

Азнаурян Ірина Олександрівна  
Глива Валентин Анатолійович  
Бірук Яна Ігорівна  
Краснянський Григорій Юхимович  
Бурдейна Наталія Борисівна

# **ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОГРАМИ EXCEL**

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК**



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

# ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОГРАМИ EXCEL

*Рекомендовано вченою радою  
Київського національного університету будівництва і архітектури як  
навчальний посібник для здобувачів вищої освіти усіх спеціальностей*

Київ 2024

УДК: 53(075)  
Ф50

*Автори:* І.О. Азнаурян, В.А. Глива, Я.І. Бірук,  
Г.Ю. Краснянський, Н.Б. Бурдейна

*Рецензенти:* М.І. Шут, доктор фізико-математичних наук,  
академік НАПН України, професор, завідувач  
кафедри загальної та прикладної фізики НПУ  
ім. М.П. Драгоманова  
Л.О. Левченко, доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри цифрових технологій в  
енергетиці КПІ ім. Ігоря Сікорського  
В.Ф. Фролов, доктор технічних наук, професор  
кафедри фізики КНУБА

*Рекомендовано Вченою Радою Київського національного  
університету будівництва і архітектури, протокол № 20 від 29  
березня 2024 року.*

**Фізичний** практикум із застосуванням програми Excel :  
Ф50 навчальний посібник / І.О. Азнаурян та ін. – Київ: КНУБА, 2024. –  
188 с.  
ISBN 978-966-627-264-8

Містить теоретичний матеріал до лабораторних робіт,  
вказівки щодо їх виконання, а також контрольні запитання.

Призначений для здобувачів вищої освіти усіх спеціальностей  
КНУБА.

© І.О. Азнаурян, В.А. Глива, Я.І. Бірук,  
Г.Ю. Краснянський, Н.Б. Бурдейна, 2024  
ISBN 978-966-627-264-8 © КНУБА,  
2024

## Зміст

Передмова .....	5
Вказівки до підготовки та виконання фізичного лабораторного практикуму .....	6
1. Етапи виконання лабораторних робіт .....	6
2. Правила техніки безпеки .....	7
3. Похибки вимірювань фізичних величин .....	8
4. Побудова графіків .....	16
5. Похибки на графіках .....	19
6. Правила наближених обчислень .....	19
<b>Лабораторна робота 1. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ СИСТЕМИ ВІД РОЗПОДІЛУ ЇЇ МАСИ ВІДНОСНО ОСІ ОБЕРТАННЯ .....</b>	<b>21</b>
<b>Лабораторна робота 2. ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ СТОКСА .....</b>	<b>26</b>
<b>Лабораторна робота 3. ВИМІРЮВАННЯ ПРУЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ .....</b>	<b>32</b>
<b>Лабораторна робота 4. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ .....</b>	<b>38</b>
<b>Лабораторна робота 5. ВИЗНАЧЕННЯ АБСОЛЮТНОЇ ТА ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ .....</b>	<b>44</b>
<b>Лабораторна робота 6. ДОСЛІДНЕ ВИВЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ ВІД ВИСОТИ НАД ЗЕМЛЕЮ .....</b>	<b>54</b>
<b>Лабораторна робота 7. ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ПРОВІДНИКА ЗА ДОПОМОГОЮ АМПЕРМЕТРА ТА ВОЛЬТМЕТРА .....</b>	<b>59</b>
<b>Лабораторна робота 8. ГРАДУЮВАННЯ ГАЛЬВАНОМЕТРА .....</b>	<b>65</b>
<b>Лабораторна робота 9. ГРАДУЮВАННЯ ТЕРМОПАРИ .....</b>	<b>74</b>
<b>Лабораторна робота 10. ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ІНДУКЦІЇ ТА НАПРУЖЕНОСТІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ .....</b>	<b>80</b>
<b>Лабораторна робота 11. ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ КОРОТКОГО СОЛЕНОЇДА .....</b>	<b>86</b>
<b>Лабораторна робота 12. ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА МЕТОДОМ СХРЕЩЕНИХ ПОЛІВ .....</b>	<b>92</b>

<b>Лабораторна робота 13. ВИЗНАЧЕННЯ ККД ТРАНСФОРМАТОРА .....</b>	<b>98</b>
<b>Лабораторна робота 14. ВИЗНАЧЕННЯ ІНДУКТИВНОСТІ КОТУШКИ ТА ДРОСЕЛЯ .....</b>	<b>104</b>
<b>Лабораторна робота 15. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗГАСАННЯ КОЛИВАНЬ ФІЗИЧНОГО МАЯТНИКА .....</b>	<b>109</b>
<b>Лабораторна робота 16. ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА РЕЗОНАНСУ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ .....</b>	<b>116</b>
<b>Лабораторна робота 17. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ В ПОВІТРІ МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ .....</b>	<b>123</b>
<b>Лабораторна робота 18. ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИФРАКЦІЙНИХ ГРАТ .....</b>	<b>128</b>
<b>Лабораторна робота 19. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗОВАНОГО СВІТЛА .....</b>	<b>135</b>
<b>Лабораторна робота 20. ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНА З МЕТАЛУ МЕТОДОМ ГАЛЬМУВАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ .....</b>	<b>139</b>
<b>Лабораторна робота 21. ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ НАПІВПРОВІДНИКА .....</b>	<b>145</b>
<b>Лабораторна робота 22. ВИМІРЮВАННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА .....</b>	<b>153</b>
<b>Лабораторна робота 23. ВИМІРЮВАННЯ СВІТЛОВОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЕЛЕМЕНТА .....</b>	<b>163</b>
<b>Лабораторна робота 24. ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОСТІ РАДІОАКТИВНОГО ПРЕПАРАТУ .....</b>	<b>169</b>
<b>Лабораторна робота 25. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОГЛИНАННЯ РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ РІЗНИМИ МАТЕРІАЛАМИ .....</b>	<b>178</b>
Література .....	186
Додатки .....	187

## Передмова

Лабораторний практикум є однією з важливих складових навчального процесу у вищих навчальних закладах та ефективною формою пізнавальної діяльності студентів.

У курсі вивчення фізики виконання лабораторних досліджень займають надважливе місце, оскільки студенти мають можливість особисто спостерігати та відтворювати більшість фізичних явищ, а також самостійно виконувати вимірювання фізичних величин, обробляти їх та робити відповідні висновки.

Студенти закладів вищої освіти виступають у ролі дослідника, тим самим отримуючи навички грамотного технічного вимірювання фізичних величин, вміння оцінювати результати експерименту, що призводить до унаочнення, поглиблення, розширення і обґрунтування теоретичного курсу фізики, тобто здійснюється одна з умов якісного навчання – поєднання теорії з практикою.

Студенти, які виконали цей етап навчання набувають відповідних компетенцій згідно зі Стандартами вищої освіти:

- здатність до абстрактного мислення, аналізу і синтезу;
- здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями;
- здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях;
- навички міжособистісної взаємодії;
- вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми;
- здатність працювати в команді.

У даному навчальному посібнику подано опис лабораторних робіт з усіх розділів згідно до програми дисципліни «Фізика». Зміст кожної лабораторної роботи містить: назву, мету, перелік обладнання, теоретичні основи, схеми установок для проведення експерименту, порядок виконання лабораторної та методику розрахунків отриманих результатів, контрольні запитання.

Інновацією даного навчального посібника є те, що в описі деяких лабораторних робіт наведено приклади графічної обробки результатів із застосуванням програми Excel, що входить до складу пакету Microsoft Office.

## **Вказівки до підготовки та виконання фізичного лабораторного практикуму**

Студент, приступаючи до виконання дослідів, має ознайомитися з метою і порядком виконання лабораторної, вивчити відповідні теми теоретичного курсу, використовуючи рекомендовану навчальну літературу або нотатки лекційного курсу та підготувати звіт з лабораторної.

### **1. Етапи виконання лабораторних робіт**

**I етап.** Викладач на початку кожного заняття перевіряє, наявність звіту з лабораторної роботи і ставить декілька запитань студенту відповідно до змісту роботи, яка буде виконуватись. Якщо відповіді на запитання задовільні, то студент *допускається* до виконання досліджень. Студент відповідні роботи практикуму *виконує самостійно*, але може консультиватись з викладачем.

**II етап.** До початку виконання роботи студент має ознайомитись з обладнанням, з'ясувати призначення кожного його елемента та основні характеристики (межі вимірювання, ціну поділки шкали, клас точності, правила користування приладом і вимоги техніки безпеки).

