка до роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Сформулюйте мету роботи.

2. Поле електродів якої форми необхідно дослідити у цій роботі? Яку назву має таке поле?

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

#### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Дайте визначення напруженості електростатичного поля, запишіть формулу і одиниці вимірювання.

2. Дайте визначення потенціалу, запишіть формулу для потенціалу електричного поля, вкажіть одиниці вимірювання.

3. Яке поле називається однорідним? Нарисуйте силові лінії електричного поля конденсатора.

4. Яке взаємне розташування силових ліній та еквіпотенціальних поверхонь електростатичного поля?

5. Від чого залежить робота з переміщення заряду в такому полі?

6. У який спосіб за розподілом потенціалу можна визначити напрямки силових ліній?

7. Порівняйте роботи  $W$ , які треба виконати, щоб перемістити одиничний електричний заряд в електричному полі конденсатора з точки  $A$  в точку  $B$  різними шляхами (шляхи 1, 2, 3) і з точки  $A$  в точку  $C$  (шлях 4):  $W_{AB}(1)$ ,  $W_{AB}(2)$ ,  $W_{AB}(3)$ ,  $W_{AC}(4)$  (рис. 3.).

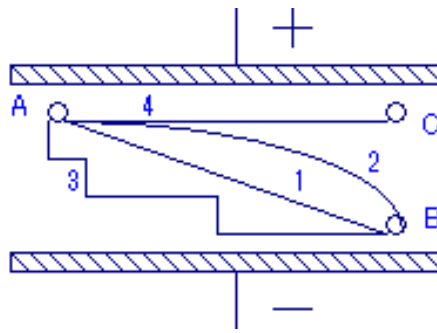


Рис. 3. Траєкторії переміщення заряду

### Рекомендовані джерела

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пицюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко; за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.

2. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета mathcad. Київ: НУХТ, 2011. 114 с.

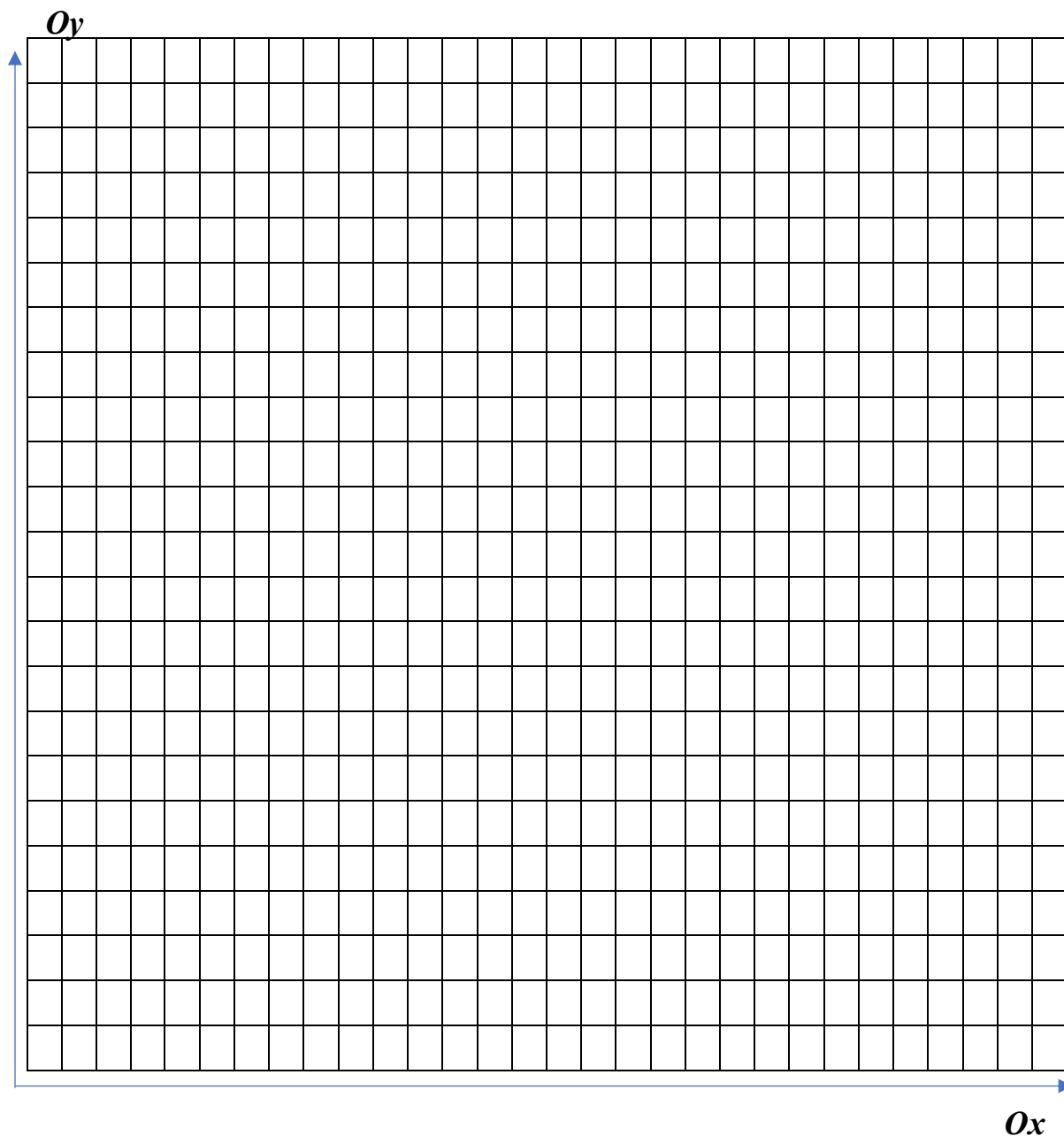
3. Русаков В. Ф. Курс загальної фізики. Електрика та магнетизм: навчальний посібник. Вінниця: Твори, 2020. 244 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 7  
**«ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ»**

*(Протоколом виконання є картина еквіпотенційних поверхонь, зроблена на міліметровому папері у масштабі ванни, в якій виконується дослід; сітка є ілюстративною)*

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_



Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 8

### Дослідження залежності опору металу і напівпровідника від температури та визначення ширини забороненої зони напівпровідника

**Мета роботи:** дослідити залежність опору напівпровідників від температури, визначити ширину забороненої зони та температурний коефіцієнт опору досліджуваного напівпровідника.

**Прилади й обладнання:** електропіч, всередині якої встановлено досліджувані зразки, датчик температури та вимірювальний пристрій.

#### Теоретична частина

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

$$R = U/I.$$

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

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

де  $\ell$  – довжина провідника,  $S$  – площа поперечного перерізу провідника,  $\rho$  – питомий електричний опір, який характеризує електричні властивості матеріалу провідника. Одиниця електричного опору в СІ – Ом.

З великою точністю можна вважати, що залежність опору *металів* від температури є лінійною:

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

де  $R$  – опір провідника за температури  $t$  °С,  $R_0$  – опір за 0°С,  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору. В роботі необхідно виміряти температурний

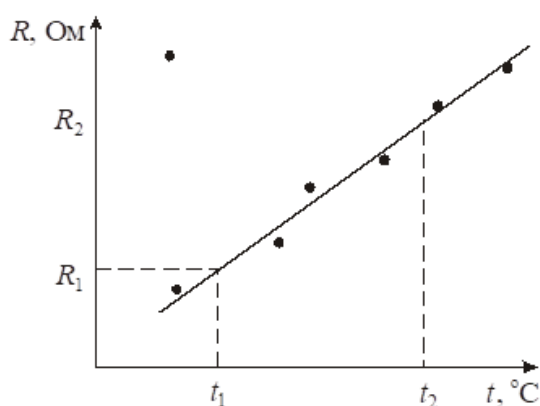


Рис. 1. Графік температурної залежності опору провідника

коефіцієнт  $\alpha$  за методом найменших квадратів.

**Напівпровідники (НПП)** – широкий клас речовин, які характеризуються значеннями питомого опору, які є проміжними між питомим опором металів

( $\rho \sim 10^{-8} \div 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ) та діелектриків ( $\rho > 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ). Характерною особливістю напівпровідників (суттєвою різницею з більшістю металів) є зменшення їх опору з ростом температури завдяки збільшенню кількості носіїв струму (розсіювання носіїв струму на атомах у напівпровідниках теж відбувається, але воно дає набагато менший внесок в опір напівпровідників, ніж у металах).

У широкому інтервалі температур опір напівпровідників змінюється за законом:

$$R = R_0 e^{\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (2)$$

де  $\Delta E$  – ширина забороненої зони НПП;

$k$  – стала Больцмана;

$T$  – термодинамічна температура.

Графік залежності опору від температури НПП представлений на рис. 2.  $R_0$  – величина, яка визначається властивостями конкретного матеріалу, тобто опір за  $0^\circ\text{C}$ , визначити її можна шляхом екстраполяції графіку залежності з рис. 3 до перетину з віссю  $Y$ , в точці перетину отримаємо значення опору  $R_0$ .

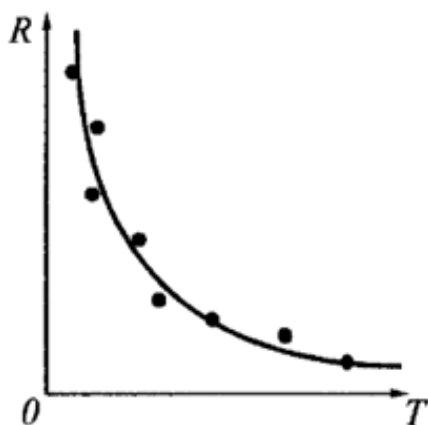


Рис. 2. Температурна залежність опору НПП

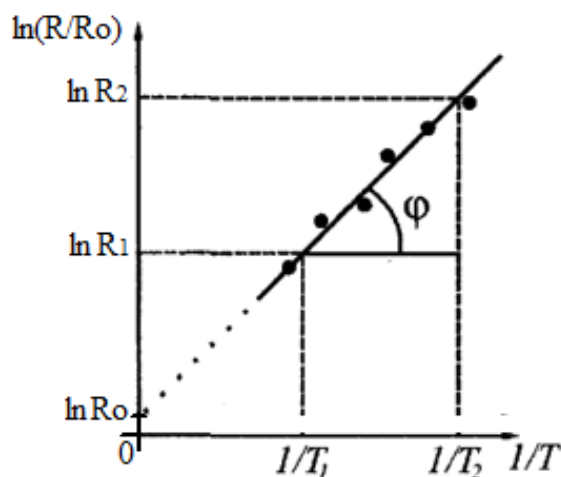


Рис. 3. Лінеаризація температурної залежності опору НПП

Температурну залежність  $R = f(T)$  зручно представити у координатах  $\ln \frac{R}{R_0}$  від  $1/T$ . Для цього прологарифмуємо вираз (2):

$$\ln R = \ln R_0 + \frac{\Delta E}{2kT} \Rightarrow \ln(R/R_0) = \frac{\Delta E}{2kT} = \frac{\beta}{T}, \quad (3)$$

$\beta$  – кутовий коефіцієнт, який визначається з графіку функції за методом найменших квадратів.

Графік залежності  $\ln(R/R_0) = f(1/T)$ , що наведений на рис. 3, має вигляд прямої, нахил  $\beta$  якої визначається шириною забороненої зони  $\Delta E$  напівпровідника.

Вимірюючи експериментально значення  $R$  за різних значень  $T$ , можна, використовуючи співвідношення (3), визначити ширину забороненої зони:

$$\Delta E = 2k\beta. \quad (4)$$

Зміну опору матеріалу зі зміною температури характеризують *температурним коефіцієнтом опору*. *Температурний коефіцієнт опору* – це величина, яка чисельно дорівнює відносній зміні опору провідника за зміни його температури на  $1^\circ\text{K}$ :

$$\alpha_T = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT}. \quad (5)$$

Для напівпровідників з (3) та (5) випливає:

$$\alpha_T = -\frac{\Delta E}{2kT^2} = -\frac{\beta}{T^2}. \quad (6)$$

З (6) випливає, що для напівпровідників  $\alpha_T < 0$ . До того ж  $\alpha_T$  зменшується за модулем зі збільшенням температури.

Залежність опору напівпровідників від температури покладена в основу роботи багатьох технічних пристроїв. Напівпровідниковий прилад, у якому використовується залежність електричного опору від температури, називається термістором (терморезистором). Головні параметри термісторів – діапазон робочих температур і температурний коефіцієнт опору. Діапазон робочих температур більшості термісторів лежить у межах  $200\text{--}400^\circ\text{K}$ .

### Опис експериментальної установки

Установка складається з електропечі, всередині якої встановлено зразки, що досліджуються, датчика температури та вимірювального пристрою (рис. 4).

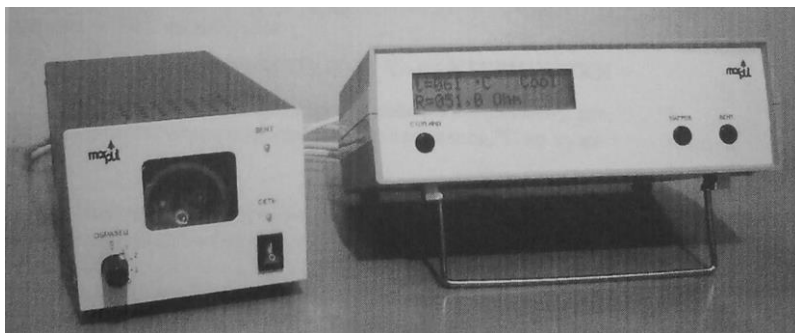


Рис. 4. Загальний вигляд установки

На передній панелі електропечі знаходиться віконце, яке дає змогу спостерігати зразки, встановлені в електропечі. На цій же панелі розміщені такі органи управління та індикації:

– вимикач «СЕТЬ» (призначено для увімкнення та вимикання живлення електропечі);

– перемикач «ОБРАЗЕЦ» (призначено для почергового підключення зразків до вимірювального входу вимірювача температури).

Положенням перемикача «ОБРАЗЕЦ» відповідає:

«1» – метал;

«2» – сплав з низьким температурним коефіцієнтом опору (*цей зразок введено в установку для демонстрації властивостей сплавів з малим температурним коефіцієнтом опору*);

«3» – напівпровідник;

«0» – вхід вимірювача температури закорочено.

На передній панелі вимірювального пристрою розміщені такі органи управління та індикації:

– кнопки «НАГРЕВ» та «ВЕНТ.» призначені для увімкнення та вимкнення (шляхом повторного натискання) електропечі та вентилятора відповідно;

– кнопка «СТОП ИНД.» призначена для увімкнення (та вимкнення) режиму зупинки індикації значень температури та опору (під час увімкнення цього режиму покази на вимірювальних індикаторах фіксуються в тому стані, в якому вони знаходились під час натиснення кнопки «СТОП ИНД.», водночас режим роботи установки не змінюється; під час повторного натиснення відбувається вимкнення цього режиму і на індикаторах знову відображуються поточні значення вимірювальних величин);

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

На задній панелі вимірювального пристрою розміщено вимикач «СЕТЬ».

### Порядок виконання роботи

1. Увімкніть (із дозволу викладача) вимірювальний пристрій та електропіч за допомогою вимикачів «СЕТЬ». Під час цього на індикаторі  $R$  вимірювального пристрою буде показано значення опору обраного зразка або нулі за умови замкнутого входу (допускається індикація до значення другого молодшого розряду), а на індикаторі  $t$  – *температура оточуючого зразок середовища*.

2. На електропечі повинен світитися індикатор «СЕТЬ» і не світитися індикатор «ВЕНТ.». Необхідно дати приборам прогрітися протягом 3–5 хв.

3. Встановіть перемикач «ОБРАЗЕЦ» у положення **1**, тобто підключіть металевий зразок до нагрівача.

4. Увімкніть нагрівання зразка, натиснувши кнопку «НАГРЕВ» (під час цього на індикаторі повинен відображатися режим роботи «WARM» (нагрів) та спостерігайте за індикатором температури процес нагрівання зразка).

5. Зніміть покази індикаторів температури  $t$  та опору  $R$  під час нагрівання зразка з кроком  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до максимальної температури  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  (це межа) і занесіть результати в таблицю 1 протоколу вимірювань. Після досягнення температури  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  автоматично ввімкнеться вентиляція та вимкнеться нагрів печі.

6. Перемикач «ОБРАЗЕЦ» у положення **3** та зніміть показники температури й опору напівпровідникового зразка під час його охолодження з кроком  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  від максимальної температури  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , заносючи дані в таблицю 2.

7. Після завершення роботи вимикачами «СЕТЬ» вимкніть установку.

### Обробка результатів вимірювань

1. Побудуйте графік залежності  $R_i = f(t_i)$  для металевого зразка (на осі температур значення температури має змінюватися від  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

2. Розрахуйте температурний коефіцієнт  $\alpha$  та опір  $R_0$  за *методом найменших квадратів*. Зробіть висновок.

3. Для напівпровідникового зразка для кожного значення температури  $t$  розрахуйте  $T = t + 273\text{ }^{\circ}\text{K}$ , потім  $1/T$  та знайдіть  $\ln(R/R_0)$ .

4. Побудуйте графік залежності  $\ln(R/R_0) = f(1/T)$  для досліджуваного напівпровідника. Знайдіть кутовий коефіцієнт  $\beta$  з графіка функції за *методом найменших квадратів*.

5. За формулою (4) розрахуйте ширину забороненої зони  $\Delta E$ . Значення ширини забороненої зони виразіть в електрон-вольтах ( $1\text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}\text{ Дж}$ ).

6. За формулою (6) розрахуйте температурний коефіцієнт опору  $\alpha_T$  для початкової і кінцевої температур. Зробіть висновок.

### Контрольні питання та завдання

#### Підготовка до роботи

(відповіді подати в письмовому вигляді)

1. У чому полягає мета роботи?
2. Які фізичні величини у цій роботі вимірюються безпосередньо?
3. Які графіки потрібно побудувати за результатами роботи?
4. Запишіть формулу залежності опору провідника від температури. Поясніть сенс позначень.
5. Запишіть формулу залежності опору напівпровідника від температури. Поясніть сенс позначень.

6. Запишіть формули, за якими розраховуються ширина забороненої зони і температурний коефіцієнт опору НПП. Поясніть сенс позначень.

### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Що називається електричним опором?
2. Які речовини належать до провідників? Від чого залежить опір провідника? Запишіть формулу залежності опору провідника від температури.
3. Які речовини належать до напівпровідників? Як залежить електричний опір напівпровідників від температури?
4. Порівняйте залежність опору від температури напівпровідників та металів поясніть причину різної залежності їх опору від температури.

### **Рекомендовані джерела**

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пищюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко; за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.
2. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета mathcad. Київ: НУХТ, 2011. 114 с.
3. Русаков В. Ф. Курс загальної фізики. Електрика та магнетизм: навчальний посібник. Вінниця: Твори, 2020. 244 с.
4. Русаков В. Ф., Русакова Н. М. Молекулярна фізика і термодинаміка. Частина II. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 116 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 8  
«ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ОПОРУ МЕТАЛУ  
І НАПІВПРОВІДНИКА ВІД ТЕМПЕРАТУРИ  
ТА ВИЗНАЧЕННЯ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ НПП»

Виконав / виконала \_\_\_\_\_ Група \_\_\_\_\_

Таблиця 1 – Металевий зразок (1)

|                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $t, ^\circ\text{C}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $R, \text{Ом}$      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $T, ^\circ\text{K}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

|                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $t, ^\circ\text{C}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $R, \text{Ом}$      |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $T, ^\circ\text{K}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Таблиця 2 – Напівпровідниковий зразок (3)

|                            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $t, ^\circ\text{C}$        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $R, \text{Ом}$             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $T, ^\circ\text{K}$        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $1/T, ^\circ\text{K}^{-1}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $\text{Ln}(R/R_0)$         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

|                            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $t, ^\circ\text{C}$        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $R, \text{Ом}$             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $T, ^\circ\text{K}$        |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $1/T, ^\circ\text{K}^{-1}$ |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| $\text{Ln}(R/R_0)$         |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 9

### Визначення радіуса кривизни лінзи та довжини світлової хвилі за допомогою кілець Ньютона

**Мета роботи:** вивчити явище інтерференції світла в тонких плівках, визначити радіус кривизни лінзи, визначити довжину світлової хвилі.

**Прилади й обладнання:** скляна пластинка, плоска опукла лінза, біноклярний мікроскоп (один монокуляр якого застосовується для підсвічування, а інший наділений окулярною шкалою), масштабна лінійка з відомою ціною поділки, набір світлофільтрів відомої довжини хвилі.

#### Загальні положення

*Інтерференція* – це процес накладання когерентних хвиль, внаслідок чого відбувається перерозподіл енергії хвильового поля, тобто утворюються послідовні світлі (максимуми) та темні (мінімуми) ділянки інтерференційної картини.

*Когерентні хвилі* – це хвилі однакової частоти, які приходять у задану точку простору з постійною різницею фаз. Інтерференцію можна спостерігати під час падіння світлової хвилі на тонку прозору пластинку (або плівку). Під час відбивання світла від обох поверхонь пластинки виникають дві світлові хвилі, які

можуть інтерферувати. Прикладом інтерференції в тонких плівках є кільця Ньютона.

*Кільця Ньютона* спостерігаються тоді, коли опукла поверхня лінзи малої кривизни є дотичною до плоскої поверхні добре відполірованої пластинки. Отже, повітряний шар, який залишається між лінзою та пластинкою, поступово збільшується за товщиною від центру до країв (рис. 1).

Якщо на лінзу падає пучок монохроматичного світла, то світлові хвилі, які відбиваються від верхньої та нижньої межі цього повітряного шару, будуть інтерферувати між собою. Водночас бачимо таку картину: в центрі – темна «пляма», яка оточена рядом концентричних світлих та чорних кілець, які поступово зменшуються за шириною (рис. 2).

Розрахуємо радіуси кілець Ньютона у відбитому світлі. Інтерференція відбувається між хвилями, які відбиваються від верхньої та нижньої поверхні повітряного шару. Під час розрахунку оптичної різниці ходу треба враховувати, що під час відбивання від більш оптично густого середовища (тобто на межі повітря–скло), фаза хвилі

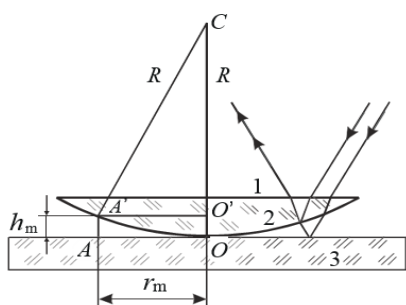


Рис. 1. Схема досліду

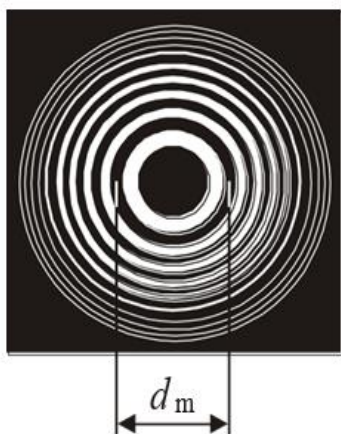


Рис. 2. Картина кілець

змінюється на протилежну. Ця зміна призводить до появи додаткової різниці ходу  $\lambda/2$ .

Оптична різниця ходу променів, які відбиваються від двох поверхонь, у разі нормального падіння світла на тонку плівку буде дорівнювати:

$$\Delta = 2h_m n + \frac{\lambda}{2}, \quad (1)$$

де  $h_m$  – товщина плівки (товщина повітряного шару) в місці, де спостерігається кільце з номером  $m$ ;

$n$  – показник заломлення плівки ( $n = 1$ , оскільки шар є повітряним).

Із трикутника  $A'O'C$  (див. рис. 1) знайдемо величину  $h_m$ , застосовуючи теорему Піфагора (виконайте це самостійно):

$$h_m = \frac{r_m^2}{2R}, \quad (2)$$

де  $r_m$  – радіус кільця, яке має номер  $m$ ;  $R$  – радіус кривизни лінзи.

Темне кільце (мінімум інтерференції) спостерігається, якщо виконується умова:

$$\Delta = (2m + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (3)$$

Із формул (1), (2), (3) отримаємо:

$$r_m = \sqrt{mR\lambda}. \quad (4)$$

Із формули (4) можна визначити  $R$  (або  $\lambda$ ), але оскільки внаслідок пружної деформації скла неможливо досягнути ідеального дотику сферичної лінзи та плоскої пластинки в одній точці, то більш коректний результат отримаємо, якщо вираховувати  $R$  (або  $\lambda$ ) за різницею радіусів двох кілець  $r_m$  та  $r_n$ . Кінцева формула матиме вигляд:

$$R = \frac{r_m^2 - r_n^2}{(m-n)\lambda}. \quad (5)$$

Для розрахунків цей вираз зручніше записати так:

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

де  $d_m$  та  $d_n$  – діаметри кілець,  $m$  та  $n$  – їх відповідні номери.

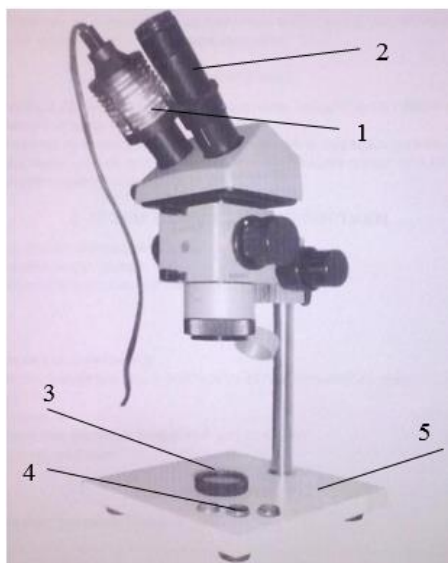


Рис. 3. Лабораторна установка

## Опис установки

Для спостереження кілець Ньютона застосовується установка, яка наведена на рис. 3. Установка складається з мікроскопа, у якого знятий один з окулярів і встановлена лампа освітлення для отримання кілець Ньютона. Окулярний мікромір забезпечений шкалою, яку видно одночасно з кільцями Ньютона. Ціна поділки шкали мікромітра становить 0.1 мм. Щоб визначити наближені розміри об'єкта (лінійні розміри і площу), потрібно скористатися Перевідною таблицею для відповідного збільшення, за якого проводяться вимірювання. Між окулярним мікрометром і об'єктивом поміщений opak-ілюмінатор, тому що вимірювання проводяться у відбитому світлі. Opak-ілюмінатор є

невеликою трубкою з боковим вікном, через яке проходить світло. Всередині трубки, перед вікном, знаходиться напівпропускна скляна пластинка, яка за допомогою спеціальних гвинтів встановлюється під кутом  $45^\circ$  до осі мікроскопа. Opak-ілюмінатор освітлюється монохроматичним світлом. Для цього необхідно джерело світла з лінійчатим спектром (у нашому випадку – ртутна лампа), конденсорна лінза. Промені, що виходять з opak-ілюмінатора, утворюють паралельний пучок світла, який падає нормально на лінзу, а потім на пласкопаралельну пластинку. Клин, на якому відбувається інтерференція променів, утворений повітряним прошарком між лінзою і пластинкою.

Під час спостереження за допомогою мікроскопу в полі зору бачимо чергування темних та світлих кілець, які мають темний центр («пляму»). Разом із кільцями Ньютона одночасно видно окулярну шкалу.

- 1 – освітлювач;
- 2 – насадка для мікроскопа;
- 3 – лінза, яка змонтована з пластинкою;
- 4 – світлофільтри;
- 5 – предметний столик.

## Порядок виконання роботи

### *Вправа 1. Визначення радіуса кривизни лінзи*

1. Увімкніть освітлювач у мережу. Встановіть червоний світлофільтр ( $\lambda = 630$  нм). Помістіть на столик 5 мікроскопа лінзу 3.

2. Досягніть гарної видимості кілець Ньютона. В центрі має спостерігатися темна пляма. Окулярна шкала водночас має бути розташованою за діаметром кілець.

3. Виміряйте діаметр першого темного кільця. Для цього потрібно отримати відліки  $N_1$  та  $N_2$  для діаметрально протилежних точок кільця (див. рис. 2) в поділках окулярної шкали. Діаметр кільця дорівнює різниці відліків, яка множиться на ціну поділки  $a$  окулярної шкали (див. Перевідну таблицю):

$$d = |N_1 - N_2| \times a.$$

4. Виміряйте діаметри п'яти темних кілець згідно з п. 3.

5. Розрахуйте радіус кривизни лінзи за формулою (6) п'ять разів. Знайдіть середнє значення радіуса. Далі розрахуйте відповідну похибку.

### **Вправа 2. Визначення довжини світлової хвилі**

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

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

3. Розрахуйте п'ять разів довжину світлової хвилі, застосовуючи знайдене значення радіуса кривизни лінзи та формулу (6). Знайдіть середнє значення довжини хвилі.

4. Розрахуйте похибку як для прямих вимірювань.

5. Знайдіть відносну похибку вимірювань. Результат подайте у вигляді:

$$\lambda = \lambda_{\text{сер}} \pm \Delta\lambda.$$

### **Перевідна таблиця**

| Округлені значення збільшень, які нанесені на рукоятку барабана, крат | Одна поділка шкали 0.1 мм відповідає величині на об'єкті, мм |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 0.6                                                                   | 0.17                                                         |
| 1                                                                     | 0.1                                                          |
| 2                                                                     | 0.05                                                         |
| 4                                                                     | 0.025                                                        |
| 7                                                                     | 0.014                                                        |

### **Таблиця довжин хвиль оптичного діапазону світла**

| Колір    | Довжина хвилі, нм |
|----------|-------------------|
| Червоний | 630±10            |
| Жовтий   | 578±10            |
| Зелений  | 546±10            |
| Синій    | 435±10            |

## **Контрольні питання та завдання**

### ***Підготовка до роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Сформулюйте мету роботи.
2. Яка величини в роботі вимірюються безпосередньо?
3. Запишіть формулу, за якою розраховується радіус кривизни лінзи. Поясніть позначення.
4. Запишіть формулу, за якою розраховується довжина світлової хвилі. Поясніть позначення.

### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Яке явище вивчалось в цій роботі? Дайте його означення.
2. Які хвилі називаються когерентними?
3. Намалюйте схематично промені, які інтерферують під час падіння монохроматичного світла на опуклу поверхню лінзи малої кривизни, що є дотичною до плоскої поверхні добре відполірованої пластинки. Запишіть формулу оптичної різниці ходу цих променів.
4. Сформулюйте умови виникнення інтерференційних максимумів і мінімумів.
5. Порівняйте отримане експериментальне значення довжини хвилі з табличним значенням та зробіть висновок.

### **Рекомендовані джерела**

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пищюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко; за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.

2. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета mathcad. Київ: НУХТ, 2011.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 9  
**«ВИЗНАЧЕННЯ РАДІУСА КРИВИЗНИ ЛІНЗИ ТА ДОВЖИНИ  
СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ КІЛЕЦЬ НЬЮТОНА»**

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_

**Вправа 1**

Довжина хвилі червоного світлофільтра  $\lambda =$  \_\_\_\_\_ нм.

| № з/п                       | Номер<br>кільця | $N_1$ | $N_2$ | $d$ , м | $R$ , м |
|-----------------------------|-----------------|-------|-------|---------|---------|
| 1                           |                 |       |       |         |         |
| 2                           |                 |       |       |         |         |
| 3                           |                 |       |       |         |         |
| 4                           |                 |       |       |         |         |
| 5                           |                 |       |       |         |         |
| середнє $\langle R \rangle$ |                 |       |       |         |         |

**Вправа 2**

Колір світлофільтра \_\_\_\_\_

| № з/п                             | Номер<br>кільця | $N_1$ | $N_2$ | $d$ , м | $\lambda$ , нм |
|-----------------------------------|-----------------|-------|-------|---------|----------------|
| 1                                 |                 |       |       |         |                |
| 2                                 |                 |       |       |         |                |
| 3                                 |                 |       |       |         |                |
| 4                                 |                 |       |       |         |                |
| 5                                 |                 |       |       |         |                |
| Середнє $\langle \lambda \rangle$ |                 |       |       |         |                |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

**Визначення довжини хвилі лазерного випромінювання за допомогою дифракційної ґратки на оптичній лаві**

**Мета роботи:** ознайомитися з явищем дифракції на дифракційній ґратці, визначити довжину хвилі лазерного випромінювання, визначити період дифракційної ґратки.

**Прилади й обладнання:** оптична лава, гелій-неоновий лазер, екран, дифракційні ґратки різних періодів, тримач екрану, тримач для дифракційної ґратки.

**Загальні положення**

*Дифракція* – огинання світлом перешкод, розміри яких є співрозмірними із довжиною хвилі. Явище дифракції можна спостерігати за допомогою дифракційної ґратки.

*Дифракційна ґратка* являє систему паралельних щілин однакової ширини, які лежать в одній площині та розділені однаковими за шириною непрозорими проміжками.

Реальні ґратки являють собою періодичні структури, які вигравіюються спеціальною ділильною машиною на поверхні скляної або металевій пластинки. У хороших ґраток паралельні штрихи мають довжину приблизно 10 см, а на кожен міліметр припадає до 2 000 штрихів. Водночас загальна довжина ґратки досягає 10–15 см. Виготовлення таких ґраток вимагає застосування високих технологій.

Основним параметром ґратки є відстань між серединами сусідніх щілин, яку називають *періодом  $d$  дифракційної ґратки (або сталою ґратки)*:

$$d = a + b, \quad (1)$$

де  $b$  – ширина щілини,  $a$  – розмір перешкоди.