Студент повинен зібрати схему досліду (якщо це потрібно), але подавати живлення до складеної схеми і приступати до виконання експерименту можна *після перевірки схеми викладачем* та одержання на це його дозволу.

Зазвичай, в кожній лабораторній вимірювання необхідно повторити декілька разів і результати записати у таблицю.

Експериментальна частина роботи вважається виконаною, якщо одержаний результат та побудований графік перевірить викладач. Після завершення виконання лабораторної роботи необхідно привести в порядок робоче місце, повідомити про це викладача та тільки після його дозволу залишити лабораторію.

**III етап.** Для кожної виконаної лабораторної студент зобов'язаний скласти *письмовий звіт і захистити роботу*. Для зарахування роботи студент має дати вичерпну відповідь на поставлені контрольні запитання.

Протокол письмового звіту кожної лабораторної роботи має містити такі елементи:

1. Титульну сторінку;
2. Повну назву роботи;
3. Мету роботи;
4. Схему або рисунок обладнання із зазначенням технічних даних приладів;
5. Короткі теоретичні відомості про досліджуване явище;
6. Порядок виконання роботи;
7. Результати експерименту у вигляді таблиць Excel та, у разі необхідності, побудованих у програмі Excel графіків;
8. Розрахунок похибок;
9. Запис відповіді для величин, що визначаються (кінцеві результати) з урахуванням похибок та одиниць вимірювання;
10. Інтерпретацію одержаних результатів та висновки.

**Вимірювальні прилади** добираються відповідно до методу дослідження та тієї точності, з якою необхідно виконати експеримент. Про кожний вимірювальний прилад, який використовується при дослідженнях, необхідно з'ясувати таке:

- вимоги техніки безпеки до приладу;
- його призначення;
- будову та принцип дії;
- межі вимірювання;
- ціну поділки шкали;
- клас точності;
- правила користування приладом.

*Математична обробка та представлення* результатів вимірювань, як елемент експерименту, має виконуватись із застосуванням правил *наближених обчислень*.

*Інтерпретація* одержаних результатів здійснюється за допомогою теорії, що є основою досліджень. Якщо результати досліджень не узгоджуються з теорією, то експеримент треба проаналізувати (усі його елементи і послідовність етапів) з метою виявлення можливих помилок та повторити.

## **2. Правила техніки безпеки**

Тіло людини є провідником, опір якого змінюється в широких межах залежно від ряду факторів. Вологість, забруднення шкіри та інші

фактори зменшують його опір.

Якщо сила струму більша за 0,05 А, то його дія на тіло людини протягом 0,1 с може спричинити небезпечне ураження. Оскільки сила струму залежить від напруги і опору, то за правилами техніки безпеки напруга, більша за 24 В, вважається небезпечною.

Неправильні з'єднання в схемі можуть призвести до виведення з ладу приладів, травматизму й ураження струмом. Тільки за дотримання вимог правил техніки безпеки можна запобігти цим неприємним явищам.

*Наведемо основні правила техніки безпеки.*

1. До роботи в лабораторії допускаються лише студенти, які ознайомились із правилами техніки безпеки. Студенти розписуються в журналі обліку проведення інструктажу і несуть відповідальність за їхнє виконання.
2. Не дозволяється самостійно робити будь-які вмикання або вимикання на головному щиті.
3. Складати коло за схемою можна тільки при вимкненій напрузі.
4. Вмикати струм у складене коло можна тільки після перевірки схеми викладачем або інженером та отримання їхнього дозволу.
5. Не можна доторкатися до неізольованих частин електричної схеми, які перебувають під напругою (проводи, вимикачі, затискачі, повзунки тощо).
6. Забороняється виконувати будь-які перемикання в схемі під напругою.
7. Не можна залишати без нагляду схему, що знаходиться під напругою.
8. Забороняється закорочувати блокувальні пристрої.
9. Не дозволяється без потреби ходити лабораторією та виконувати інші лабораторні роботи.

### **3. Похибки вимірювань фізичних величин**

Виміряти фізичну величину означає порівняти її з іншою однорідною величиною, яку умовно прийнято за одиницю вимірювання. Розрізняють *прямі* й *непрямі* вимірювання фізичних величин.

*Прямі вимірювання* – це процедура визначення фізичної величини за допомогою технічного пристрою.

Наприклад, на терезах зважують масу тіла, секундоміром вимірюють час, термометром – температуру, напругу – вольтметром тощо.

**Непрямі вимірювання** – це процедура визначення фізичної величини з *прямих вимірювань* інших величин, які пов'язані з шуканою величиною деякою функціональною залежністю.

Наприклад, вимірявши об'єм та масу тіла, визначають його густину; за вимірюванням напруги та сили струму – опір провідника, тощо.

Оскільки технічні засоби та органи відчуття експериментатора мають деякі недосконалості при проведенні фізичних вимірювань, то дістають лише **наближені значення** шуканих величин. Отже, постає завдання не лише визначення числового значення фізичної величини, але й *оцінювання точності та надійності* його вимірювання.

**Точність вимірювань** визначається тією найменшою часткою одиниці вимірювання, до якої можна бути упевненим у правильності результату вимірювання. Точність вимірювань визначається *точністю приладів* (класом точності приладу) та *точністю методу* вимірювання. Якщо клас точності не зазначено, то вважають, що похибка



Рис. 1. Штангенциркуль

приладу дорівнює **половині ціни поділки шкали** його приладу. Наприклад, точність штангенциркуля 0,01 мм (рис. 1), а точність термометра за ціни поділки 2 °С становить 1 °С. Крім того, у процесі експлуатації точність приладів може погіршуватись, тому їх необхідно періодично *калібрувати*.

**Надійність вимірювань** (довірча ймовірність) характеризує ймовірність того, що істинне значення перебуває у певних границях, які визначаються довірчим інтервалом, її визначення вимагає знання методів математичної статистики.

Точність вимірювання тієї чи іншої фізичної величини пов'язана з похибками вимірювань. Похибки вимірювань прийнято поділяти на *систематичні, випадкові та промахи*.

До **систематичних похибок** належать такі, що залишаються

однаковими за фіксованих умов досліду, тобто при яких вимірювання проводять тим самим методом і тими самими приладами. При виконанні лабораторних робіт припускаємо, що систематичні похибки визначаються лише похибкою приладу.

**Випадкові похибки** мають несистематичний, ймовірнісний характер. Вони відрізняються від систематичних насамперед тим, що набувають різних значень в окремих вимірюваннях, які проводяться за однакових умов.

Виконавши ряд вимірювань, можна, користуючись теорією випадкових похибок, яка побудована за законами теорії ймовірності, визначити найбільш ймовірне значення величини, що вимірюється, провести кількісну оцінку випадкової похибки, вказати її ймовірність.

**Промахи** є значним відхиленням від середнього значення вимірюваної фізичної величини та можуть бути обумовлені відволіканням експериментатора у процесі виконання роботи, різкою зміною зовнішніх умов при виконанні досліду (наприклад, зміною температури), внаслідок помилок у записах тощо.

Розглянемо спрощену теорію розрахунків похибок прямих та непрямих вимірювань.

**Абсолютною похибкою**  $\Delta x$  вимірювання називають різницю між знайденим дослідним шляхом та істинним значенням фізичної величини:

$$\Delta x = x_{\text{вим}} - x_{\text{іст}}.$$

Істинне значення фізичної величини одержати не можна, та й повністю уникнути похибок вимірювання принципово неможливо. Однак за допомогою серії вимірювань і обробки їхніх результатів можна знайти **приблизне значення** вимірюваної величини і вказати **граничні значення**, між якими вона знаходиться.

### 3.1. Теорія похибок прямих вимірювань

Нехай в результаті  $n$  вимірювань фізичної величини  $x$  отримані значення  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n$ .

Тоді за найкраще значення вимірюваної величини приймають **середнє арифметичне** з усіх отриманих результатів:

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} = \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.1.1)$$

Для оцінки точності результату вимірюваного значення вводиться величина  $\sigma_{\langle x \rangle}$ , яка характеризує *можливе відхилення знайденого середнього арифметичного від істинного значення*.

Вона називається **середнім квадратичним відхиленням середнього арифметичного значення** (середньою квадратичною похибкою) та визначається за формулою:

$$\sigma_{\langle x \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \langle x \rangle)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta x_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (3.1.2)$$

Вираз в чисельнику під коренем (3.1.2) означає, що для всіх  $x_i$  від першого до останнього необхідно обчислити різницю між  $i$ -ми і середнім значенням (3.3.1), піднести ці різниці до квадрату і знайти їхню суму.