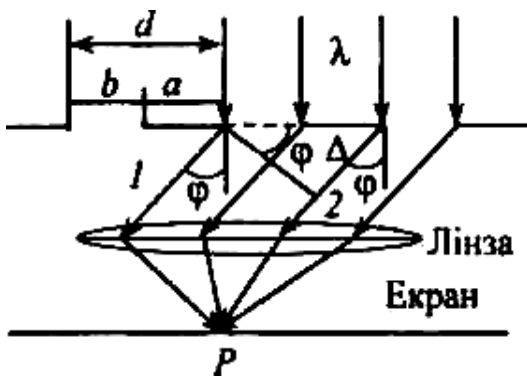


Рис. 1. Дифракція Фраунгофера на дифракційній ґратці

На ґратку спрямовується *паралельний пучок* світла, що досліджується. Спостереження проводиться у фокальній площині лінзи, яка встановлена за ґраткою.

Нехай світлова хвиля падає на ґратку нормально (тобто перпендикулярно до її поверхні). З кожної щілини виходять промені в усіх напрямках. У кожній точці  $P$  на екрані у фокальній площині лінзи зберуться промені, які до лінзи були паралельні між собою і поширювалися під певним кутом  $\varphi$  до напрямку падаючої

хвилі (рис. 1).

Кут  $\varphi$  називається *кутом дифракції*. Колювання в точці  $P$  є результатом інтерференції вторинних хвиль, які приходять у цю точку від різних щілин. Для того,

щоб у точці  $P$  спостерігався інтерференційний максимум, оптична різниця ходу (різниця оптичних шляхів)  $\Delta$  між променями 1 та 2, які випущені сусідніми щілинами, має дорівнювати цілому числу довжин хвиль:

$$\Delta = m\lambda, \quad (2)$$

де  $\Delta$  – оптична різниця ходу променів,  $\lambda$  – довжини хвилі,  $m = 1, 2, 3, \dots$  – ціле число (номер максимуму).

З прямокутного трикутника можна знайти різницю ходу променів від відповідних точок сусідніх щілин:

$$\Delta = d \sin \varphi. \quad (3)$$

Промені, які дифрагують від інших відповідних точок сусідніх щілин, матимуть таку ж різницю ходу в тому ж напрямку. Інші пари щілин можна розглянути аналогічним шляхом.

Прирівнюючи вирази (2) та (3), отримаємо:

$$d \sin \varphi = m\lambda. \quad (4)$$

Умова (4) визначає положення *головних максимумів* та є основною формулою дифракційної ґратки. Число  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$  – порядок (номер) дифракційного максимуму.

Дифракційну картину отримують на екрані, який розміщують у фокальній площині збиральної лінзи (рис. 2). Дифракційна картина матиме вигляд вузьких світлих смуг, які розділені темними проміжками. Центральний максимум ( $m = 0$ ) має найбільшу інтенсивність. Усі інші максимуми розміщуються симетрично відносно центрального максимуму (праворуч і ліворуч). Під час віддалення від центру їх інтенсивність зменшується. Знаючи період ґратки  $d$ , кут дифракції  $\varphi$  та порядковий номер  $m$  максимуму, можна з рівняння (4) знайти довжину хвилі:

$$\lambda = \frac{d \sin \varphi}{m}. \quad (5)$$

### Методика експерименту та опис експериментальної установки

Лазерне випромінювання є монохроматичним. На екрані, який встановлений за дифракційною ґраткою, можна спостерігати декілька дифракційних максимумів.

Найбільш яскравий центральний максимум відповідає нульовому порядку ( $m = 0$ ). Його утворюють промені, кут дифракції  $\varphi$  для яких дорівнює нулю. Інші максимуми розміщені праворуч на відстанях  $l'_1, l'_2, l'_3$  та ліворуч на відстанях  $l''_1, l''_2, l''_3$  від центрального максимуму (рис. 3). Кут дифракції можна визначити, вимірюючи відстані  $L$  та  $l$ . Оскільки кут  $\varphi$  малий, то:

$$\sin \varphi \approx \tan \varphi \approx \frac{l}{L}. \quad (6)$$

Виконуючи заміну в (5), отримаємо формулу для розрахунку довжини хвилі:

$$\lambda = \frac{ld}{mL}. \quad (7)$$

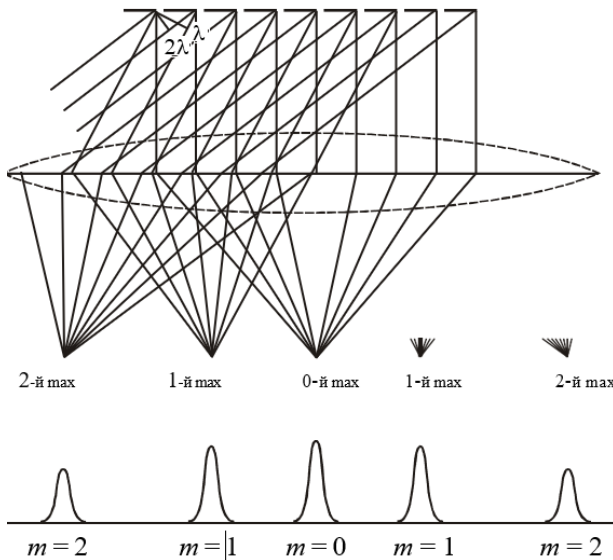


Рис. 2. Положення дифракційних максимумів

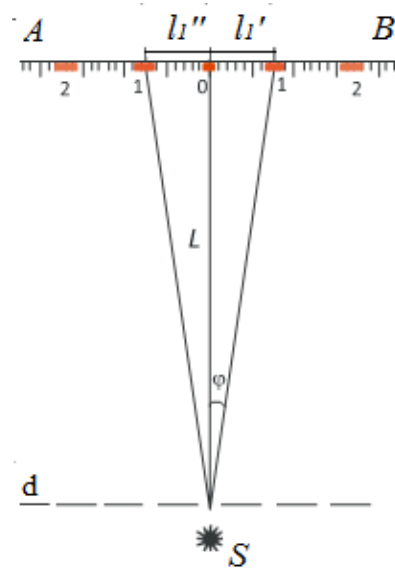


Рис. 3. Визначення кута дифракції

### Порядок виконання роботи

#### Вправа 1. Визначення довжини хвилі лазерного випромінювання

1. Увімкніть лазер перемикачем «СЕТЬ» із дозволу викладача.
2. Запишіть значення постійної ґратки  $d$  (на ґратці вказана кількість штрихів на один міліметр) у протокол вимірювань.
3. Установіть дифракційну ґратку у тримач, який знаходиться між лазером та екраном. Ґратка має бути розташована перпендикулярно до лазерного променя.
4. Отримайте на екрані чітку дифракційну картину. Відстань між екраном та ґраткою має бути такою, щоб на екрані помістилось не менше трьох максимумів з кожної сторони від центру картини.
5. Виміряйте відстань  $L$  між екраном та ґраткою.
6. Виміряйте відстані  $l'$  і  $l''$  для кожного максимуму.
7. Змініть відстань  $L$ , пересуваючи тримач із ґраткою. Повторіть вимірювання згідно з п. 5, 6.
8. Визначте середнє значення  $l$  для кожного максимуму за формулою:

$$l = \frac{l' + l''}{2}.$$

9. Розрахуйте довжину хвилі  $\lambda$  лазерного випромінювання для кожного максимуму за формулою (7).

10. Знайдіть середнє значення довжини хвилі  $\lambda_{\text{сер}}$ .

11. Розрахуйте абсолютну похибку у такий самий спосіб, як і для прямих вимірювань.

12. Знайдіть відносну похибку вимірювань. Результат запишіть у вигляді:

$$\lambda = \lambda_{\text{сер}} \pm \Delta\lambda.$$

### ***Вправа 2. Визначення невідомого періоду дифракційної ґратки***

1. Встановіть дифракційну ґратку з невідомим періодом у тримач.

2. Виконайте вимірювання згідно з п. 4–8 із цієї ґраткою.

3. Розрахуйте невідомий період  $d$  дифракційної ґратки для кожного максимуму, застосовуючи формулу (7). Довжину хвилі  $\lambda$  лазерного випромінювання взяти з **Вправи 1**.

4. Знайдіть середнє значення періоду дифракційної ґратки  $d_{\text{сер}}$ . Розрахуйте абсолютну похибку як для прямих вимірювань.

5. Знайдіть відносну похибку вимірювань. Результат запишіть у вигляді:

$$d = d_{\text{сер}} \pm \Delta d.$$

### **Контрольні питання та завдання**

#### ***Підготовка до роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Сформулюйте мету роботи. Про який саме тип дифракції йдеться в роботі?
2. Які фізичні величини в цій роботі вимірюються безпосередньо?
3. Запишіть формулу, за якою розраховується довжина хвилі. Поясніть усі позначення.

#### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Що таке дифракція світла? Яка її фізична природа? Який саме тип дифракції вивчається у цій роботі?
2. Намалюйте хід променів через дифракційну ґратку. Вкажіть на рисунку період ґратки, кут дифракції, оптичну різницю ходу променів. Запишіть умову, за якої спостерігатимуться головні максимуми.
3. Який вигляд матиме дифракційна картина, якщо ґратку освітлювати білим світлом?

4. Порівняйте отримане експериментальне значення довжини хвилі з табличним значенням, зробіть висновок.

### **Рекомендовані джерела**

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пицюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко; за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.

2. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета mathcad. Київ: НУХТ, 2011.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 10  
**«ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ ХВИЛІ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ  
ЗА ДОПОМОГОЮ ДИФРАКЦІЙНОЇ ГРАТКИ НА ОПТИЧНІЙ ЛАВІ»**

Виконав / виконала \_\_\_\_\_ Група \_\_\_\_\_

**Вправа 1**

Період дифракційної ґратки  $d =$  \_\_\_\_\_ м.

| № досліду         | Номер $m$<br>максимуму | $L$ , м | $l'$ , м | $l''$ , м | $l$ , м | $\lambda$ , нм |
|-------------------|------------------------|---------|----------|-----------|---------|----------------|
| 1                 |                        |         |          |           |         |                |
| 2                 |                        |         |          |           |         |                |
| 3                 |                        |         |          |           |         |                |
| 4                 |                        |         |          |           |         |                |
| 5                 |                        |         |          |           |         |                |
| 6                 |                        |         |          |           |         |                |
| Середнє $\lambda$ |                        |         |          |           |         |                |

**Вправа 2**

| № досліду   | Номер $m$<br>максимуму | $L$ , м | $l'$ , м | $l''$ , м | $l$ , м | $d$ , м |
|-------------|------------------------|---------|----------|-----------|---------|---------|
| 1           |                        |         |          |           |         |         |
| 2           |                        |         |          |           |         |         |
| 3           |                        |         |          |           |         |         |
| 4           |                        |         |          |           |         |         |
| 5           |                        |         |          |           |         |         |
| 6           |                        |         |          |           |         |         |
| Середнє $d$ |                        |         |          |           |         |         |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 11

### Вивчення загасаючих електричних коливань

**Мета роботи:** дослідження загасаючих електричних коливань, вимірювання характеристик коливального контуру із згасаючими коливаннями: періоду коливань  $T$ , логарифмічного декременту загасання  $\lambda$ , критичного опору контуру  $R_{кр}$ .

**Прилади й обладнання:** генератор сигналів спеціальної форми; міні-блоки «Конденсатор», «Реостат», котушка індуктивності, цифровий осцилограф.

#### Загальні положення

Коливальний контур – це електрична ланка (коло) (рис. 1), що складається з індуктивності  $L$ , ємності  $C$  і опору  $R$ .

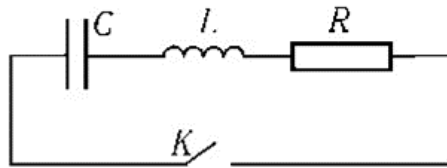


Рис. 1. Електричний коливальний контур:  $C$  – конденсатор,  $L$  – котушка індуктивності,  $R$  – активний опір,  $K$  – ключ

Якщо конденсатор зарядити зарядом  $q$ , то між пластинами конденсатора виникає різниця потенціалів  $U = q/C$  і електричне поле з енергією:

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

Під час замикання ключа  $K$  контур стає замкненим електричним колом і в ньому під дією електричного поля виникає змінний електричний струм:

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

і конденсатор починає розряджатися. Цей змінний струм створює магнітне поле з енергією  $W_B = L \frac{I^2(t)}{2}$ , вектор індукції якого перетинає площину котушки індуктивності, утворюючи потік  $\Phi(t) = \vec{B}(t) \cdot \vec{S}$ . За законом Біо–Савара–Лапласа індукція  $B$  пропорційна струму, і тому потік магнітного поля буде теж пропорційний струму:  $\Phi(t) = LI$ . Тоді за законом Фарадея на кінцях котушки індуктивності виникає електрорушійна сила  $\mathcal{E}$ :

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

яка називається *електрорушійною силою самоіндукції (ЕРС)*. Ця ЕРС спрямована проти напруги на конденсаторі (на це вказує знак мінус). Коли ключ  $K$

замикається, то струм у контурі спочатку зростає від 0 до  $I_{max}$  ( $\frac{dI}{dt} > 0$ ), а потім починає зменшуватися (оскільки конденсатор розряджається  $\frac{dI}{dt} < 0$ ), а ЕРС спочатку перешкоджає зростанню струму, але по закінченню процесу розряду конденсатора – знов підтримує струм у первинному напрямку.

Отже, енергія електричного поля конденсатора переходить в енергію магнітного поля котушки, яка потім знов переходить в енергію електричного поля (завдяки явищу самоіндукції). Цей процес буде повторюватися, тобто виникатимуть коливання напруги, заряду і сили струму. Під час протікання струму в контурі частина енергії електричного струму перетворюється в теплову енергію  $Q = RI^2$ , яка виділяється в опорах  $R$  котушки і з'єднувальних провідників. Тому коливання загасають, і їх амплітуда з часом зменшується. На рис. 2 показаний графік зміни напруги  $U(t) = q(t)/C$  на обкладинках конденсатора з плином часу.

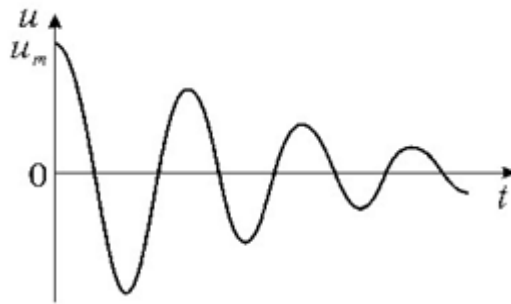


Рис. 2. Зміна напруги згасаючих коливань  $U(t)$  з часом

Закон зміни напруги на конденсаторі має вигляд:

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

де  $U(t)$  – миттєве значення напруги;

$U_m$  – максимальна амплітуда напруги;

$\omega$  – циклічна частота згасаючих коливань;

$t$  – час від початку процесу розрядження конденсатора;

$\alpha$  – початкова фаза;

$\delta$  – коефіцієнт загасання, який залежить від опору і індуктивності контуру (котушки):

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

Циклічна частота  $\omega$  згасаючих коливань визначається параметрами електричного кола – його індуктивністю  $L$ , ємністю  $C$  і активним опором  $R$ :

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

де  $\omega_0$  – власна частота контуру, яка дорівнює

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

Період загасаючих коливань:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}} \quad (5)$$

є більшим за період незагасаючих коливань  $T_0 = 2\pi/\omega_0$  і, як випливає з формул (2)–(5), відрізняється від нього тим сильніше, чим більшою є величина коефіцієнта згасання  $\delta$ . При  $\delta \ll \omega_0$  період загасаючих коливань  $T = 2\pi/\sqrt{LC}$  майже співпадає з періодом незгасаючих коливань  $T_0$ . Під час збільшення коефіцієнта загасання  $\delta$  період коливань  $T$  зростає, прямує до нескінченності при  $\delta = \omega_0$ . Це означає, що коливання в електричному колі змінюються *аперіодичним розрядом конденсатора* (рис. 3). Опір контуру, за якого виникає такий розряд, називають *критичним опором*. Величина цього опору, згідно з умовою  $\delta = \omega_0$  і з урахуванням формул (2), (4), визначається виразом:

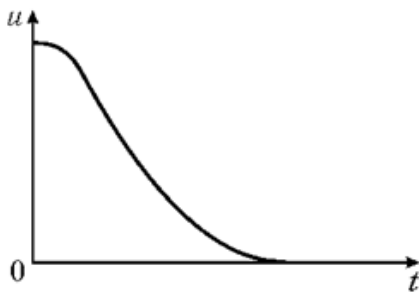


Рис. 3. Аперіодичний розряд конденсатора

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

Загасання електричних коливань характеризують величиною *логарифмічного декременту загасання*:

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

де  $U_t$  і  $U_{t+T}$  – амплітуди напруг в моменти часу, що відрізняються один від одного на один період. Відповідно до закону коливань (1), отримаємо:

$$\lambda = \delta T. \quad (8)$$

Для спостереження загасаючих коливань напругу  $U$  з обкладок конденсатора коливального контуру подають на вхід  $Y$  осцилографа. Конденсатор підключають до генератора сигналів спеціальної форми, налаштованого на видачу уніполярних імпульсів. Протягом першої половини періоду напруга  $U$  на конденсаторі дорівнює електрорушійній силі джерела струму. Через половину періоду коливань напруга буде  $U = 0$  В. Після цього в контурі починаються вільні загасаючі коливання. Осцилограма цих коливань показана на рис. 4.