Результат вимірювань записують у вигляді:

$$x = \langle x \rangle \pm \sigma_{\langle x \rangle}. \quad (3.1.3)$$

Запис (3.1.3) зі знаком  $\pm$  рівнозначний нерівності:

$$\langle x \rangle - \sigma_{\langle x \rangle} \leq x \leq \langle x \rangle + \sigma_{\langle x \rangle}, \quad (3.1.4)$$

і означає, що шукана величина  $x$  знаходиться всередині інтервалу шириною  $2\sigma_{\langle x \rangle}$  (рис. 3.1.1).

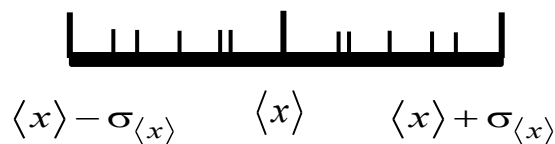


Рис. 3.1.1

Цей інтервал називають **довірчим інтервалом**.

Наприклад, якщо опір резистора становить  $R = (3.0 \pm 0,5)$  кОм, то це означає, що істинне значення вимірюваного опору міститься в довірчому інтервалі від 2,5 до 3,5 кОм.

Довірчий інтервал містить істинне значення вимірюваної величини з *певною ймовірністю*.

Використання середнього квадратичного відхилення  $\sigma_{\langle x \rangle}$  є зручним тому, що в інтервал  $\langle x \rangle - \sigma_{\langle x \rangle}, \langle x \rangle + \sigma_{\langle x \rangle}$  істинне значення величини  $x_{\text{іст}}$  потрапляє у  $\alpha = 68\%$  випадків.

При цьому  $\alpha$  називається коефіцієнтом довіри або **довірчою ймовірністю**. Якщо потрібно мати більшу впевненість у тому, що  $x_{\text{іст}}$  знаходиться всередині довірчого інтервалу, останній необхідно **розширити**.

Якщо розширити довірчий інтервал, наприклад, в 2 рази тобто  $2\sigma_{\langle x \rangle}$  (рис. 3.1.2), то ймовірність того, що невідоме значення виявиться всередині цього інтервалу, зросте до  $\alpha = 95\%$ .

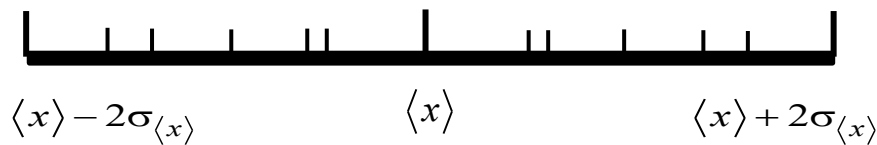


Рис. 3.1.2

Отже, якщо довірчий інтервал збільшується, то зростає ймовірність того, що істинне значення величини потрапляє в даний інтервал. Однак, з розширенням довірчого інтервалу зростає абсолютна і відносна похибка вимірювання.

Побудуємо тепер довірчий інтервал, напівширина якого дорівнює  $t \cdot \sigma_{\langle x \rangle}$ , тобто стандартне відхилення множиться на деяке число  $t$  (рис. 3.1.3).

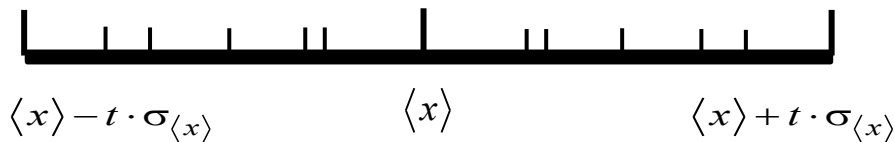


Рис. 3.1.3

У 1908 році англійський математик та хімік В. С. Госсет, який друкував свої роботи під псевдонімом “Student”, запропонував ввести для випадку обмеженої кількості вимірювань  $n$  коефіцієнт  $t_{\alpha, n}$ , який і називають **коефіцієнтом Стьюдента**, для оцінки довірчого інтервалу, що відповідає заданому значенню  $\alpha$ .

Тоді **напівширина** такого довірчого інтервалу, тобто **абсолютна похибка середнього значення** вимірюваної величини дорівнює:

$$\Delta \langle x \rangle = t_{\alpha, n} \cdot \sigma_{\langle x \rangle}. \quad (3.1.5)$$

Значення коефіцієнтів Стьюдента залежать від числа вимірювань  $n$  та від заданої величини довірчої ймовірності  $\alpha$ . Для їх визначення

користуються спеціальними таблицями (табл.1).

Таблиця 3.1.1

Значення коефіцієнтів Стюдента для різних значень імовірності

$n \setminus \alpha$	<b>0,9</b>	<b>0,95</b>	<b>0,99</b>
<b>2</b>	6,31	12,71	63,66
<b>3</b>	2,92	4,30	9,92
<b>4</b>	2,35	3,18	5,84
<b>5</b>	2,13	2,78	4,60
<b>6</b>	2,02	2,57	4,03
<b>7</b>	1,94	2,45	3,71
<b>8</b>	1,90	2,36	3,50
<b>9</b>	1,86	2,31	3,36
<b>10</b>	1,83	2,26	3,25
<b>11</b>	1,64	2,00	2,58

У теорії похибок існують *критерії*, що дозволяють визначити, чи є певний результат *промахом*. При обробці результатів лабораторних робіт достатньо виключити з розгляду результати, для яких  $|\Delta \langle x \rangle| > 3 \cdot \sigma_{\langle x \rangle}$ . Підставою для цього є той факт, що у випадку нормального закону розподілу *імовірність знаходження*  $\Delta \langle x \rangle$  за межами інтервалу  $|\Delta \langle x \rangle| > 3 \cdot \sigma_{\langle x \rangle}$ , становить лише 0,3%.

*Відносною похибкою вимірювання*  $\varepsilon$  називають відношення напівширини довірчого інтервалу до середнього значення вимірюваної величини:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \langle x \rangle}{\langle x \rangle} \cdot 100\%. \quad (3.1.6)$$

У підсумку *остаточний результат* записують у вигляді:

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta \langle x \rangle. \quad (3.1.7)$$

Цей запис означає, що в результаті виконання вимірювань знайдено середнє значення  $\langle x \rangle$  із граничною похибкою  $\Delta \langle x \rangle$ , тобто що з імовірністю  $\alpha = \dots$  істинне значення вимірюваної величини буде лежати в межах від  $\langle x \rangle > \Delta \langle x \rangle$  до  $\langle x \rangle < \Delta \langle x \rangle$ .

### 3.2. Методика розрахунку похибок експериментальних результатів у випадку прямих вимірювань

У всіх лабораторних роботах, що містяться в даному фізичному практикумі, студенти мають дотримуватися *єдиної методики обробки результатів вимірювань*, а результати кожного кроку заносять у таблицю в програмі Excel:

1. Обчислити середнє значення вимірювань за формулою (3.1.1).
2. Знайти похибки окремих вимірювань

$$\Delta x_i = x_i - \langle x \rangle.$$

3. Обчислити квадрати похибок окремих вимірювань

$$\Delta x_i^2 = (x_i - \langle x \rangle)^2.$$

4. Визначити середню квадратичну похибку результату серії вимірювань  $\sigma_{\langle x \rangle}$  за формулою (3.1.2).
5. Якщо серед обчислених значень  $\Delta x_i$ , будуть такі, що перевищують величину  $3\sigma_{\langle x \rangle}$ , то відповідні їм значення  $x_i$  відкинути і вже без них знову визначити середню квадратичну похибку  $\sigma_{\langle x \rangle}$ .
6. Задати значення довірчої ймовірності  $\alpha$  і за таблицею 3.1.1 визначити коефіцієнт Стюдента  $t_{\alpha,n}$  для цього значення  $\alpha$  і числа вимірювань  $n$ .
7. Визначити межі довірчого інтервалу (абсолютну похибку вимірювання)  $\Delta \langle x \rangle$  за формулою 3.1.5.
8. Якщо величина  $\Delta \langle x \rangle$  виявиться порівняною з величиною похибки приладу  $\Delta x_c$ , то межі довірчого інтервалу визначити за формулою:

$$\Delta \langle x \rangle = \sqrt{t_{\alpha,n}^2 \cdot \sigma_{\langle x \rangle}^2 + \left( \frac{t_{\alpha,n}}{3} \right)^2 \cdot \Delta x_c^2}. \quad (3.2.1)$$

9. Оцінити відносну похибку за формулою (3.1.6)
10. Остаточний результат записати у вигляді:

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta \langle x \rangle, \text{ при } \alpha = \dots$$

### 3.3. Методика розрахунку похибок експериментальних результатів у випадку непрямих вимірювань

Багато фізичних величин неможливо виміряти безпосередньо. Їхнє *непряме* вимірювання має два етапи:

- 1) методом *прямих вимірювань* знаходять значення певних величин, наприклад,  $a, b, c$ .
- 2) за відповідною формулою обчислюють шукану величину  $x = f(a, b, c)$ .