У цій роботі треба знайти такі характеристики загасаючих коливань: логарифмічний декремент загасання  $\lambda$ , період загасаючих коливань  $T$ , коефіцієнт загасання  $\delta$  і критичний опір  $R_{кр}$ .

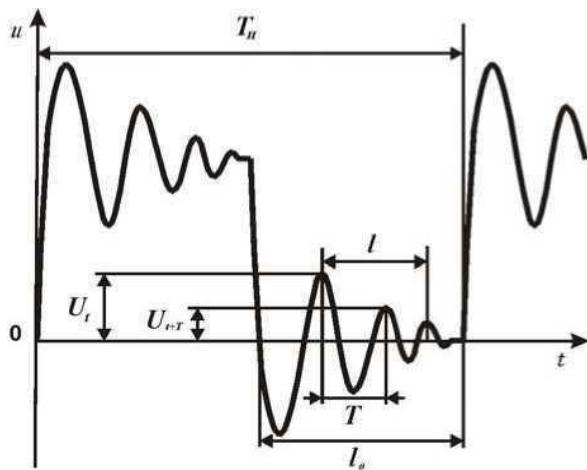


Рис. 4. Осцилограма загасаючих коливань

Амплітуди напруги на конденсаторі  $U_t$  і  $U_{t+T}$  (див. рис. 4), які необхідні для розрахунку логарифмічного декременту  $\lambda$  за формулою (7), можна виміряти в поділках шкали  $Y$  осцилографа. Для вимірювання періоду загасаючих коливань  $T$  проводять *попереднє калібрування* осі часу осцилографа за відомим періодом  $T_i$  уніполярних імпульсних коливань. Під час цього ціну поділки осі  $X$  визначають як відношення  $m = T_i/2l_0$ . Внаслідок цього вимірюваний період згасаючих коливань буде

дорівнювати:

$$T = \frac{ml}{n} = \frac{T_i l}{2nl_0}, \quad (9)$$

де  $l_0$  – число поділок, яке відповідає відрізку часу, що дорівнює половині періоду коливань  $T_i$  (рис. 4);

$n$  – ціле число повних коливань на відрізку  $l$  осі  $X$ .

Отже, для знаходження коефіцієнта загасання  $\delta$  необхідно виміряти дві послідовні (через період) амплітуди загасаючих коливань  $U_t$  і  $U_{t+T}$  та їх період  $T$  (через  $l$  і  $l_0$ ).

З допомогою формули (8) визначають експериментальне значення коефіцієнта загасання  $\delta$ . Критичний опір контуру  $R_{кр}$  знаходять дослідним шляхом, спостерігаючи зміну виду залежності  $U(t)$  під час збільшення активного опору контуру  $R$ . Ознакою виходу на режим аперіодичного розряду конденсатора є отримання кривої  $U(t)$ , яка не містить коливань (рис. 3).

### Опис установки

Схема електричного кола наведена на рис. 5. Коливальний контур складається з послідовно з'єднаних котушки (з відомою індуктивністю  $L$  і активним опором  $R_k$ ), реостата  $R_p$  і конденсатора відомої ємності  $C$  ( $C_1$  або  $C_2$ ). Напругу  $U_y$  з конденсатора коливального контуру подають на вхід  $Y$  осцилографа. Масштабна сітка, яка нанесена на екрані осцилографа, дає змогу вимірювати амплітуду і період згасаючих коливань. На осцилограмі  $U(t)$  спостерігають також перехід із режиму коливань до режиму аперіодичного розряду конденсатора. Для його досягнення збільшують опір контуру за допомогою реостата. Генератор сигналів спеціальної форми 1 призначений для отримання уніполярних імпульсів і надання електричної енергії коливальному контуру (рис. 6).

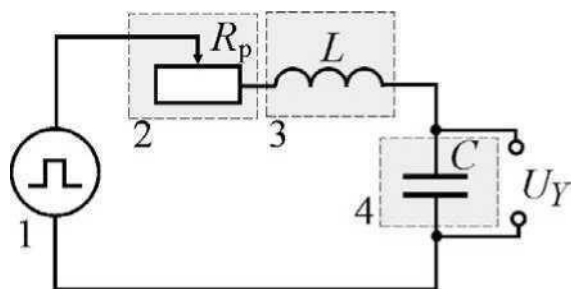


Рис. 5. Схема електричного кола

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

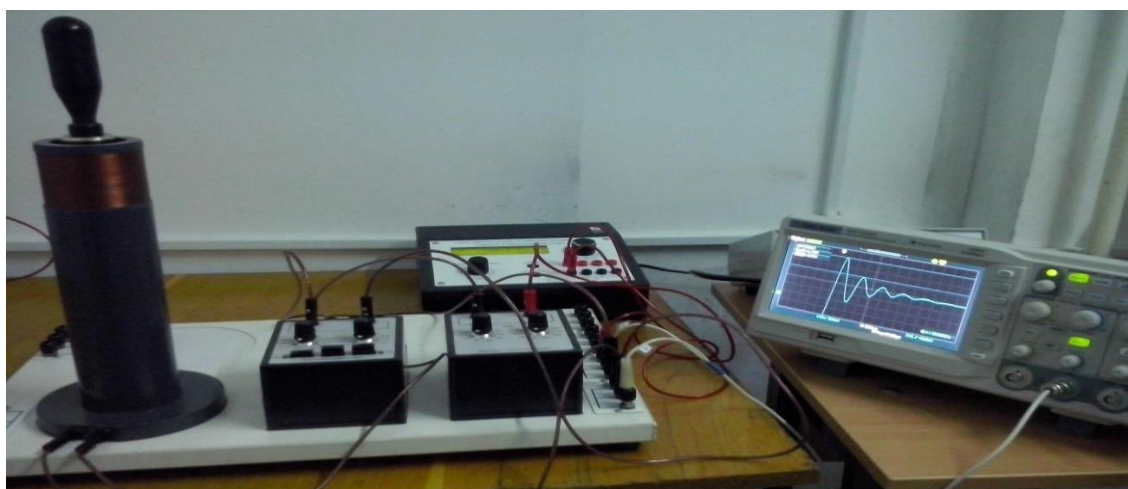


Рис. 6. Лабораторна установка для дослідження згасаючих електричних коливань

### Порядок виконання роботи

1. Зберіть електричну ланку, як на рис. 5. На місце конденсатора  $C$  встановіть конденсатор з відомою ємністю  $C_1 = 0.1$  мкФ. Для стійкого зображення синхронізуйте осцилограф із тим каналом, на який подаєте сигнал (наприклад, CH2-для  $U_Y$ ). Встановіть опір реостата  $R_p$  на рівні 0 кОм.
2. Увімкніть осцилограф (із дозволу викладача) і дочекайтеся його завантаження.
3. Увімкніть (із дозволу викладача) перемикачем «СЕТЬ» живлення блока генератора напруги. Кнопкою «РЕЖИМ» на панелі блока генератора спеціальної форми виберіть уніполярні імпульси («МЕАНДР»), ручкою установки частоти встановіть частоту сигналу  $f = 200$  Гц ( $T_i = 0.005$  с).
4. Отримайте на осцилографі осцилограму, як на рис. 4, встановлюючи амплітуду імпульсів ручкою регулювання амплітуди сигналу генератора. Стале зображення кривої забезпечується регулюванням осцилографа і синхронізацією, а необхідні розміри осцилограми можна задати за допомогою ручок «HORIZONTAL»

(OX) і «VERTICAL» (OY). Водночас, змінюючи підсилення по осі  $X$ , добийтеся, щоб відрізок  $l_0$  зайняв майже всю сітку екрана.

5. Запишіть у таблицю 1 наступні параметри контуру:  $L_k$  – індуктивність котушки;  $C$  – ємність конденсатора;  $R_k$  – активний опір котушки:  $L_k = 0.68 \text{ мГн} \pm 10\%$ ,  $R_k = 4.8 \pm 0.05 \text{ Ом}$ .

6. За координатною сіткою виміряйте довжину ділянок  $l$  і  $l_0$  і запишіть у таблицю 1 протоколу.

7. Проведіть вимірювання амплітуд  $U_t$  і  $U_{t+T}$ , для більш точного їх відліку переміщуйте ординату, що вимірюється, на центральну лінію екрана. Визначте число повних коливань  $n$  на ділянці  $l$ . Результати цих вимірювань запишіть у таблицю 1 протоколу.

8. Збільшуючи опір реостата  $R_p$ , спостерігайте зміну загасання коливань і перехід осцилограми від вигляду на рис. 2 до вигляду, що наведений на рис. 3. Мінімальний опір кола, за якого була отримана осцилограма вигляду рис. 3, буде дорівнювати  $R_{кр} = R_p + R_k$ . Запишіть значення  $R_{кр}$  у таблицю 1.

9. Замість конденсатора  $C_1$  встановіть конденсатор  $C_2 = 0.33 \text{ мкФ}$  і повторіть вимірювання згідно з п. 3–8.

10. Вимкніть кнопками «СЕТЬ» живлення блока генераторів напруги і блока мультиметрів.

### **Обробка результатів вимірювань**

1. За даними таблиці 1 для кожного значення ємності обчисліть розрахункові (розра.) і експериментальні (експ.) значення логарифмічного декременту згасання  $\lambda$ , коефіцієнта загасання  $\delta$ , періоду коливань  $T$  і критичного опору контуру  $R_{кр}$ . Використовуйте формули, номери яких вказані в таблиці 2, що призначена для запису результатів розрахунків.

2. У висновку за результатами роботи зробіть аналіз отриманих даних:

а) вкажіть характерні зміни осцилограми і параметрів коливань під час зміни ємності контуру;

б) опишіть зміни залежності  $U(t)$  зі збільшенням активного опору електричного кола;

в) порівняйте отримані експериментальні значення величин  $T$  і  $R_{кр}$  із значеннями, отриманими в розрахунках.

### **Контрольні питання та завдання**

#### ***Підготовка до роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Сформулюйте мету роботи. Про які саме електричні коливання йдеться в роботі?

2. Які фізичні величини в цій роботі вимірюються безпосередньо?
3. Запишіть формули, за якими розраховуються період коливань, логарифмічний декремент згасання, коефіцієнт згасання і критичний опір.

### **Захист роботи**

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. За яким законом змінюються під час розряджання конденсатора в коливальному контурі, що містить  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , такі величини: а) напруга на конденсаторі; б) заряд обкладок конденсатора; в) струм в електричному колі?
2. Як саме залежать від параметрів коливального контуру такі характеристики коливань: а) циклічна частота і період загасаючих коливань; б) коефіцієнт загасання коливань; в) критичний опір контуру?
3. Під час зміни яких параметрів контуру: а) зближуються значення періодів загасаючих і незгасаючих коливань; б) змінюється коефіцієнт загасання коливань; в) змінюється критичний опір контуру?
4. Що відбувається в коливальному контурі за умови опору, більшого за критичний, тобто за умови  $\delta > \omega_0$ ?
5. Які величини вимірюють за допомогою осцилограми коливань для визначення: а) періоду загасаючих коливань; б) логарифмічного декременту згасання коливань?
6. Які величини використовують для калібрування осі  $X$  осцилографа?
7. Як визначають експериментальне значення критичного опору контуру?
8. Якого вигляду набуває осцилограма  $U(t)$  під час досягнення опору  $R_{кр}$ ?
9. Який параметр коливального контуру змінюють у роботі, щоб отримати аперіодичне розрядження конденсатора?
10. З яких елементів електричного кола можна подати напругу на вхід  $Y$  осцилографа для спостереження загасаючих коливань?
11. За якими формулами визначають:
  - а) експериментальне значення періоду коливань  $T$ ;
  - б) експериментальне значення коефіцієнта загасання коливань  $\delta$ ;
  - в) розрахункові і теоретичні значення величин  $T$ ,  $\delta$  і  $R_{кр}$ ?
12. Поясніть фізику процесу виникнення загасаючих коливань.

### **Рекомендовані джерела**

1. Курс загальної фізики. Електрика та магнетизм: навчальний посібник / В. Ф. Русаков. Вінниця: Твори, 2020. 244 с.
2. Загальний курс фізики. У 3 ч. Ч. 2. Електрика і магнетизм: навчальний посібник / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, П. П. Луцик; за заг. ред. І. Кучерука. Київ: Техніка, 2001. 452 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 11  
«ВИВЧЕННЯ ЗГАСАЮЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛИВАНЬ»

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_

Таблиця 1

| $C$ , мкФ | $L_K$ ,<br>Гн | $R_K$ ,<br>Ом | $\ell_0$ ,<br>м | $\ell$ ,<br>м | $n$ | $U_t$ ,<br>В | $U_{t+T}$ ,<br>В | $R_{kp}$ ,<br>Ом |
|-----------|---------------|---------------|-----------------|---------------|-----|--------------|------------------|------------------|
| $C_1 =$   |               |               |                 |               |     |              |                  |                  |
| $C_2 =$   |               |               |                 |               |     |              |                  |                  |

Таблиця 2

| $C$ , мкФ        | $\lambda$    | $\delta$ , $c^{-1}$ |              | $T$ , с      |              | $R_{kp}$ , Ом |              |
|------------------|--------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
|                  | <i>експ.</i> | <i>розр.</i>        | <i>експ.</i> | <i>розр.</i> | <i>експ.</i> | <i>розр.</i>  | <i>експ.</i> |
| Номери<br>формул | (7)          | (2)                 | (8)          | (5)          | (9)          | (6)           | $R_p + R_k$  |
| $C_1 = 0.1$      |              |                     |              |              |              |               |              |
| $C_2 = 0.33$     |              |                     |              |              |              |               |              |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

**Вивчення явища електрорушійної сили самоіндукції**

**Мета роботи:** вивчення явища самоіндукції, спостереження та порівняння форм струму та ЕРС у котушці за умови різних форм вхідної напруги.

**Прилади й обладнання:** велика котушка з середньою точкою, осердя, магазин опорів, генератор звукової частоти, цифровий осцилограф.

**Загальні положення**

Струм  $I$ , що тече по деякому замкненому контуру, створює в просторі магнітне поле. Силкові лінії цього поля перетинають також і сам контур та створюють *магнітний потік* через цей контур. За законом Біо–Савара–Лапласа:

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

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

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

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

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

Розмірність потокозчеплення, так само, як і магнітного потоку – Вебер (Вб). Із виразу (1) випливає, що індуктивність чисельно дорівнює потокозчепленню, яке перетинає контур за умови сили струму в контурі в 1 А. Одиниця індуктивності в системі СІ має назву Генрі (Гн):  $1 \text{ Гн} = 1 \text{ Вб/А} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{с}$ .

Магнітну індукцію  $B$  довгої котушки (соленоїда) довжиною  $\ell$ , площею поперечного перерізу  $S$  та кількістю витків  $N$  можна визначити за законом Біо–Савара–Лапласа:

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

де  $\mu_0$  – магнітна стала,  $\mu$  – відносна магнітна проникність середовища всередині котушки (осердя). Тоді магнітний потік через соленоїд з площею поперечного перерізу  $S$  буде дорівнювати:

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

а потокозчеплення перепишеться у вигляді:

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

З урахуванням (1) отримаємо формулу для індуктивності довгого соленоїда:

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

Строго кажучи, формула (3) визначає індуктивність ділянки соленоїда із дуже великою довжиною  $\ell$ . Звісно, що реальні соленоїди мають скінченну довжину, тому індуктивність реального соленоїда є дещо меншою. На практиці це враховується за допомогою коефіцієнта  $k$ , значення якого є меншим за одиницю та який залежить від співвідношення між довжиною  $\ell$  соленоїда та його радіусом  $R$ :

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

Як зазначено вище, ЕРС індукції виникає в контурі незалежно від причин, які викликали зміну магнітного потоку, що перетинає контур. Під час зміни струму в контурі зміниться магнітний потік, який перетинає цей контур, і це призведе до виникнення в контурі ЕРС індукції. *Виникнення ЕРС індукції в провідному контурі під час зміни струму, що тече по ньому, називається явищем самоіндукції.* Величину ЕРС самоіндукції знайдемо, якщо у формулу закону електромагнітної індукції Фарадея:

$$\mathcal{E}_s = -\frac{d\Phi}{dt}$$

замість потоку  $\Phi$  підставимо вираз (1) для  $\Psi$ :

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt}. \quad (5)$$

Припускається, що форма та розміри контуру не змінюються, інакше формула стане складнішою. Знак мінус у (5) означає, що ЕРС самоіндукції спрямована так, щоб протидіяти зміні струму в контурі (правило Ленца для ЕРС самоіндукції, рис. 1).

Інакше кажучи, струм  $I_s$ , який створюється ЕРС самоіндукції, спрямований протилежно напрямку струму в контурі  $I$ , якщо струм  $I$  зростає  $\frac{dI}{dt} > 0$  (рис. 1а). Якщо ж струм  $I$  спадає, то струм  $I_s$  співпадає за напрямом зі струмом  $I$  (рис. 1б).

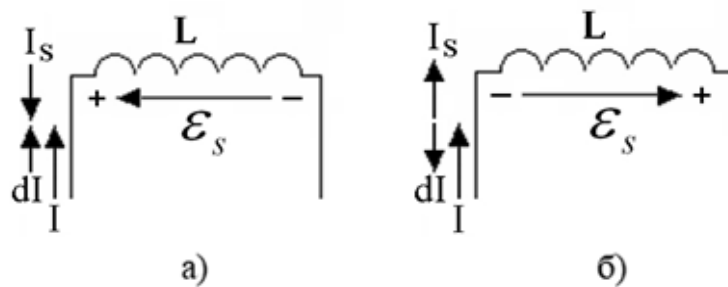


Рис. 1. Напрямки струмів та ЕРС у соленоїді за правилом Ленца

Загальний вигляд установки для вивчення явища самоіндукції наведений на рис. 2. Під час виконання роботи потрібно змалювати з екрана осцилографа осцилограми вихідних напруг для різних форм напруг генератора. Принципова схема установки показана на рис. 3а.



Рис. 2. Загальний вигляд лабораторної установки

### Порядок виконання роботи

1. Зберіть електричну схему, як це показано на рис. 3б.
2. Котушку  $L_1$  та магазин опорів установіть на піддон. У магазині встановіть опір, достатній для того, щоб отримати нормальну амплітуду сигналу (але не менший, ніж 10 Ом). На екрані цифрового осцилографа сигнали мають бути: на каналі **1** – 500 mV–1 V і на каналі **2** – 100–500 mV для отримання адекватної картини.
3. Подайте напругу з генератора звукових частот *синусоїдальної* форми частотою 200 Гц (натиснути кнопку «РЕЖИМ – СИНУСОИДА», потім «СТАРТ»). Під час цього спостерігайте на екрані осцилографа зсув фази сигналу ЕРС (канал **2**) щодо сигналу в котушці (канал **1**). Змалюйте отримані осцилограми. Натисніть кнопку «СТОП».

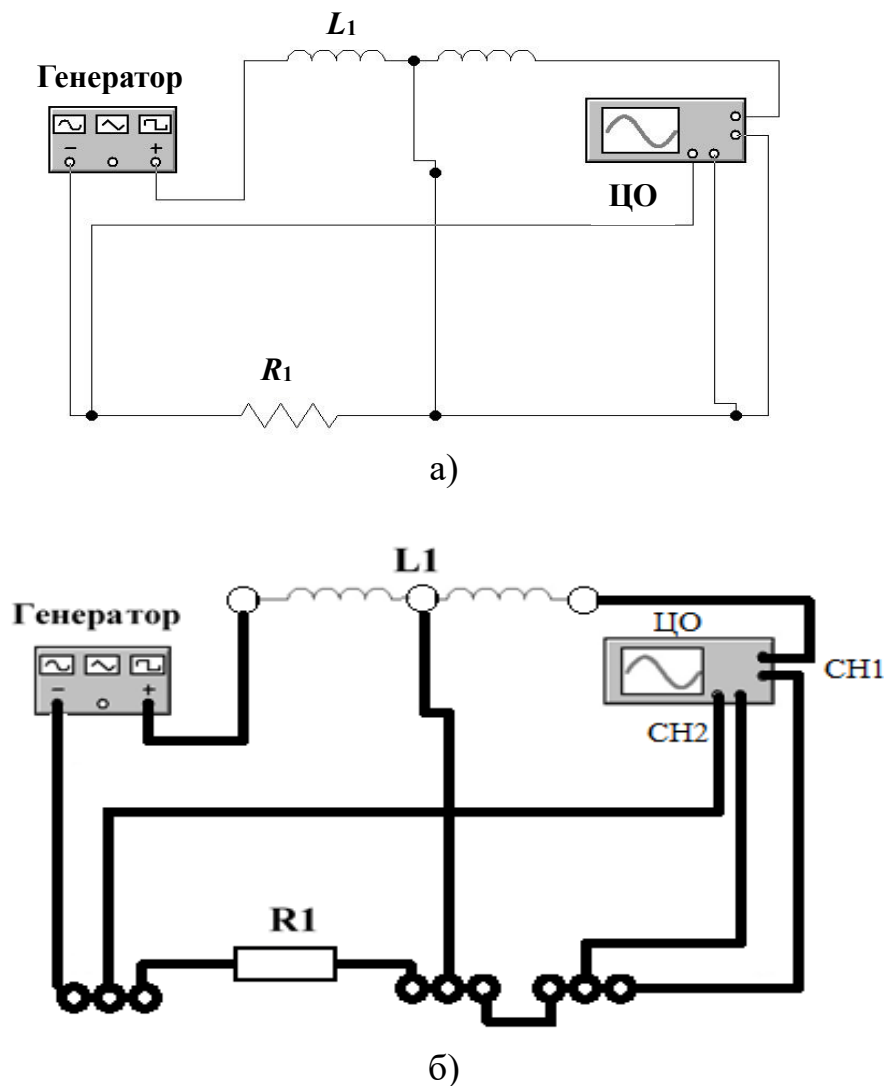


Рис. 3. Електрична схема установки:  
а) принципова схема установки; б) схема з'єднань

4. Подайте напругу з генератора звукових частот *прямокутної* форми частотою 200 Гц (натисніть кнопку «РЕЖИМ – МЕАНДР», потім «СТАРТ»). Під час цього спостерігайте на екрані форму струму в котушці (канал 1) та форму ЕРС у котушці (канал 2). Змалюйте отримані осцилограми. Натисніть «СТОП».

5. Подайте напругу з генератора звукових частот *трикутної* форми частотою 200 Гц. Під час цього спостерігайте форму струму в котушці (канал 1) та форму ЕРС у котушці (канал 2). Змалюйте осцилограми. Натисніть «СТОП».

6. Повторіть досліди згідно з п. 3–5 із введенням всередину котушки *осердя*. Змалюйте отримані картини.

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

## **Контрольні питання та завдання**

### ***Підготовка до роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Сформулюйте мету роботи. Яке фізичне явище вивчається в роботі?
2. Які фізичні величини в цій роботі вимірюються безпосередньо?
3. Запишіть формули ЕРС самоіндукції, магнітної індукції довгого соленоїда, потокозчеплення, індуктивності котушки і формулу закону електромагнітної індукції Фарадея.

### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Що таке потік магнітної індукції?
2. Сформулюйте закон електромагнітної індукції Фарадея та правило Ленца.
3. Що таке явище самоіндукції та взаємної індукції, чим вони відрізняються?
4. Що таке індуктивність та від чого залежить величина індуктивності котушки?
5. Чому під час замикання та розмикання електричного кола величина напруги на котушці є різною?
6. Чим визначається тривалість зростання та спадання ЕРС у колі з індуктивністю?

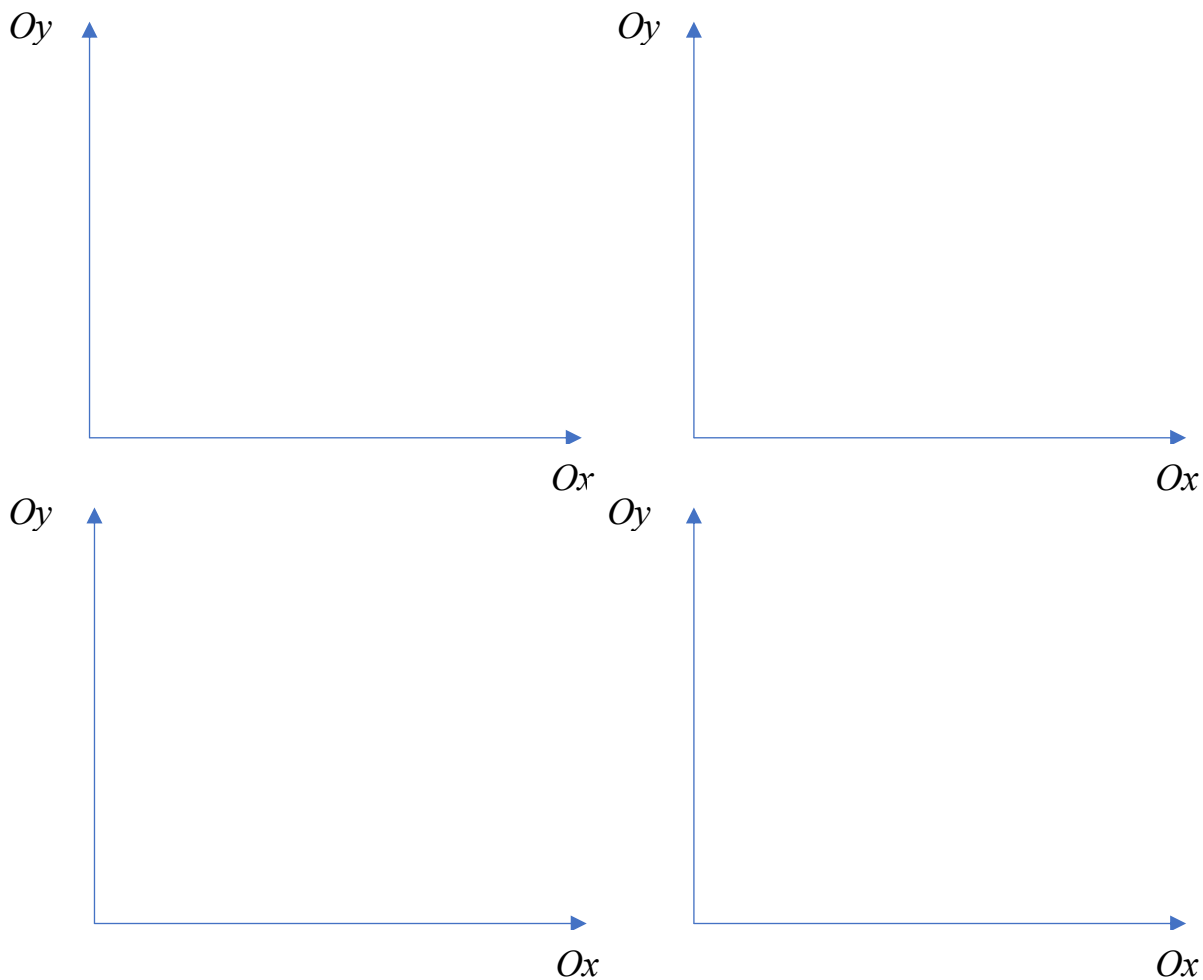
### **Рекомендовані джерела**

1. Курс загальної фізики. Електрика та магнетизм: навчальний посібник / В. Ф. Русаков. Вінниця: Твори, 2020. 244 с.
2. Загальний курс фізики. У 3-х ч. Ч. 2. Електрика і магнетизм: навчальний посібник / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, П. П. Луцик; за заг. ред. І. М. Кучерука. Київ: Техніка, 2001. 452 с.
3. Чебаненко А. П. Курс загальної фізики: підручник, Т. 3. Електрика і магнетизм. Одеса: Астропринт, 2011. 224 с.
4. Барановський В. М., Бережний П. В., Горбачук І. Т. та ін. Загальна фізика. Лабораторний практикум: навчальний посібник / за заг. ред. І. Т. Горбачука. Київ: Вища школа, 1992. 509 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 12  
**«ВИВЧЕННЯ ЯВИЩА ЕЛЕКТРОРУШІЙНОЇ СИЛИ САМОІНДУКЦІЇ»**

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_



Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 13

### Вивчення явища резонансу в електричних колах

**Мета роботи:** вивчення явищ резонансу струмів і резонансу напруг у послідовному і паралельному електричному коливальному контурі, експериментальне отримання резонансної кривої, вимірювання індуктивності та ємності електричного коливального контуру резонансним методом.

**Прилади й обладнання:** генератор сигналів спеціальної форми, котушка індуктивності, мініблоки конденсаторів та опорів, мультиметр.

#### Загальні положення

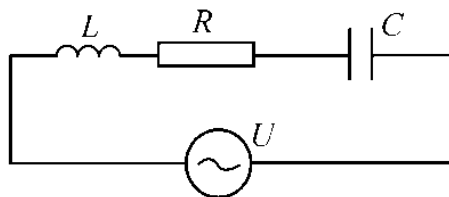


Рис. 1. Послідовне з'єднання  $L$ ,  $R$ ,  $C$  для вивчення явища резонансу напруг

Резонансом називають явище зростання амплітуди сталих вимушених коливань за умови певної частоти зовнішньої сили, яка є близькою до власної частоти системи. Електричні резонанси спостерігаються в коливальному контурі – електричному колі, яке складається з котушки індуктивності  $L$  з активним опором  $R$  та

конденсатора ємності  $C$ . Для підтримки незгасаючих коливань у контурі вводять зовнішнє джерело змінної напруги  $U = U_m \cos \omega t$ . Розглянемо два види резонансів в електричному колі: *резонанс напруг* та *резонанс струмів*.

Явище *резонансу напруг* відбувається в колі послідовно з'єднаних котушки індуктивності та ємності (рис. 1). Запишемо для цього контуру друге правило Кірхгофа:

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

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

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

або

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

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

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

Амплітуда вимушених коливань струму  $I_m$  у цьому рівнянні залежить від параметрів контуру та циклічної частоти зовнішньої напруги  $\omega$ :

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

де  $U_m$  – амплітуда зовнішньої напруги,  $Z$  – повний опір змінному струму (імпеданс кола),  $X$  – реактивний опір контуру:

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

З рівняння (2) випливає, що можна підібрати таку частоту, за якої  $\omega_0 L = 1/\omega_0 C$ . Ця частота  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  називається *резонансною (власною) частотою контуру*. Під час цього повний опір кола буде мінімальним:  $Z_{min} = R$ , а амплітуда струму в контурі – максимальною. Таке явище називають *резонансом напруг*: напруги на індуктивності та ємності є однаковими ( $U_L = U_C$ , бо опори однакові) та коливаються в *протифазі*, їх сума дорівнює нулю, а падіння напруги на резисторі  $U_R$  буде максимальним та дорівнюватиме зовнішній напрузі  $U_m$ .

Залежності амплітуд струму  $I_m = f(\omega)$  для різних значень активного опору  $R$  (графіки резонансних кривих) наведені на рис. 2, їх називають *резонансними кривими*. Згідно з умовою резонансу ( $|X_L| = |X_C|$ ) значення резонансної частоти співпадає із частотою власних коливань контуру  $\omega_0$ :

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

Ширина резонансної кривої залежить від *добротності* коливального контуру:

$$Q = \frac{\pi}{\lambda},$$

де  $\lambda$  – логарифмічний декремент загасання. *Добротність коливального контуру* – це відношення енергії, накопиченої в котушці індуктивності  $L$ , до енергії розсіяної на активному опорі  $R$ . Оскільки у разі послідовного з'єднання  $L$  і  $R$  крізь них протікає однаковий струм, то добротність контуру буде дорівнювати:

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{L}{R\sqrt{LC}} = \frac{\sqrt{L/C}}{R}.$$

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

*Резонанс струмів* спостерігається в контурі, який складається з паралельно увімкнених ємності та індуктивності (рис. 3). Якщо активний опір контуру  $R$  до-

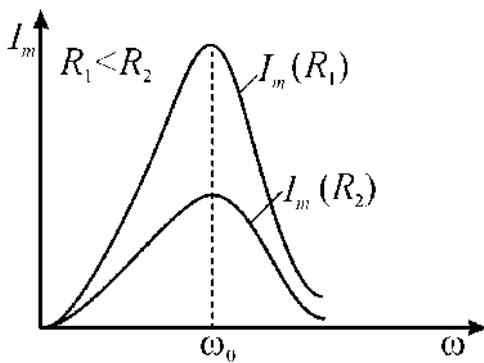


Рис. 2. Резонансні криві  
для резонансу напруг у контурі

струм, а в підвідних проводах струм  $I$  знижується до нуля. Це явище називають *резонансом струму*.

### Методика вимірювань

Змінюючи частоту  $\omega$  зовнішнього джерела напруги, яка прикладається до послідовного коливального контуру, та вимірюючи під час цього струм або пропорційне струму падіння напруги на активному опорі  $U_R$ , можна побудувати резонансну криву  $U_R = f(\omega)$ .

У випадку послідовного з'єднання ємності та індуктивності на резонансній частоті згідно з (2) спостерігається максимум напруги на опорі  $R$ , а напруга на ділянці  $LC$  буде мінімальною. Отже, за розташуванням максимуму резонансної кривої  $U_R = f(\omega)$  можна визначити значення резонансної частоти. Формула (3) дає змогу за знайденою частотою  $\omega_{\text{рез}}$  визначити індуктивність коливального контуру  $L_x$ , якщо відомо значення ємності  $C_0$ :

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

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

$$C_x = C_0 \left( \frac{\omega_{0,\text{рез}}}{\omega_{x,\text{рез}}} \right)^2. \quad (5)$$

За паралельного з'єднання конденсатора та котушки індуктивності резонанс у колі можна виявити за мінімальною напругою на опорі  $R$  в електричному колі або за максимальною напругою на ділянці  $LC$ . Резонансна частота також співпадає з власною частотою коливального контуру  $\omega_0$ .