Розглянемо два методи розрахунку похибок при непрямих вимірюваннях.

#### I метод.

- 1.1. Для кожної серії вимірювань величин  $a, b, c$  виконати обробку так само, як у випадку *прямих вимірювань*.
- 1.2. Для всіх вимірюваних величин обрати одне і те саме значення довірчої ймовірності  $\alpha$ .
- 1.3. Довірчий інтервал  $\Delta \langle x \rangle$  при непрямих вимірюваннях обчислити за формулою:

$$\Delta \langle x \rangle = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial a}\right)^2 (\Delta a)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial b}\right)^2 (\Delta b)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial c}\right)^2 (\Delta c)^2}. \quad (3.3.1)$$

У формулі (3.3.1)  $\frac{\partial x}{\partial a}$ ,  $\frac{\partial x}{\partial b}$ ,  $\frac{\partial x}{\partial c}$  – є частинними похідними, які обчислюють при  $a = \langle a \rangle$ ,  $b = \langle b \rangle$ ,  $c = \langle c \rangle$ .

- 1.4. Остаточний результат записати у вигляді:

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta \langle x \rangle,$$

де  $\langle x \rangle = f(\langle a \rangle, \langle b \rangle, \langle c \rangle)$ .

#### II метод.

- 2.1. Для кожної серії вимірювань величин  $a, b, c$  виконати обробку так само, як у випадку *прямих вимірювань*.
- 2.2. Обчислити межі довірчого інтервалу (абсолютну похибку вимірювання) величин  $a, b, c$  за формулою 3.1.5.
- 2.3. Визначити відносну похибку величин  $a, b, c$  за формулою 3.1.6.
- 2.4. Визначити відносну похибку шуканої величини  $x = f(a, b, c)$  за відповідними формулами (див. табл. 3.3.1).

2.5. Розрахувати межі довірчого інтервалу (абсолютну похибку вимірювання) за відносною похибкою:

$$\Delta \langle x \rangle = \varepsilon_x \cdot \langle x \rangle.$$

2.6. Остаточний результат записати у вигляді:

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta \langle x \rangle.$$

Таблиця 3.3.1

Функціональна залежність	Відносна похибка
$x = a \pm b \pm c$	$\varepsilon_x = \frac{\Delta a + \Delta b + \Delta c}{a \pm b \pm c}$
$x = a \times b \times c$	$\varepsilon_x = \varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c$
$x = \frac{a \times b}{c}$	
$x = a^n$	$\varepsilon_x = n \cdot \varepsilon_a$
$x = \sqrt[n]{a}$	$\varepsilon_x = \frac{1}{n} \cdot \varepsilon_a$

#### 4. Побудова графіків

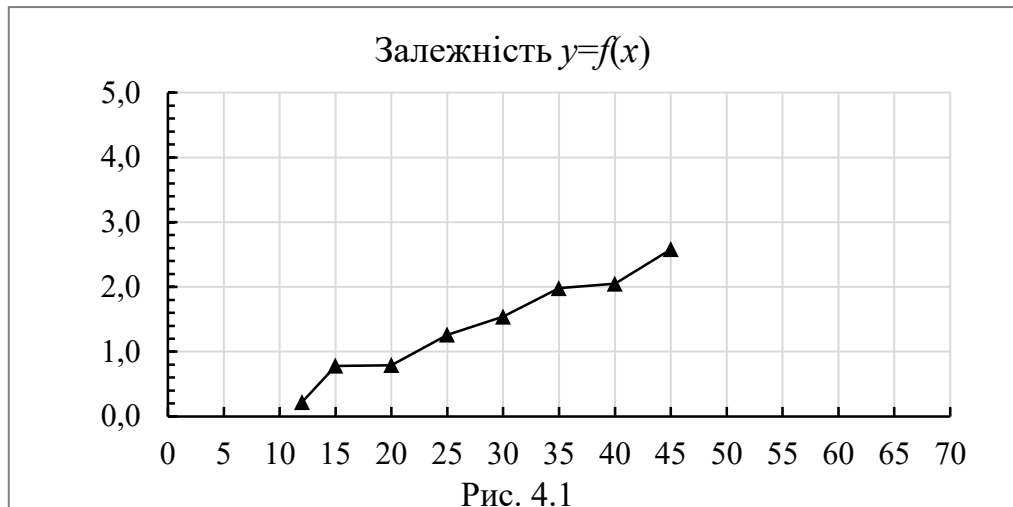
Одним з важливих моментів візуалізації результатів досліджень є відтворення графічної залежності між вимірними величинами або між вимірними та розрахованими величинами, що дозволяє зробити не тільки висновок щодо якісно виконаних вимірювань, а й визначити невідомі величини, наприклад, з рівняння відповідної залежності.

Перед побудовою графічної залежності, в першу чергу, необхідно задати величини, які відображаються на осі абсцис, а які на осі ординат. Прийнято незалежну змінну (час, температура, напруга, частота тощо) задавати на осі абсцис, в той час величину, яка є функцією незалежної змінної на осі ординат (швидість, тиск, сила струму, енергія тощо). В другу чергу, треба задати інтервал значень цих величин.

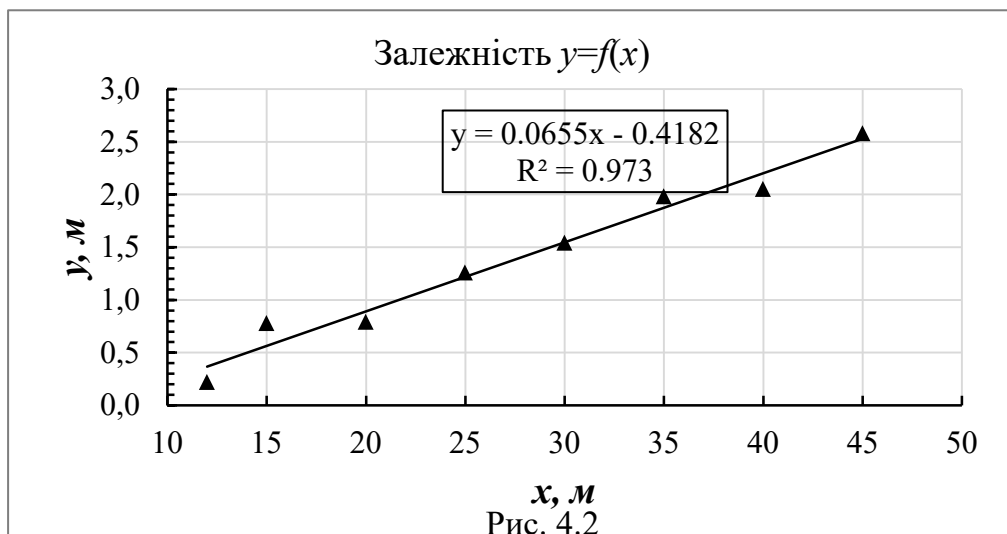
Є декілька вимог, які треба враховувати при обробці результатів вимірювань за допомогою графічних залежностей:

- 1) Масштаби для величин у графіку можуть бути не однаковими (рис. 4.1), а різними (рис. 4.2);

- 2) Значення величини на осі може починатися не тільки з нуля (рис. 4.1), а й будь-якого цілого значення (рис. 4.2);



- 3) Масштаби слід обирати таким чином, щоб крива, що відображає шукану залежність, розташовувалася поблизу бісектриси координатного кута та заповнювала б площину графіка на 80% (рис. 4.2);