рівнює нулю, то на резонансній частоті  $\omega_{\text{рез}} = 1/\sqrt{LC}$  відповідно до умови  $X_L = X_C$  та закону Ома маємо:

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

тобто струми в паралельних частинах кола є однаковими ( $I_L = I_C$ ), але їх коливання відбуваються в протифазі. Водночас у контурі циркулює значний

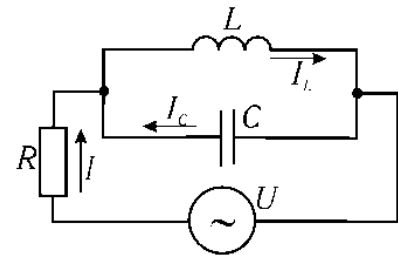


Рис. 3. Електрична ланка  
для вивчення явища  
резонансу струмів

Отже, електричне коло з послідовно з'єднаними елементами  $L$  та  $C$  (рис. 4а) призначене для вивчення явища *резонансу напруг*, а коло з паралельно з'єднаними  $L$  та  $C$  (рис. 4б) – для вивчення явища *резонансу струмів*. Монтажні схеми до них наведені на рис. 5.

Падіння напруги  $U_R$  на опорі  $R$  вимірюють мультиметром 2. Джерелом зовнішньої напруги є генератор сигналів (напруги) спеціальної форми 1.

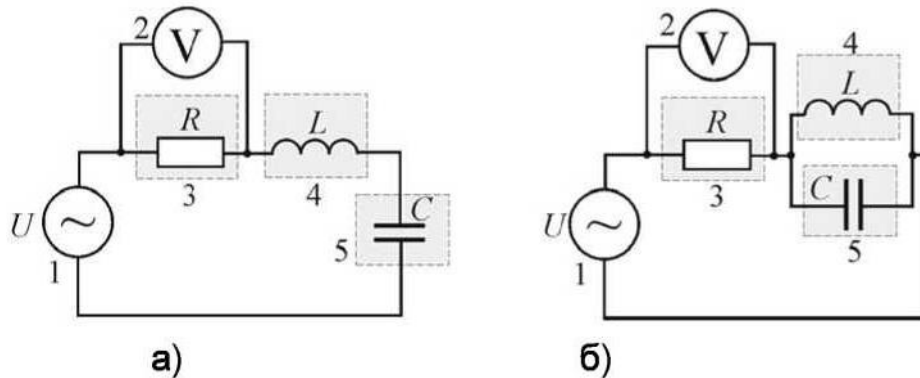


Рис. 4. Електричні кола для вивчення явища резонансу:

а) резонансу напруг; б) резонансу струмів;

1 – генератор сигналів спеціальної форми; 2 – мультиметр (режим  $\sim V\ 2V$ , входи  $SOM(a)$  і  $V\Omega(+)$ ); 3 – мініблок «МАГАЗИН СОПРОТИВЛЕНИЙ» з опором  $R = 20\ \Omega$ ; 4 – Котушка з індуктивністю  $L_x$ ; 5 – мініблок «МАГАЗИН ЕМКОСТЕЙ» ємністю  $C_0$  або  $C_x$ .

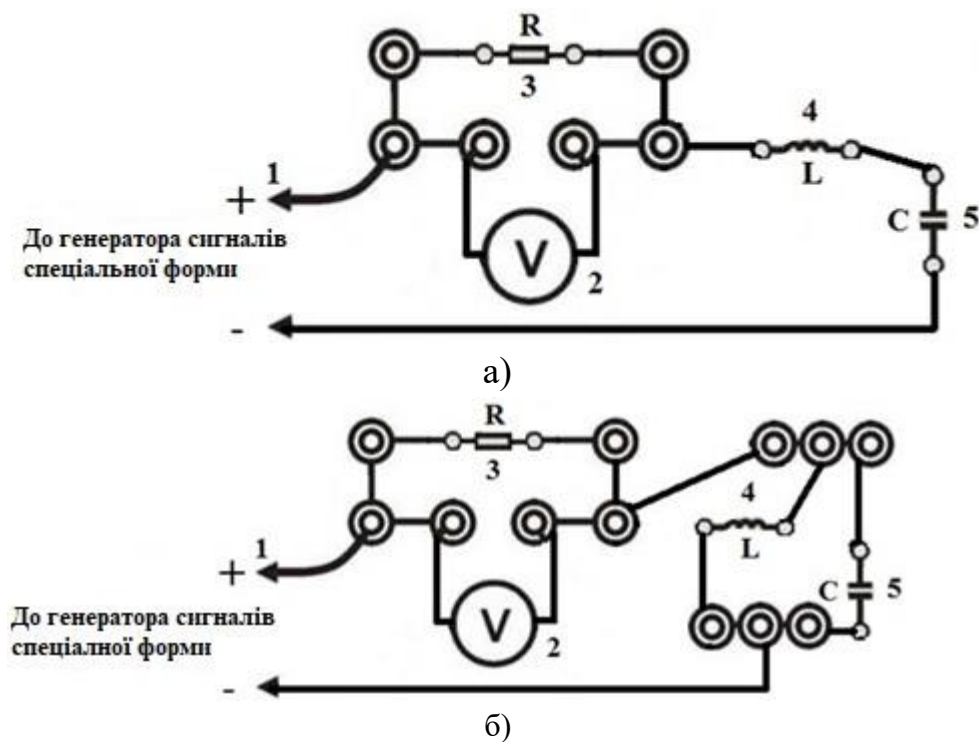


Рис. 5. Монтажні схеми до рис. 4а та 4б відповідно

### Порядок виконання роботи

1. Зберіть за монтажною схемою, яка наведена на рис. 5, електричну ланку, яка складається з послідовно з'єднаного конденсатора відомої ємності  $C_0$  (це значення ємності занесіть у таблицю) та невідомої індуктивності  $L_x$ .

2. Увімкніть кнопками «СЕТЬ» (із дозволу викладача) живлення блока генераторів напруги та блоку мультиметрів. Ручкою установки частоти встановіть початкову частоту  $f = 50$  Гц. З'єднайте незадіяний у схемі мультиметр (режим  $V \sim 2$  В, входи  $\text{COM}(-)$ ,  $V\Omega(+)$ ) з вихідними гніздами генератора та ручкою «УСТАНОВКА УРОВНЯ» встановіть напругу на виході генератора 1–2 В.

3. Збільшуючи частоту  $f$  вихідного сигналу генератора, виміряйте залежність напруги на опорі  $R$  контуру від частоти  $U_R = F(f)$ . Треба взяти приблизно 25 значень частоти, за умови максимальної частоті  $U_R$  буде дорівнювати приблизно початковому значенню напруги 1–2 В. Зробіть заміри два рази, результати вимірювань запишіть у таблицю протоколу, побудуйте графік  $U_R = F(f)$ , знайдіть максимальну напругу на активному опорі  $U_R$  та відповідну їй частоту  $f_{\text{рез}}$  для двох вимірів  $U_R = F(f)$ , знайдіть середнє значення резонансної частоти  $f_{\text{рез}}$  та її похибку.

4. Вимкніть кнопками «СЕТЬ» живлення блока генераторів напруги та мультиметр. Замініть конденсатор  $C$  в коливальному контурі на  $C_x$  (невідомий) та повторіть вимірювання згідно з п. 2, 3 для отримання ще однієї резонансної кривої, знайдіть резонансну частоту  $f_{x,\text{рез}}$  та за формулою (5) розрахуйте  $C_x$ .

5. Підключіть мультиметр паралельно до ділянки кола  $L_x C_x$ . Змінюючи частоту генератора в тому ж інтервалі, спостерігайте поблизу резонансної частоти  $f_{\text{рез}}$  мінімальне значення напруги  $U_{LC}$ .

6. Вимкніть кнопками «СЕТЬ» живлення блока генераторів напруги та мультиметр.

7. Зберіть електричне коло (рис. 4б), яке складається з паралельно з'єднаних конденсатора (це значення занесіть у таблицю) та невідомої індуктивності  $L_x$ . Виконайте вимірювання згідно з п. 2–6 та проведіть вимірювання  $U_R$  у тому ж частотному діапазоні, що і для послідовного з'єднання елементів. Результати вимірювань запишіть у таблицю для побудови графіка  $U_R = F(f)$ .

8. Вимкніть кнопками «СЕТЬ» живлення блока генераторів напруги та мультиметр.

### Обробка результатів вимірювань

1. За даними таблиці побудуйте на одному графіку дві резонансні криві  $U_R = F(f)$ . Позначте значення резонансних частот контуру за положенням максимуму та мінімуму кривих  $U_R = F(f)$ .

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

$$L_x = \frac{1}{C_0 \omega_{0,\text{рез}}^2}, (\text{Гн}).$$

За другою частотою  $f_{x,\text{рез}}$  та формулою (5) розрахуйте ємність  $C_x$ :

$$C_x = C_0 \left( \frac{f_{0,\text{рез}}}{f_{x,\text{рез}}} \right)^2, (\text{мкФ}).$$

Результати обчислень запишіть у таблицю.

3. У висновку наведіть аналіз отриманих даних:

- а) опишіть зміни залежності  $U_R = F(f)$  за зміни ємності коливального контуру;
- б) порівняйте частоти, які відповідають максимуму резонансної кривої  $U_R = F(f)$  для послідовного з'єднання конденсатора та індуктивності та мінімуму кривої  $U_R = F(f)$  для паралельного підключення конденсатора та індуктивності.

### **Контрольні питання та завдання**

#### ***Підготовка до роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Сформулюйте мету роботи. Яке фізичне явище вивчається в роботі?
2. Які фізичні величини в цій роботі вимірюються безпосередньо?
3. Запишіть формулу частоти власних коливань послідовного і паралельного контурів та формулу добротності контуру. Поясніть фізичний сенс добротності.
4. Чому дорівнює повний опір кола на резонансній частоті для послідовного і паралельного з'єднання елементів  $LC$ -контуру?

#### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Запишіть закон зміни струму в колі під час вимушених коливань.
2. Чим визначається частота та амплітуда вимушених коливань?
3. Яку ЕРС викликають вимушені коливання?
4. За якої умови спостерігається резонанс у коливальному контурі в режимі вимушених коливань?
5. Чому дорівнює величина повного опору контуру та струму в ньому у випадку резонансу напруг (послідовного резонансу)?
6. Як поведуть себе величина струму  $I$  та величини напруг  $U_{LC}$ ,  $U_R$  за умови резонансу напруг в коливальному контурі?

7. Як пояснити, що:
  - а) при резонансі напруг струм у контурі максимальний;
  - б) при резонансі струмів у з'єднаних до коливального контуру проводах тече невеликий струм?
8. Від яких величин залежить висота (амплітуда) резонансного піку струму  $I_m(\omega_{\text{рез}})$ ?
9. Яку форму мають резонансні криві  $U_R = F(f)$ ,  $U_{LC} = F(f)$ : а) при резонансі напруг; б) при резонансі струмів?
10. До якої ділянки коливального контуру потрібно підключити мультиметр для отримання резонансної кривої із максимумом (або з мінімумом) у випадках:
  - а) послідовного з'єднання елементів  $L$  та  $C$ ;
  - б) паралельного з'єднання  $L$  та  $C$ ?
11. Як у заданому коливальному контурі можна змінити: а) частоту вимушених коливань; б) резонансну частоту контуру?
12. Які параметри коливань у контурі зміняться, якщо змінити частоту коливань генератора?
13. Яким шляхом у роботі досягають резонансних режимів роботи електричних кіл? Що слугує ознакою досягнення резонансу в електричних коливальних контурах?
14. З якою метою в роботі будується графік  $U_R = F(f)$ ? У який спосіб за ним визначити резонансну частоту контуру?
15. Які дані вимірювань застосовують для визначення таких величин:
  - а) індуктивності контуру  $L$ ;
  - б) ємності контуру  $C_x$ ?

### Рекомендовані джерела

1. Курс загальної фізики. Електрика та магнетизм: навчальний посібник / В. Ф. Русаков. Вінниця: Твори, 2020. 244 с.
2. Загальний курс фізики. У 3-х ч. Ч. 2. Електрика і магнетизм: навчальний посібник / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, П. П. Луцик; за заг. ред. І. М. Кучерука. Київ: Техніка, 2001. 452 с.
3. Чебаненко А. П. Курс загальної фізики: підручник, Т. 3. Електрика і магнетизм. Одеса: Астропринт, 2011. 224 с.
4. Барановський В. М., Бережний П. В., Горбачук І. Т. та ін. Загальна фізика. Лабораторний практикум: навчальний посібник / за заг. ред. І. Т. Горбачука. Київ: Вища школа, 1992. 509 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 13  
«ВІВЧЕННЯ ЯВИЩА РЕЗОНАНСУ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ»

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_

Таблиця 1

|    | Послідовне з'єднання $L_X$ і $C_0$<br>$R =$ _____ Ом, $L_X =$ _____ мГн |           |                                             |           | Паралельне<br>з'єднання $L_X$ і $C_0$ |           |
|----|-------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------|-----------|---------------------------------------|-----------|
|    | $C_0 =$ _____ мкФ<br>$f_{рез} =$ _____ Гц                               |           | $C_X =$ _____ мкФ<br>$f_{x,рез} =$ _____ Гц |           | $C =$ _____ мкФ<br>$L_X =$ _____ мГн  |           |
| №  | $f$ , Гц                                                                | $U_R$ , В | $f$ , Гц                                    | $U_R$ , В | $f$ , Гц                              | $U_R$ , В |
| 1  |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 2  |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 3  |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 4  |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 5  |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 6  |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 7  |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 8  |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 9  |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 10 |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 11 |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 12 |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 13 |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 14 |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 15 |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 16 |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 17 |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 18 |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 19 |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 20 |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 21 |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 22 |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 23 |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 24 |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |
| 25 |                                                                         |           |                                             |           |                                       |           |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 14

### Перехідні процеси в $RL$ -колі

**Мета роботи:** дослідити перехідні процеси в  $RL$ -колі.

**Прилади й обладнання:** котушка індуктивності, осердя до котушки, магазин опорів, генератор сигналів, цифровий осцилограф.

#### Загальні положення

Перехідні процеси виникають в електричному колі під час переходу від одного встановленого режиму до іншого внаслідок різних комутацій (перемикань).

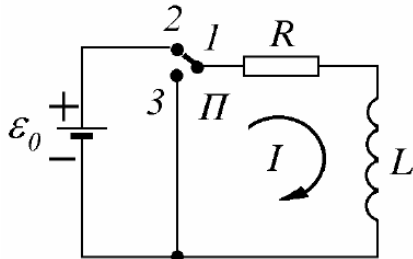


Рис. 1. Схема  $RL$ -кола

Нехай у момент часу  $t = 0$  до  $RL$ -кола підключили джерело з ЕРС, що дорівнює  $\mathcal{E}_0$  (перемикач  $\Pi$  в положенні 2). Застосуємо закон Ома для ділянки кола, вважаючи, що на рис. 1 вказано позитивний напрямок струму:

$$\mathcal{E}_0 - L \frac{di}{dt} = iR. \quad (1)$$

Розділяючи змінні, перепишемо диференціальне рівняння (1) у вигляді:

$$dt = \frac{L di}{\mathcal{E}_0 - R \cdot i}. \quad (2)$$

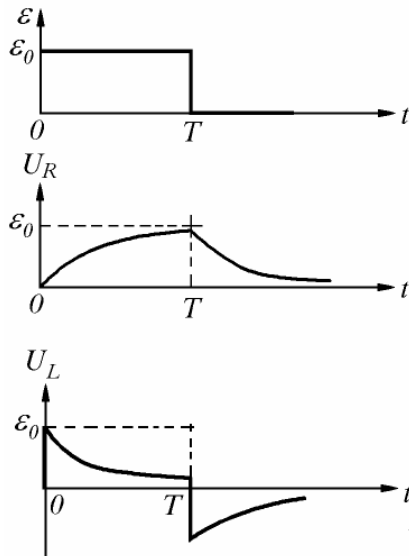


Рис. 2. Часова залежність напруги на опорі та котушці індуктивності

Проінтегруємо (2) з урахуванням початкових умов ( $i = 0$  при  $t = 0$ ), тоді отримаємо розв'язок для залежності струму від часу:

$$i(t) = \frac{\mathcal{E}_0}{R} \left( 1 - e^{-\frac{tR}{L}} \right). \quad (3)$$

Якщо в момент часу  $t = T$  перемикач  $\Pi$  перевести в положення 3 (якщо вимкнути джерело ЕРС від кола, то в рівнянні (2)  $\mathcal{E}_0 = 0$ ), отримаємо струм для  $t > T$ :

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

Константа  $\tau = L/R$  має розмірність часу та характеризує швидкість зміни струму в електричному колі. Ця константа називається *сталюю часу*  $RL$ -кола.

Наведемо формули залежностей падіння напруги на резисторі  $U_R(t) = i(t) \cdot R$  та на котушці індуктивності  $U_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$  від часу:

1) за умови  $t \leq T$ :

$$U_R(t) = \mathcal{E}_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right),$$

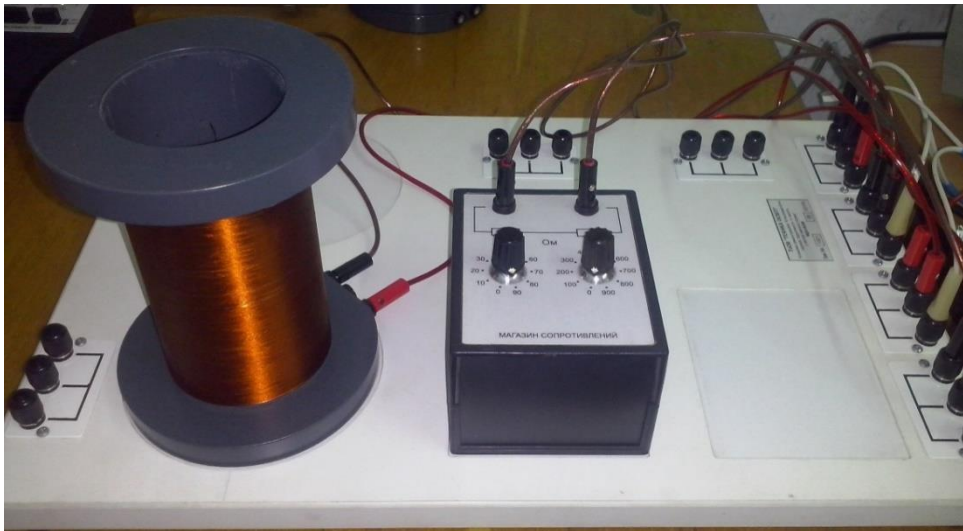
$$U_L(t) = \mathcal{E}_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}};$$

2) за умови  $t > T$ :

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

$$U_L(t) = (U_L(T) - \mathcal{E}_0) \cdot e^{-\frac{t-T}{\tau}}.$$

Графіки залежностей  $\mathcal{E}_0$ ,  $U_L(t)$ , а також падіння напруги на  $U_R(t)$  наведені на рис. 2. На рис. 3 наведений загальний вигляд установки для дослідження перехідних процесів у колі.



*Рис. 3. Загальний вигляд лабораторної установки для дослідження перехідних процесів у  $RL$ -колі*

### **Порядок виконання роботи**

1. Зберіть схему  $RL$ -контуром, як показано на рис. 4.
2. Встановіть у «МАГАЗИН СОПРОТИВЛЕНИЙ» резистор  $R_1 = 10$  Ом, на генераторі кнопкою «РЕЖИМ» оберіть «МЕАНДР», ручкою «ЧАСТОТА» встановіть частоту  $f_1$  приблизно 100 Гц і натисніть кнопку «СТАРТ».
3. Спостерігайте на екрані осцилографа два сигнали: на каналі 1 (CH1) сигнал, який подається з генератора, а на каналі 2 (CH2) сигнал, який пропорційний силі струму в котушці  $U_{max,i}$ . Виміряйте осцилографом амплітуду напруги  $U_{max}$  на котушці без осердя, потім – на котушці з осердям для  $R_1$ . Результати вимірювань запишіть у таблицю 1 протоколу.

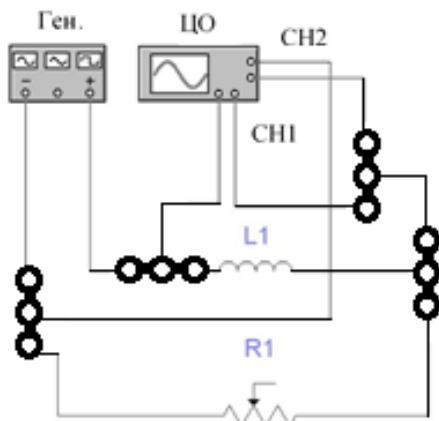


Рис. 4. Схема з'єднань  $R$  і  $L$

4. Змінюючи значення опору контуру  $R_i$  з кроком у 10 Ом, виміряйте осцилографом напруги  $U_i$ ,  $i = 1, 2, \dots$  на котушці без осердя і з осердям, результати вимірювань запишіть у таблицю 1 протоколу. Зверніть увагу на зміну напруги на котушці з осердям і без осердя.

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

## Контрольні питання та завдання

### Підготовка до роботи

(відповіді подати в письмовому вигляді)

1. Сформулюйте мету роботи. Яке фізичне явище вивчається в роботі?
2. Які фізичні величини в цій роботі вимірюються безпосередньо?
3. Що таке стала часу  $RL$ -кола? Поясніть її фізичний сенс і запишіть вирази залежності струму від часу через сталу часу при  $t \leq T$  і  $t > T$ .

### Захист роботи

(відповіді подати в письмовому вигляді)

1. Чому дорівнює стала часу  $\tau$   $RL$ -кола? Сформулюйте її фізичний сенс.
2. Як зміниться форма напруги  $U_R(t)$  під час збільшення опору  $R$  у 2 рази?
3. Чому буде дорівнювати напруга  $U_L$  при  $t = \tau$ ?
4. Виведіть формули значень  $U_L(t)$  при  $t \leq T$  і  $t > T$ .

## Рекомендовані джерела

1. Курс загальної фізики. Електрика та магнетизм: навчальний посібник / В. Ф. Русаков. Вінниця: Твори, 2020. 244 с.
2. Загальний курс фізики. У 3-х ч. Ч. 2. Електрика і магнетизм: навчальний посібник / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, П. П. Луцик; за заг. ред. І. Кучерука. Київ: Техніка, 2001. 452 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 14  
«ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В  $RL$ -КОЛІ»

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_

Таблиця 1

| $R_i$ , Ом | $L_1$ без осердя | $L_1$ з осердям  |
|------------|------------------|------------------|
|            | $U_{1max,i}$ , В | $U_{2max,i}$ , В |
| 10         |                  |                  |
| 20         |                  |                  |
| 30         |                  |                  |
| 40         |                  |                  |
| 50         |                  |                  |
| 60         |                  |                  |
| 70         |                  |                  |
| 80         |                  |                  |
| 90         |                  |                  |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 15

### RC-контур за умови змінного струму

**Мета роботи:** вивчити процеси, які відбуваються в RC-колі за умови змінного струму.

**Прилади й обладнання:** магазин ємностей, магазин опорів, генератор звукової частоти, цифровий осцилограф.

#### Загальні положення

Електричний струм у конденсаторі є сукупністю процесів його зарядження та розрядження, тобто в конденсаторі протікають процеси накопичення та віддачі енергії електричним полем між обкладками конденсатора.

У колі змінного струму конденсатор буде заряджатися до певного максимального значення, допоки струм не змінить напрямку на протилежний. У моменти максимального амплітудного значення напруги на конденсаторі струм у ньому буде дорівнювати нулю. Отже, напруга на конденсаторі та струм у ньому будуть мати різницю за часом у четверть періоду коливань у контурі (різниця фаз становить  $\pi/2$ ).

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

Якщо прикласти до конденсатора напругу  $U$ , миттєво потече струм поступово зменшуючись від максимального значення до нуля. Водночас напруга на його выводах буде, навпаки, зростати від нуля до максимального значення. Тому напруга на обкладках конденсатора за фазою відстає від струму на кут  $90^\circ$ . Такий зсув фаз називають *від'ємним*.

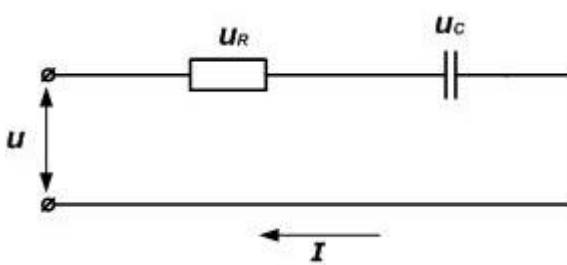


Рис. 1. RC-коло

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

Нехай напруга на зажимах кола дорівнює:

$$u(t) = U_m \sin \omega t. \quad (1)$$

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

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

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

Тоді вираз (1) можна переписати через струм у такий спосіб:

$$iR + \frac{1}{C} \int i dt = U_m \sin \omega t \quad (3)$$

або

$$\frac{di}{dt} + \frac{i}{RC} = \frac{\omega U_m}{R} \cos \omega t. \quad (4)$$

Розв'язуючи це диференціальне рівняння, отримаємо струм у колі у вигляді:

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

Підставляючи  $i$  у вираз (3) та інтегруючи, отримаємо:

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

Напруга на резисторі буде дорівнювати:

$$u_R = iR = I_m R \sin(\omega t - \theta), \quad (7)$$

а напруга на конденсаторі:

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

З виразів (8) і (7) випливає, що напруга на конденсаторі відстає від струму на кут  $\pi/2$ . Вираз  $1/\omega C$  називається *реактивним (ємнісним) опором* для синусоїдального струму:

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

Зі зменшенням частоти ємнісний опір конденсатора збільшується. За умови постійного струму реактивний опір дорівнює нескінченності, оскільки в цьому випадку частота дорівнює нулю.

Зсув фази  $\theta$  в послідовному  $RC$ -колі розраховується за формулою:

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

Модуль повного опору (імпедансу)  $RC$ -кола дорівнює:

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

звідки амплітудне значення струму визначається за формулою:

$$I_m = \frac{U_m}{|Z|} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (12)$$

### Порядок виконання роботи

#### **Вправа 1. Вимірювання форм і амплітуд сигналів**

1. Зберіть схему, як це показано на рис. 2.

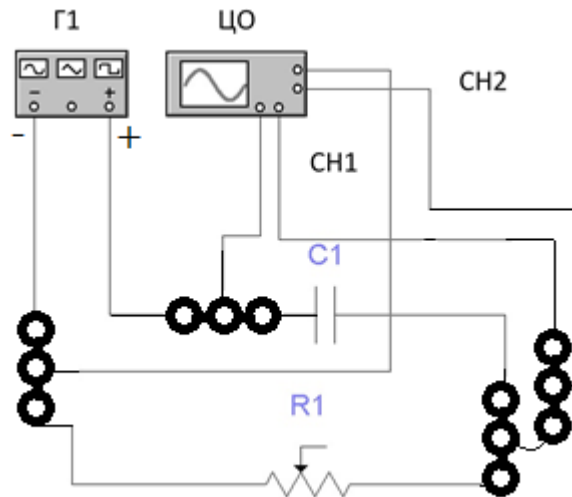


Рис. 2. Схема з'єднання елементів RC-кола

2. Встановіть у магазині опорів значення  $R_1 = 50$  Ом, на генераторі **1** – частоту  $f = 100$  Гц синусоїдальної форми, а в магазині ємностей  $C$  – значення  $C_1 = 1$  мкФ.
3. Спостерігайте на екрані осцилографа два сигнали синусоїдальної форми: один сигнал з опору  $R_1$ , а другий – з ємності  $C_1$ . Вони мають бути зсунутими за фазою на  $\pi/2$  один відносно одного.
4. Зарисуйте цю осцилограму, виміряйте значення амплітуди напруги  $U_C$  осцилографом і запишіть дані в таблицю 1.
5. Виконайте дії згідно з п. 2–3 змінюючи значення  $C_i$  від 1.5 мкФ до 9 мкФ, перемикаючи ручку в магазині ємностей.
6. Для кожного значення ємності  $C_i$  виміряйте осцилографом амплітуду  $U_C$  і запишіть її в таблицю 1. Зверніть увагу на характер зміни амплітуди сигналу.

#### **Вправа 2. Дослідження частотних залежностей напруг і опорів RC-кола**

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

2. Змінюючи частоту  $f$  генератора **1** у межах від 100 Гц до 1 000 Гц із кроком 100 Гц, виміряйте значення напруги на конденсаторі  $U_C$  і запишіть у таблицю 1. Зверніть увагу на характер зміни амплітуди сигналу.

3. За результатами вимірювань побудуйте графіки залежностей напруги і реактивного опору на конденсаторі  $u_C = \varphi(X_C)$ ,  $u_C = \varphi(f)$ ,  $X_C = \varphi(f)$ .

### **Контрольні питання та завдання**

#### ***Підготовка до роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Сформулюйте мету роботи. Яке фізичне явище вивчається в роботі?
2. Які фізичні величини в цій роботі вимірюються безпосередньо?
3. Як змінюється напруга на резисторі і на конденсаторі, послідовно з'єднаних у колі змінного струму?
4. Запишіть формули зсуву фази  $\theta$  у послідовному  $RC$ -колі, повного імпедансу кола і амплітудного значення струму. Поясніть значення кожного параметра.

#### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Запишіть формули законів Ома та Кірхгофа для електричних кіл змінного струму.
2. Запишіть формули для визначення індуктивного та ємнісного опорів.
3. Запишіть формули для визначення активної, реактивної та повної потужності кола.
4. Чому дорівнює кут зсуву фаз між напругою та струмом на активному, індуктивному та ємнісному елементах?
5. Чому змінюється амплітуда напруги  $U_C$  зі зміною частоти і зміною ємності?

### **Рекомендовані джерела**

1. Курс загальної фізики. Електрика та магнетизм: навчальний посібник / В. Ф. Русаков. Вінниця: Твори, 2020. 244 с.
2. Загальний курс фізики. У 3-х ч. Ч. 2. Електрика і магнетизм: навчальний посібник / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, П. П. Луцик; за заг. ред. І. Кучерука. Київ: Техніка, 2001. 452 с.

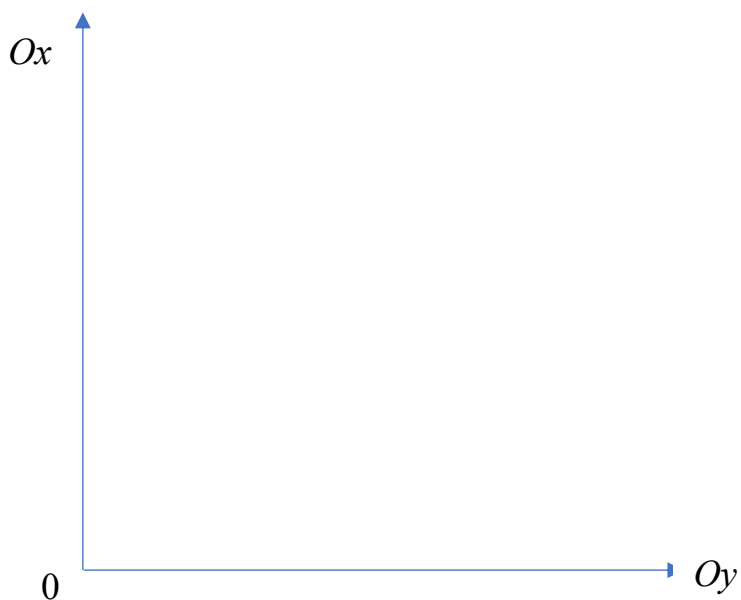
ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 15  
«**RC-КОНТУР ПРИ ЗМІННОМУ СТРУМІ**»

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_

Таблиця 1

| <b>Вправа 1.</b> $f=100$ Гц, $R = 50$ Ом |           | <b>Вправа 2.</b> $C = 5.5$ мкФ, $R = 50$ Ом |           |
|------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------|-----------|
| $C_i$ , мкФ                              | $U_C$ , В | $f$ , Гц                                    | $U_C$ , В |
| 1                                        |           | 100                                         |           |
| 1.5                                      |           | 200                                         |           |
| 2.2                                      |           | 300                                         |           |
| 3.3                                      |           | 400                                         |           |
| 4.7                                      |           | 500                                         |           |
| 5.5                                      |           | 600                                         |           |
| 6.8                                      |           | 700                                         |           |
| 8                                        |           | 800                                         |           |
| 9                                        |           | 900                                         |           |
|                                          |           | 1 000                                       |           |



Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

## Лабораторна робота № 16

### Взаємна індукція двох соленоїдів

**Мета роботи:** експериментально визначити коефіцієнт взаємної індукції двох соленоїдів та порівняти результат із розрахунком теоретично.

**Прилади й обладнання:** генератор сигналів спеціальної форми, мініблок «СОЛЕНОЇДИ», два мультиметри.

#### Загальні положення

Соленоїд зі струмом  $I_1$  створює навколо себе магнітне поле  $\vec{B}_1$ . Якщо поблизу цього соленоїда розмістити інший соленоїд, то з ним виявиться зчепленим деякий магнітний потік  $\Phi_2$  (рис. 1). Цей магнітний потік, як показує дослід та теорія, пропорційний величині струму в першому соленоїді (рис. 1).

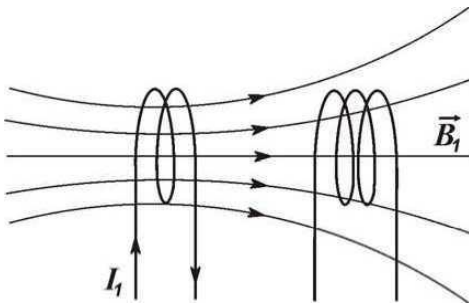


Рис. 1. Лінії індукції магнітного поля соленоїда

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

де  $M_{21}$  – коефіцієнт пропорційності (зчеплення).