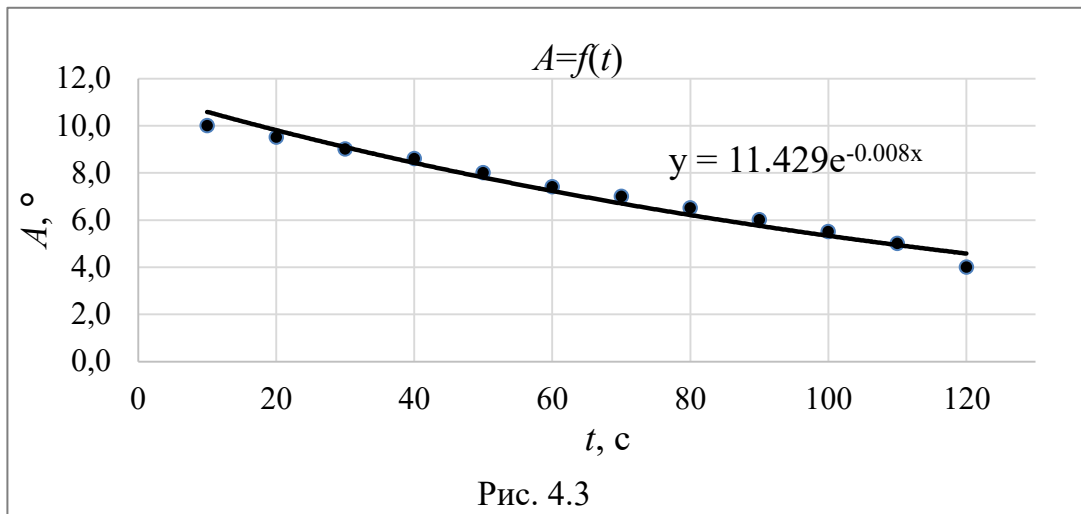


- 4) Графік не має бути ламаною лінією (рис. 4.1), оскільки це означало б, що при зміні однієї величини інша змінюється стрибкоподібно, відповідно це потребувало б пояснення (в реальних наукових дослідженнях так і робиться). Отже, треба провести (або задати у програмі Excel) *лінію тренда*, що відповідає прогнозованій математичній залежності між фізичними величинами. Наприклад, якщо залежність є пряпопропорційною, то лінія тренда має бути прямою лінією (рис. 4.2);

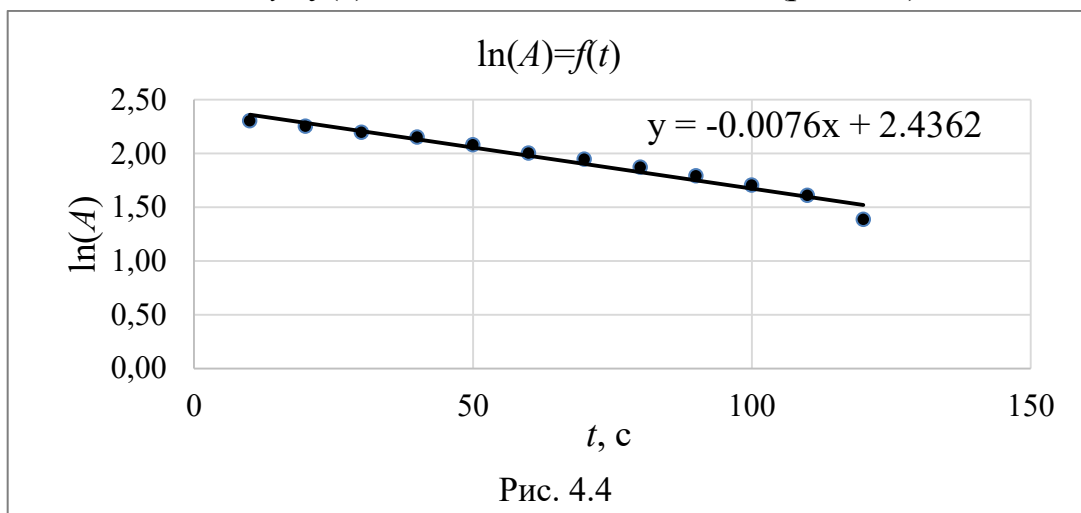
5) Вісі графіка мають бути підписані відповідними символами величин та одиницями виміру на вільному від експериментальних точок місці.

Зауважимо, що рисунок 4.1 відображає не коректне, не вірне оформлення графіку, а рисунок 4.2 – правильне.

У багатьох випадках результатами досліджень є залежності, які мають степеневу  $y = a + bx^2$  або експоненціальну  $y = a^{bx}$  функцію (рис. 4.3).



Для обробки результатів вимірювання та визначення деяких параметрів в цьому разі краще будувати залежність, що має дати пряму лінію, наприклад  $\ln y = f(x)$ . Якщо лінія буде прямою, то це є доказом того, що залежність  $y=f(x)$ . дійсно експоненціальна (рис. 4.3).



## 5. Похибки на графіках

Як було зазначено вище (п. 3) у наукових дослідженнях значну роль відіграють похибки вимірюваних та обчислених величин. Завершальним етапом оформлення графіків є відображення значень похибок експериментальних та розрахованих величин. Програма Excel дає можливість показати на графіку ці значення (рис. 4.5).

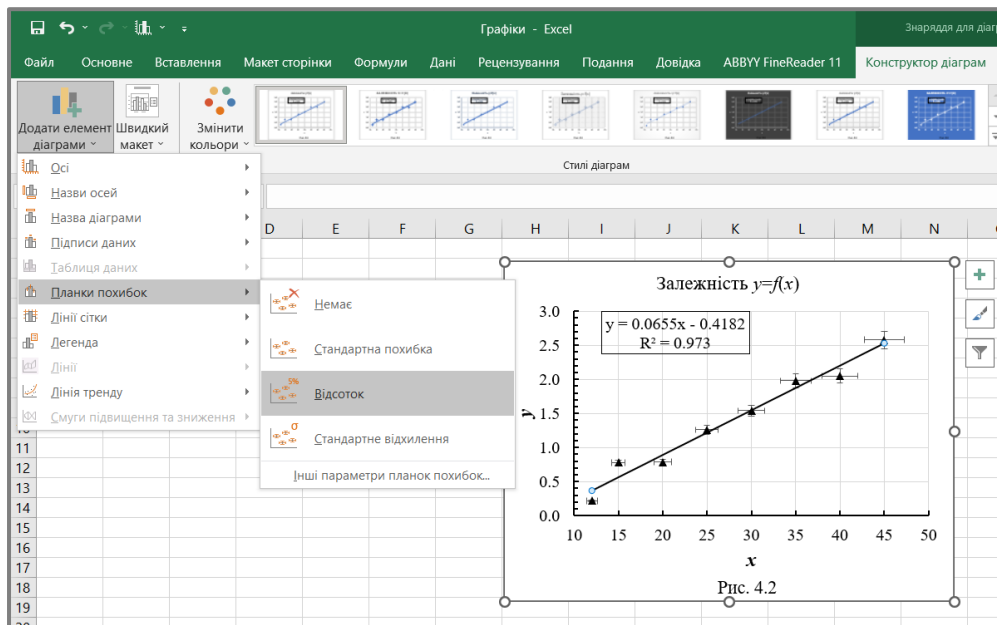


Рис. 4.5

Довжина горизонтальної риски задає інтервал можливих значень для даного виміру незалежної змінної, а вертикальна – відповідний інтервал для функції. Якщо навколо експериментальної точки побудувати прямокутник зі сторонами  $2\sigma_x$  та  $2\sigma_y$  (див. п. 3.1), то кожна точка площі цього прямокутника буде мати значення, яке з однаковою ймовірністю належить даній залежності.

Таким чином, спочатку на побудованому графіку відкладаються відповідні значення похибок для кожних точок, а після того проводиться лінія тренду, яка має не виходити за межі інтервалу похибок. У разі, якщо експериментальна точка лежить поза межами лінії тренду, це означає, що дане вимірювання є або промахом, або випадковою похибкою (див. п.3).

## 6. Правила наближених обчислень

**Наближені обчислення.** При заповненні таблиць результатів вимірювання та виконанні обчислень маємо притримуватись *точності* вимірювань (див. п.3). Не потрібно виконувати обчислення з великою точністю, якщо дані задачі не вимагають цього.

В ході виконання лабораторного експерименту числові значення величин, звісно, будуть *наближеними*. Крім того, значення констант, які використовуються при розрахунках також є наближеними, наприклад маса електрона  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг; відношення довжини кола до діаметра (число  $\pi$ )  $\pi = 3,14$ ; електрична стала  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м тощо. В той час, більш точні значення цих величин беремо з таблиць (див. Додаток).

Таким чином, при виконанні розрахунків маємо застосовувати *округлення* результату до відповідної кількості *знаків після коми*.

**Значущі цифри.** Наближене число характеризується кількістю значущих цифр. До значущих цифр відносять всі цифри крім нулів з лівого боку. Так, наприклад, числа 687; 901; 0,00853 мають по три значущі цифри.

Відомо, що число  $\beta$  має всі знаки вірні, якщо похибка не перевищує половини одиниці розряду останньої цифри наближеного числа. Наближені числа слід записувати так, щоб зберігалися лише вірні знаки. Якщо число  $\beta$  має  $N$  вірних значущих цифр, то його відносна похибка може бути знайдена за формулою:

$$\delta_\beta \leq \frac{1}{n \cdot 10^{N-1}},$$

де  $n$  – перша значуща цифра числа  $\beta$ .

**Округлення.** Процедура округлення чисел, як наближених, так і точних, полягає у тому, щоб прибирати одну або кілька кінцевих цифр. Для цього слід дотримуватися деяких правил.

*Перше правило.* Якщо перша з відокремлюваних цифр більша за число 5, то остання цифра збільшується на одиницю. Збільшення так само передбачається і тоді, коли перша із забраних цифр дорівнює 5, а за нею є одна або кілька значущих цифр.

*Друге правило.* У разі якщо перша з цифр, що прибирається менша за 5, то збільшення не робиться.

*Третє правило.* Якщо прибирається цифра 5, а за нею немає значущих цифр, то округлення виконується до найближчого парного числа, іншими словами, остання цифра залишається незмінною, якщо вона парна, і збільшується в разі, якщо вона непарна.

*Зауваження.* Оскільки розрахунки в даному фізичному практикумі виконуються у програмі в Excel, то студенти мають використати можливості цієї програми для виконання процедури округлення.

### **ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ СИСТЕМИ ВІД РОЗПОДІЛУ ЇЇ МАСИ ВІДНОСНО ОСІ ОБЕРТАННЯ**

---

#### **Мета роботи:**

- вивчити основний закон динаміки обертального руху;
  - встановити залежність моменту інерції системи від рівномірного розподілу її маси відносно осі обертання;
  - ознайомитись з методом екстраполяції.
- 

#### **Список обладнання:**

- установка (маятник Обербека);
  - секундомір;
  - штангенциркуль;
  - викрутка.
- 

#### **Долабораторна підготовка**

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: обертальний рух абсолютно твердого тіла; кутова швидкість та кутове прискорення, їхній зв'язок з лінійною швидкістю та лінійним прискоренням; момент сили; момент інерції та закон динаміки обертального руху абсолютно твердого тіла відносно нерухомої осі.

#### **Теоретичні основи**

У лабораторній роботі застосовують непрямий метод визначення моменту інерції системи, що ґрунтується на законі динаміки обертального руху.

$$\vec{\beta} = M/I \quad (1.1)$$

де  $\beta$  – кутове прискорення системи,  $M$  – момент сили,  $I$  – момент інерції.

Момент інерції абсолютно твердого тіла відносно нерухомої осі є скалярною фізичною величиною, яка дорівнює алгебраїчній сумі добутків мас  $m_i$  всіх його елементарних точок на квадрат їхніх найкоротших відстаней до осі обертання  $r_i$  та є величиною адитивною:

**Лабораторна робота 1. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ СИСТЕМИ ВІД РОЗПОДІЛУ ЇЇ МАСИ ВІДНОСНО ОСІ ОБЕРТАННЯ**

$$I = \sum_{i=1}^N I_i = \sum_{i=1}^N m_i r_i^2 \quad (1.2)$$

Роботу виконують на установці (рис. 1.1). На вантаж  $m$  діють сила тяжіння  $mg$  і сила натягу нитки  $F$ . Під дією цих сил вантаж рухатиметься зі сталим прискоренням. Обертання блока, якщо знехтувати тертям на осі, викликає момент сили  $F'$ , модуль якої, за третім законом Ньютона, дорівнює модулю сили  $F$ . Плечем сили буде радіус блока  $r$ , тому момент сили:

$$M = F'r = m(g - a) = I \cdot \beta; \quad a = \beta r; \quad h = a \frac{\tau^2}{2} \quad (1.3)$$

Для визначення сили  $F'=F$  записують динамічне рівняння руху вантажу  $m$ . Використовуючи зв'язок кутового прискорення  $\beta$  з лінійним прискоренням  $a$  та, виражаючи останнє через висоту  $h$  і час опускання вантажу  $\tau$ , з (1.1) відповідно до (1.3) можна одержати формулу для визначення моменту інерції системи тіл, що обертаються:

$$I = m \left( \frac{g\tau^2}{2h} - 1 \right) r^2 \quad (1.4)$$

Оскільки величина  $\frac{g\tau^2}{2h} \gg 1$  (у чому можна переконатися безпосередніми розрахунками), то формула (1.4) набуває простішого вигляду:

$$I \approx \frac{mgr^2}{2h} \cdot \langle \tau \rangle^2 \quad (1.5)$$

Момент інерції системи  $I$  складається з моменту інерції блока з хрестовиною  $I_0$  і моменту інерції  $I'$  тягарців  $m_1$ , закріплених на хрестовині. Якщо вважати тягарці точковими масами, у разі їхнього симетричного розташування відносно осі обертання можна записати:

$$I = I_0 + 4m_1 R^2 \quad (1.6)$$

де  $R$  – відстань тягарців від осі обертання.

З (1.6) випливає лінійна залежність між  $I$  та  $R^2$ . Визначивши момент інерції системи для різних значень  $R$ , можна побудувати графік

**Лабораторна робота 1. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ СИСТЕМИ ВІД РОЗПОДІЛУ ЇЇ МАСИ ВІДНОСНО ОСІ ОБЕРТАННЯ**

залежності  $I=f(R^2)$  та методом екстраполяції отримати значення моменту інерції блока з хрестовиною  $I_0$ .

Екстраполяція, екстраполювання (від лат. extra і polio – пригладжую, виправляю, змінюю) – особливий тип апроксимації, коли функція апроксимується поза заданим інтервалом, а не між заданими значеннями. Тобто екстраполяція – це наближене визначення значень функції  $f(x)$  в точках  $x$ , що лежать поза відрізком  $[x_0, x_n]$ , за її значенням в точках  $x_0 < x_1 < \dots < x_n$ .

Крім того, з рівняння залежності  $I=f(R^2)$  маємо можливість визначити масу вантажів  $m_1$ , які закріплені та хрестовині:

$$\text{grad} = 4 \cdot m_1,$$

де  $\text{grad}$  – це градієнт графіка  $I = I_0 + 4 \cdot m_1 R^2$ .

---

### Обладнання

Для виконання роботи використовують маятник Обербека (рис. 1.1), що складається з хрестовини, жорстко зв'язаної з блоком радіусом  $r$ . На хрестовині можуть закріплюватись на різних відстанях  $R$  від осі обертання чотири тягарці  $m_1$ . На блок намотується нитка, один кінець якої закріплений на блоці, а до іншого прив'язано вантаж масою  $m$ . Якщо даній системі тіл дати свободу, вантаж  $m$  почне опускатися, а блок з хрестовиною і тягарцями – обертається навколо нерухомої осі.

Для більш точного вимірювання часу опускання вантажу можна використати електронний секундомір, який фіксує тривалість руху системи.

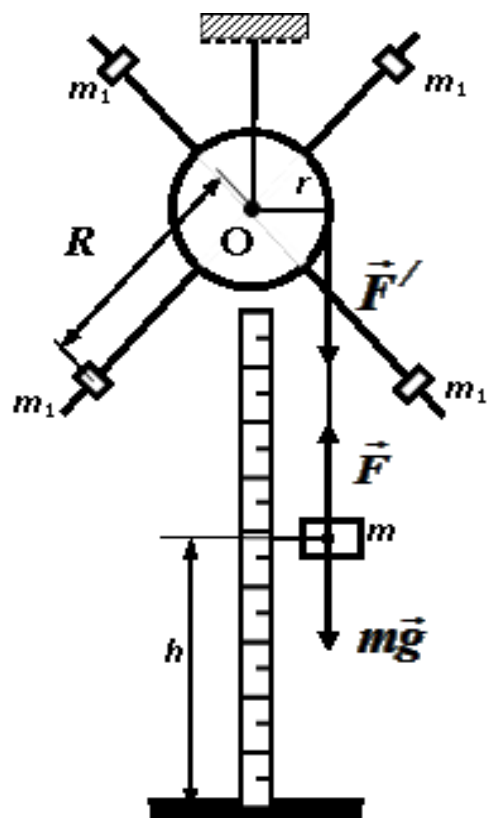


Рис. 1.1

### Експериментальна процедура

До початку виконання досліду підготувати таблиці 1.1 та 1.2 у програмі Excel.