Коефіцієнт пропорційності  $M_{21}$  між магнітним потоком  $\Phi_2$ , який проходить через поперечний переріз другого соленоїду, та струмом  $I_1$ , що тече в першому соленоїді, називається *коефіцієнтом взаємної індукції* другого соленоїда з першим.

Дослідимо коефіцієнт взаємної індукції на прикладі двох соленоїдів, осі яких співпадають. Один з них (короткий)  $L_k$  розташовується всередині довгого соленоїда  $L_d$ , як показано на рис. 2.

Довгий соленоїд  $\ell_1 \gg d_1$  створює в середній його частині, в якій розташований короткий соленоїд, практично однорідне магнітне поле, вектор магнітної індукції  $B_1$  якого дорівнює:

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

де  $N_1$  – кількість витків довгого соленоїда;

$\ell_1$  – його довжина.

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

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

Оскільки короткий соленоїд розташований посередині довгого соленоїда і площі їх перетинів співпадають, то магнітний потік  $\Phi_2$ , зчеплений з коротким соленоїдом, буде дорівнювати:

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

де  $N_2$  – кількість витків короткого соленоїда.

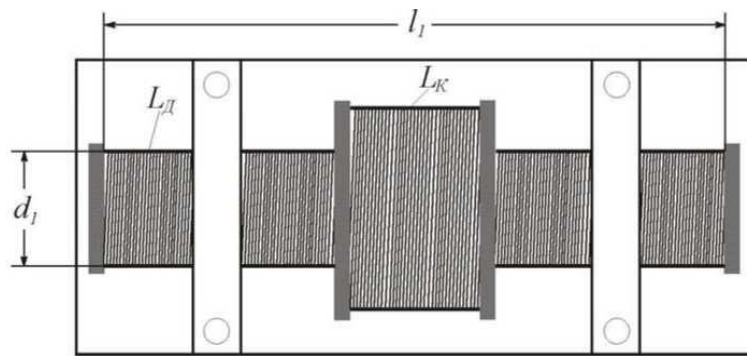


Рис. 2. Схема розташування двох соленоїдів

Тоді коефіцієнт взаємної індукції другого соленоїда з першим соленоїдом дорівнює:

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

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

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

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

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

і відповідно в ньому буде наводитися електрорушійна сила індукції (Е.Р.С. індукції):

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

Амплітуда цієї Е.Р.С. буде дорівнювати:

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

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

Електровимірювальні прилади, зокрема і мультиметри, вимірюють діючі значення струму та напруги (за осцилографом – амплітудні), тому:

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

Враховуючи це, з (8) та (9) отримаємо вираз для напруги ЕРС:

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

звідси для коефіцієнту взаємної індукції отримаємо вираз:

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

Отже, для заданої частоти  $f$ , вимірюючи струм  $I_1$  у довгому соленоїді та напругу  $U_2$ , яка виникає на кінцях короткого соленоїда, можна експериментально визначити значення коефіцієнта взаємної індукції  $M_{21}$ .

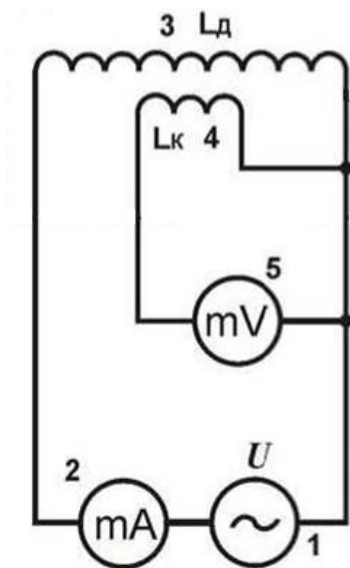


Рис. 3. Електрична схема установки для дослідження ЕРС індукції

### Опис установки

Електрична схема установки наведена на рис. 3. Живлення довгого соленоїда 3 здійснюється від генератора сигналів спеціальної форми 1. Струм у колі вимірюється мультиметром 2. ЕРС взаємодукції, яка виникає в короткому соленоїді 4, вимірюється осцилографом 5. Монтажна схема установки наведена на рис. 4:

- 1 – генератор сигналів спеціальної форми;
- 2 – мультиметр (режим змінний ( $\sim$ ) А: 200 мА, входи COM(–) та mA(+));
- 3 – довгий соленоїд з індуктивністю  $L_d$ ;
- 4 – короткий соленоїд з індуктивністю  $L_k$ ;
- 5 – осцилограф для вимірювання амплітуди напруги.

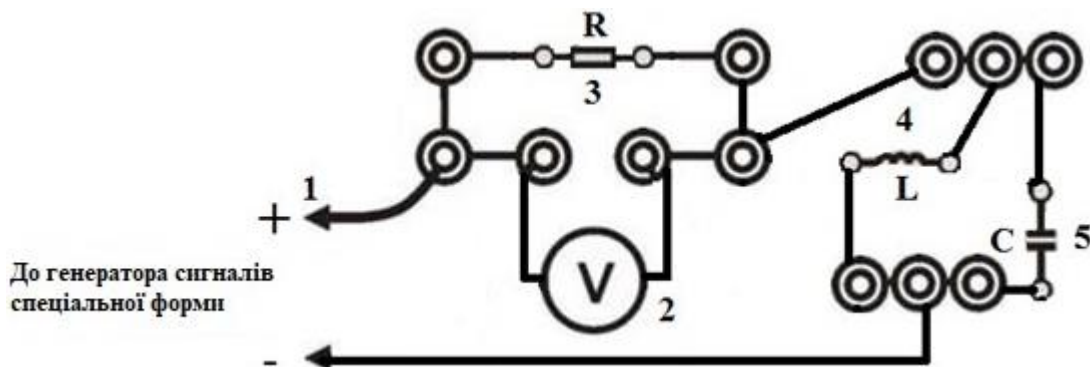


Рис. 4. Монтажна схема для виконання дослідів

## Порядок виконання роботи

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



Рис. 5. Загальний вигляд виміральної установки

1. Увімкніть (із дозволу викладача) кнопками «СЕТЬ» живлення блоку генераторів напруги, мультиметр, осцилограф. Встановіть на генераторі сигнал синусоїдальної форми кнопкою «РЕЖИМ».

2. У таблицю 1 протоколу запишіть параметри  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $\ell_1$ ,  $d_1$ .

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

4. Ручкою установки частоти встановіть частоту сигналу  $f_1 = 1\,000$  Гц; виміряйте напругу  $U_2$  на короткому соленоїді за допомогою осцилографа для вказаних у таблиці значень струму  $I_1$  (20, 30, 40, 50, 60, 70 мА), за отриманою залежністю  $U_2 = f(I_1)$  знайдіть за *методом найменших квадратів* коефіцієнт взаємної індукції  $M_{21}$  та його похибку. Результат вимірювань та розрахунків занесіть у таблицю 1 протоколу.

5. Проведіть подібні вимірювання та розрахунки для інших струмів та частот (3 000 Гц, 5 000 Гц), які вказані в таблиці 1 протоколу.

6. За формулою (4) розрахуйте теоретичне значення коефіцієнта магнітної індукції  $M_{21,T}$ .

7. Порівняйте між собою значення експериментального  $M_{21,E}$  та теоретичного  $M_{21,T}$  коефіцієнта взаємної індукції. Зробіть висновки.

## Контрольні питання та завдання

### Підготовка до роботи

(відповіді подати в письмовому вигляді)

1. Сформулюйте мету роботи. Яке фізичне явище вивчається в роботі?
2. Які фізичні величини в цій роботі вимірюються безпосередньо?
3. У чому полягає явище електромагнітної індукції? Сформулюйте закон Фарадея для електромагнітної індукції.
4. У чому полягає явище взаємної індукції?

### ***Захист роботи***

*(відповіді подати в письмовому вигляді)*

1. Що таке магнітний потік?
2. Що таке коефіцієнт взаємної індукції і в яких одиницях він вимірюється?
3. Від чого залежить коефіцієнт взаємної індукції?
4. Що таке діюче значення струму та напруги?
5. Сформулюйте висновки до цієї роботи.

### **Рекомендовані джерела**

1. Курс загальної фізики. Електрика та магнетизм: навчальний посібник / В. Ф. Русаков. Вінниця: Твори, 2020. 244 с.
2. Загальний курс фізики. У 3-х ч. Ч. 2. Електрика і магнетизм: навчальний посібник / І. М. Кучерук, І. Т. Горбачук, П. П. Луцик; за заг. ред. І. Кучерука. Київ: Техніка, 2001. 452 с.

ПРОТОКОЛ  
вимірювань до лабораторної роботи № 16  
«ВЗАЄМНА ІНДУКЦІЯ ДВОХ СОЛЕНОЇДІВ»

Виконав / виконала \_\_\_\_\_

Група \_\_\_\_\_

Таблиця 1

| $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}, N_1 = \_, N_2 = \_, \ell_1 = \_ \text{ м}, d_1 = \_ \text{ м}, S_1 = \_ \text{ м}^2$ |                   |                                              |                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------------------------------------|------------------------|
| $f, \text{ Гц}$                                                                                                                | $I_1, \text{ мА}$ | $U_2, \text{ В}$                             | $M_{21,E}, \text{ Гн}$ |
| 1 000                                                                                                                          | 20                |                                              |                        |
| 1 000                                                                                                                          | 30                |                                              |                        |
| 1 000                                                                                                                          | 40                |                                              |                        |
| 1 000                                                                                                                          | 50                |                                              |                        |
| 1 000                                                                                                                          | 60                |                                              |                        |
| 1 000                                                                                                                          | 70                |                                              |                        |
| 3 000                                                                                                                          | 20                |                                              |                        |
| 3 000                                                                                                                          | 30                |                                              |                        |
| 3 000                                                                                                                          | 40                |                                              |                        |
| 3 000                                                                                                                          | 50                |                                              |                        |
| 3 000                                                                                                                          | 60                |                                              |                        |
| 3 000                                                                                                                          | 70                |                                              |                        |
| 5 000                                                                                                                          | 5                 |                                              |                        |
| 5 000                                                                                                                          | 10                |                                              |                        |
| 5 000                                                                                                                          | 15                |                                              |                        |
| 5 000                                                                                                                          | 20                |                                              |                        |
| 5 000                                                                                                                          | 25                |                                              |                        |
| 5 000                                                                                                                          | 30                |                                              |                        |
| $M_{21,T} = \quad \text{Гн}$                                                                                                   |                   | $\langle M_{21,E} \rangle = \quad \text{Гн}$ |                        |

Дата \_\_\_\_\_

Підпис викладача \_\_\_\_\_

### Програмна реалізація методу найменших квадратів

Метод найменших квадратів (МНК) – це математичний метод, за яким мінімізують суму квадратів відхилень певних функцій від параметрів, що шукаються.

Його застосовують для різних цілей, зокрема, для апроксимації експериментальних даних певною функцією.

Тобто якщо маємо таблицю статистичних даних деякої фізичної величини  $Y_i$ , де  $i = 1, 2, \dots, n$  як функцію іншої незалежної змінної  $X_i$ , і знаємо закономірність для залежності  $Y = F(X; a_0, a_1, \dots, a_m)$ ,  $a_i$  – невідомі параметри цієї функції, то постає задача визначити ці параметри і провести криву  $Y = F(X; a_0, a_1, \dots, a_m)$  в найкращий спосіб, тобто, зробити апроксимацію вимірних даних функцією  $F(X; a_0, a_1, \dots, a_m)$ .

Математично задача ставиться так: треба мінімізувати функцію вигляду:

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - F(X_i; a_0, a_1, \dots, a_m))^2$$

і знайти параметри  $a_0, a_1, \dots, a_n$ , за яких ця функція має мінімум.

У найпростішому випадку МНК застосовують для пошуку коефіцієнтів лінійної функції (*лінійної регресії*):

$$F(X; a_0, a_1) = a_0 + a_1 x$$

за експериментально вимірними величинами. Тоді мінімізується функція вигляду:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n (Y_i - (a_0 + a_1 X_i))^2.$$

Розв'язання цієї задачі полягає у знаходженні екстремуму функції двох змінних  $a_0$  і  $a_1$ . Для цього треба знайти відповідні похідні, прирівняти їх до нуля і розв'язати отриману систему лінійних алгебраїчних рівнянь. Результат розв'язку добре відомий:

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2 - \sum_{i=1}^n X_i Y_i \cdot \sum_{i=1}^n X_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2},$$

$$a_1 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2 - (\sum_{i=1}^n X_i)^2}.$$

Коефіцієнт кореляції  $R$  отриманої функції зі статистичними даними оцінюється за формулою:

$$R = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \sum_{i=1}^n Y_i}{\sqrt{\left(n \cdot \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i\right)^2\right) \left(n \cdot \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n Y_i\right)^2\right)}}$$

Наприкінці розраховується сума квадратів відхилень  $\varphi$ , за допомогою якої розраховуються похибки розрахунку коефіцієнтів лінійної регресії  $a_0$  і  $a_1$ :

$$\sigma_{a_1} = \sqrt{\frac{\varphi}{(n-2) \sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k\right)^2}},$$

$$\sigma_{a_0} = \sigma_{a_1} \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k\right)^2}{n}}.$$

У програмі MathCad існують вбудовані функції для реалізації МНК за заздалегідь введеною таблицею даних.

Функція регресії описує залежність між двома рядками спостережень, наприклад, між  $Y_i$ ,  $i = 1, 2 \dots n$  та  $X_i$ ,  $i = 1, 2 \dots n$ . Для обчислення оцінок коефіцієнтів лінійної регресії вигляду  $y = a_0 + a_1 x$  застосовуються такі функції програми MathCad:

$$a_1 = \mathbf{slope}(X, Y), a_0 = \mathbf{intercept}(X, Y).$$

Коефіцієнт кореляції  $R$  розраховується за допомогою вбудованої функції:

$$R = \mathbf{corr}(X, Y).$$

За МНК можна також наближати статистичні дані за апроксимацією поліномами деякого порядку  $m$ . Поліноміальна регресія має вигляд:

$$y = a_m x^m + a_{m-1} x^{m-1} + \dots + a_1 x + a_0.$$

Поліноміальну регресію у MathCad можна реалізувати за допомогою функції **linfit()**.

**Звіт з лабораторної роботи (зразок)**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА

**ЗВІТ**

з лабораторної роботи № \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Виконав студент групи:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Викладач кафедри:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Відмітка про захист роботи:

\_\_\_\_\_

Вінниця 202\_\_

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (механіка і молекулярна фізика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: 104 Фізика та астрономія, 014.08 Середня освіта (фізика), 122 Комп'ютерні науки, 125 Кібербезпека, 105 Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пицюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко; за заг. ред. В. Ф. Русакова. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 130 с.
2. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із загальної фізики (електрика, магнетизм, оптика) (для студентів денної форми навчання спеціальностей: Комп'ютерні науки, Кібербезпека, Фізика та астрономія, Середня освіта (фізика), Прикладна фізика та наноматеріали) / В. Ф. Русаков, В. Г. Пицюга, Р. О. Пишкін, К. В. Демченко. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2020. 131 с.
3. Русаков В. Ф. Молекулярна фізика: навчальний посібник. Вінниця: ТОВ «Твори», 2019. Частина 1. 68 с.
4. Русаков В. Ф. Фізичні основи механіки: навчальний посібник. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 144 с.
5. Русаков В. Ф. Курс загальної фізики. Електрика та магнетизм: навчальний посібник. Вінниця: Твори, 2020. 244 с.
6. Русаков В. Ф., Русакова Н. М. Молекулярна фізика і термодинаміка. Частина II. Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 116 с.
7. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Курс загальної фізики. Т. 1: Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Київ: Техніка, 1999. 536 с.
8. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Курс загальної фізики. Т. 2: Електрика і магнетизм. Київ: Техніка, 2001. 452 с.
9. Бородчук А. В., Пастирський Я. А. Молекулярна фізика. Лабораторний практикум для студентів природничих факультетів. Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2002. 146 с.
10. Козицький С. В., Золотко А. Н. Курс загальної фізики. Т. 2: Молекулярна фізика. Одеса: Астропринт, 2011. 352 с.
11. Ісай В. М., Король А. М. Розрахунок похибок результатів виконання лабораторних робіт з фізики з використанням пакета mathcad. Київ: НУХТ, 2011. 114 с.

Навчальне видання

*Рассохіна Юлія Валентинівна*

*Пишкін Роман Олександрович*

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ  
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ «ФІЗИКА»**

*Для здобувачів денної форми навчання спеціальності  
125 Кібербезпека та захист інформації*

Редактор Я. С. Вакалюк  
Технічний редактор Т. О. Важеніна-Гопрак

Підписано до друку 22.03.2024  
Формат 60×84/16. Папір офсетний.  
Друк – цифровий. Умовн. друк. арк. 6,04.  
Тираж 30. Зам. 7.

Донецький національний університет імені Василя Стуса  
21021, м. Вінниця, 600-річчя, 21  
Свідectво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру  
серія ДК № 5945 від 15.01.2018