1. Встановити тягарці  $m_1$  на максимальній і однаковій відстані  $R$  від осі обертання. Відстань  $R$  виміряти лінійкою або штангенциркулем.
2. Намотуючи нитку на блок, підтягнути вантаж  $m$  на висоту  $h$  і зупинити, зафіксувавши хрестовину.
3. Відпустити, не штовхаючи, хрестовину і виміряти час  $\tau$  опускання вантажу. Дослід для цього положення повторити тричі.
4. Виконати пп. 1-3 для кількох різних положень тягарців відносно осі обертання.
5. Визначити масу тягарця  $m$  та виміряти діаметр блока  $d$ .
6. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 1.1.

### Розрахунки

Всі розрахунки та побудову графіків виконувати у програмі Excel.

1. Розрахувати радіус блока  $r = d/2$ .
2. Знайти середнє значення часу опускання вантажу.
3. Розрахувати значення моменту інерції  $I$ , підставляючи у формулу (1.5) середнє значення часу.
4. Побудувати графік залежності  $I$  від  $R^2$  (приклад графіка 1.1) у програмі Excel, задати лінію тренда та рівняння прямої.
5. З рівняння прямої визначити  $I_0$ .
6. Визначити з рівняння графіку градієнт та обчислити масу вантажу  $m_1$ , який закріплений та хрестовині.
7. Визначити похибки вимірювання моменту інерції  $I$ .
8. Усі розрахунки виконувати у таблиці 1.2.
9. Подати звіт у вигляді таблиць та графіків у програмі Excel.

### Лабораторний звіт

Таблиця 1.1

Задані та виміряні величини

Номер досліду	$R$ , м	$m$ , кг	$d$ , м	$h$ , м	$\tau$ , с

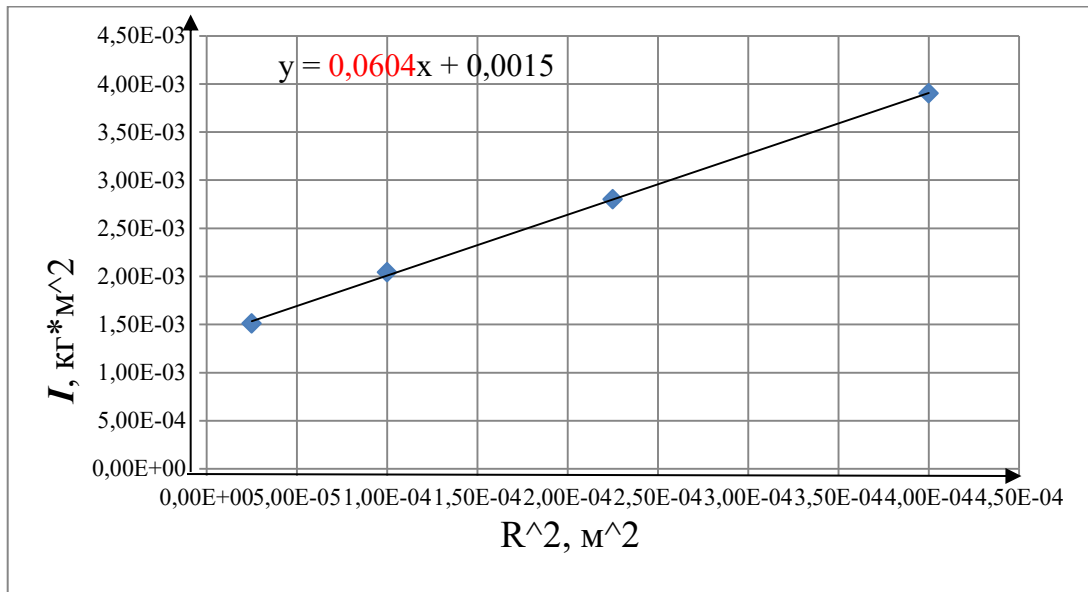
Таблиця 1.2

Розрахунки шуканих величин

Номер досліду	$r$ , м	$\langle \tau \rangle$ , с	$I$ , кг·м <sup>2</sup>	$R^2$ , м <sup>2</sup>	$I_0$ , кг·м <sup>2</sup>	$m_1$ , кг

**Лабораторна робота 1. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ СИСТЕМИ ВІД РОЗПОДІЛУ ЇЇ МАСИ ВІДНОСНО ОСІ ОБЕРТАННЯ**

Приклад графіка 1.1



**Контрольні запитання**

1. Дайте визначення механічного руху; поступального і обертального рухів.
2. Яке тіло називають абсолютно твердим?
3. Дайте визначення таким фізичним величинам: кутова швидкість, кутове прискорення. Як обирають напрям цих векторів?
4. Запишіть формули зв'язку між лінійними та кутовими величинами під час руху по колу.
5. Дайте визначення нормального і тангенціального прискорень.
6. Сформулюйте закони Ньютона.
7. Запишіть основний закон динаміки обертального руху.
8. Дайте визначення моменту сили відносно нерухомої точки  $O$ . Як визначається напрям цього моменту сили?
9. Дайте визначення моменту сили відносно нерухомої осі  $Oz$ .
10. Що називають моментом інерції точки (тіла або системи точок) відносно осі обертання?
11. Виведіть робочу формулу для розрахунку моменту інерції (1.5).
12. Сформулюйте теорему Штейнера.

### **ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ СТОКСА**

---

#### **Мета роботи:**

- ознайомитись із суттю явища внутрішнього тертя в газах та рідинах;
  - експериментально визначити коефіцієнт динамічної в'язкості певної рідини.
- 

#### **Список обладнання:**

- колба з рідиною;
  - мікромметр або штангенциркуль;
  - свинцеві кульки;
  - секундомір;
  - лінійка.
- 

#### **Долабораторна підготовка**

*Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал:* явища переносу; внутрішнє тертя; рух тіл у рідинах та газах.

#### **Теоретичні основи**

*В'язкість (внутрішнє тертя) – це властивість реальних рідин та газів чинити опір переміщенню однієї частини рідини (газу) відносно іншої. Під час переміщення одних шарів реальної рідини (газу) відносно інших (рис. 2.1) виникають сили внутрішнього тертя, спрямовані вздовж дотичної до поверхні цих шарів. Так само, як і дифузія та теплопровідність в'язкість відносять до явищ переносу, які детально вивчаються в молекулярній фізиці.*

За фізичною суттю в'язкість зумовлена *переносом імпульсу*  $m\vec{v}$  напрямленого руху від одного шару рідини до іншого. У газах це явище зумовлене тільки обміном молекул на межі двох шарів (тобто власне дифузією), в той час як в рідинах до подібного механізму обміну імпульсом додається ще й обмін імпульсом унаслідок безпосередньої

взаємодії молекул на межі двох сусідніх шарів. Відмінність процесів переносу в рідинах та газах відображається у різній залежності в'язкого тертя від температури. У газах унаслідок підвищення температури в'язкість завжди зростає, а в рідинах вона найчастіше спочатку спадає, як і поверхневий натяг (зменшується міжмолекулярна взаємодія), а потім зростає внаслідок дифузійного процесу.

Сила внутрішнього тертя описується законом Ньютона для в'язких рідин, який має вигляд:

$$F = \eta \frac{dv}{dy} S,$$

де  $F$  – сила внутрішнього тертя;  $dv/dy$  – градієнт швидкості, який показує зміну величини напрямленої швидкості потоку на одиницю довжини під час переходу від шару до шару у напрямку осі  $Oy$ , перпендикулярному до напрямку руху рідини (газу) (рис. 1.2);  $S$  – площа поверхні шарів;  $\eta$  – коефіцієнт пропорційності, який має назву динамічної в'язкості рідини (газу) та залежить від природи рідини (газу) та температури.

На підставі рівняння Ньютона може бути визначена динамічна в'язкість рідини (газу):

$$\eta = \frac{F}{\left| \frac{dv}{dy} \right| \cdot S}.$$

Динамічна в'язкість  $\eta$  чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя, яка діє на одиницю площі паралельно до шарів за градієнта швидкості, що дорівнює одиниці. Одиниця вимірювання в'язкості в СІ – [1 Па·с].

Через те, що пряме визначення градієнта швидкості викликає певні труднощі, в даній роботі використовується метод Стокса. Цей метод полягає у вимірюванні швидкості невеликих тіл сферичної форми, які повільно та рівномірно рухаються у рідині або газі.

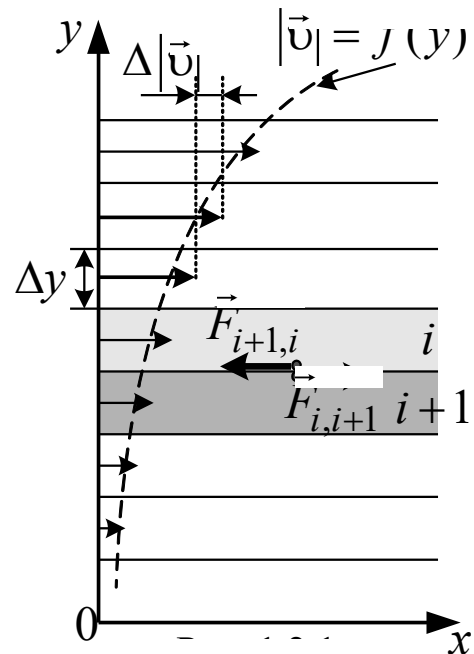


Рис.1.2

На тіло, що падає в рідині (металеву кульку), діють:

$$\left. \begin{array}{l} \text{сила тяжіння} \\ \text{сила Архімеда} \\ \text{сила опору Стокса} \end{array} \right\} \begin{cases} mg = 4/3 \cdot \pi r^3 \rho g; \\ F_A = 4/3 \cdot \pi r^3 \rho_p g; \\ F_C = 6\pi\eta r v. \end{cases} \quad (2.1)$$

Вираз для сили опору був виведений англійським фізиком і математиком Стоксом для рівномірного руху кульки в необмеженій рідині за малих значень критерію Рейнольдса  $Re < 1$  (рис. 1.2). Тобто обтікання кульки рідиною відбувається за умов ламінарної течії.

Сила Стокса  $F_C = 6\pi\eta r v$  виникає тому, що під час руху кульки в рідині відбувається тертя між окремими шарами рідини. Зокрема, найближчий до поверхні кульки шар рідини матиме швидкість кульки, бо рідина немовби налипає на неї. Решта шарів матимуть тим меншу швидкість, чим далі від кульки вони знаходяться.

Унаслідок зростання швидкості падіння кульки сила опору також зростатиме (див. формулу сили Стокса). Нарешті настане такий момент, коли сила  $m\vec{g}$  зрівноважиться силами  $F_C$  та  $F_A$ , після чого кулька почне рухатись рівномірно:

$$mg - F_A - F_C = 0 \quad \Rightarrow \quad mg = F_A + F_C. \quad (2.2)$$

З системи рівнянь (2.1) та рівняння (2.2) можна одержати робочу формулу:

$$\eta = \frac{g(\rho - \rho_p)}{18\langle L \rangle} \cdot \langle d \rangle^2 \cdot \tau, \quad (2.3)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\rho$  – густина матеріалу, з якого виготовлено кульку;  $\rho_p$  – густина досліджуваної рідини;  $L$  – шлях, що проходить кулька за час  $\tau$ ;  $d$  – діаметр кульки.

Коефіцієнт динамічної в'язкості  $\eta$  рідини з густиною  $\rho_p$  пов'язаний з коефіцієнтом кінематичної в'язкості  $\nu$  співвідношенням:

$$\nu = \eta / \rho_p. \quad (2.4)$$

У технології багатьох виробництв (наприклад, у процесі формування будівельних матеріалів чи при виготовленні будівельних розчинів) коефіцієнт в'язкості – важлива технологічна характеристика, тому є багато способів його визначення (наприклад, віскозиметрія).

### Обладнання

Найпростіший прилад для визначення коефіцієнта динамічної в'язкості зображено на рис. 2.2.

Він складається зі скляного циліндра, заповненого досліджуваною рідиною. На бічній поверхні циліндра відзначають дві позначки  $m$  та  $n$ , розміщені на відстані  $L$  одна від одної. Позначка  $m$  знаходиться трохи нижче від поверхні рідини, тоді як позначка  $n$  має бути вище за дно циліндра.

Їхнє положення обирається так, щоб рух кульки між позначками можна було вважати рівномірним.

Для вимірювання діаметра кульки використовується мікрометр або штангенциркуль. Для вимірювання часу падіння кульки застосовується електронний секундомір або інший вимірювальний засіб. Для вимірювання часу має бути використаний один й той самий прилад.

Значення густини рідини та матеріалу кульки подані на установці.

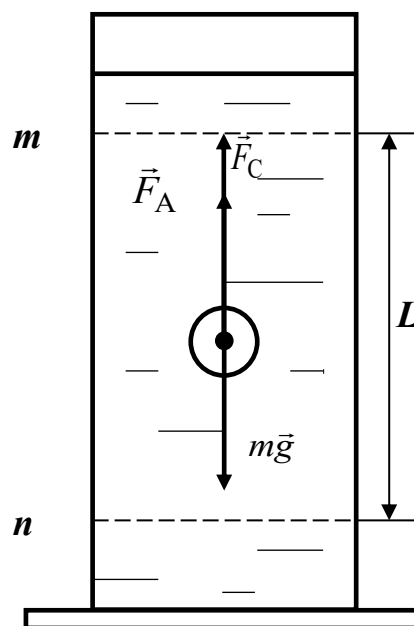


Рис. 2.2

### Експериментальна процедура

До початку виконання досліду підготувати таблиці 2.1 та 2.2 у програмі Excel.

1. Вибрати на бічній поверхні циліндра дві позначки  $m$  та  $n$ .
2. За допомогою масштабної лінійки тричі виміряти відстань  $L$  між позначками  $m$  та  $n$ .
3. За допомогою мікрометра тричі виміряти діаметр  $d$  кульки (після кожного виміру кульку слід виймати з мікрометра та вкладати в іншому положенні).
4. Розмістити кульку на незначній висоті над поверхнею рідини у центральній частині циліндричної посудини і, відпустивши її, виміряти час  $\tau$ , за який вона пройде відстань між позначками  $m$  та  $n$ .
5. Виконати п. 3 – 4 ще для двох кульок.

## Лабораторна робота 2. ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ МЕТОДОМ СТОКСА

- Визначити значення густини матеріалу, з якого виготовлено кульку та густини досліджуваної рідини.
- Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 2.1.

### Розрахунки

Всі розрахунки та побудову графіків виконувати у програмі Excel.

- Розрахувати середнє значення відстані  $\langle L \rangle$ .
- Розрахувати середні значення діаметрів  $\langle d \rangle$ .
- За формулою (2.3) розрахувати коефіцієнт динамічної в'язкості рідини.
- Знайти середнє значення коефіцієнта динамічної в'язкості рідини  $\eta_{\text{сер}}$ .
- Розрахувати кінематичну в'язкість досліджуваної рідини за формулою (2.4).
- Визначити похибки вимірювання коефіцієнта динамічної в'язкості рідини  $\eta$ .
- Усі розрахунки виконувати у таблиці 2.2.
- Подати звіт у вигляді таблиць та графіків у програмі Excel.

### Лабораторний звіт

Таблиця 2.1

Задані та виміряні величини

$L, \text{ м}$	Дослід з 1-ю кулькою		Дослід з 2-ю кулькою		Дослід з 3-ю кулькою		Густина свинцю, $\text{кг/м}^3$	Густина рідини, $\text{кг/м}^3$
	$d, \text{ м}$	$\tau, \text{ с}$	$d, \text{ м}$	$\tau, \text{ с}$	$d, \text{ м}$	$\tau, \text{ с}$		

Таблиця 2.2

Розрахунки шуканих величин

$\langle L \rangle, \text{ м}$	$\langle d \rangle, \text{ м}$	$\eta, \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\eta_{\text{сер}}, \text{ Па}\cdot\text{с}$	$\nu_{\text{сер}}, \text{ м}^2/\text{с}$

**Контрольні запитання**

1. Які явища переносу вам відомі?
2. Дайте визначення в'язкості (внутрішнього тертя).
3. Поясніть фізику виникнення внутрішнього тертя.
4. Запишіть закон Ньютона для сили внутрішнього тертя.
5. Дайте визначення коефіцієнта динамічної в'язкості. Яку розмірність він має?
6. Дайте визначення коефіцієнта кінематичної в'язкості. Який зв'язок між коефіцієнтами кінематичної і динамічної в'язкості?
7. Що називають градієнтом швидкості?
8. Дайте визначення ламінарної і турбулентної течії.
9. Що визначає критерій Рейнольдса?
10. У чому полягає метод Стокса?
11. Виведіть робочу формулу для визначення динамічної в'язкості.

### **ВИМІРЮВАННЯ ПРУЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ**

---

#### **Мета роботи:**

- вивчити закономірності пружної деформації твердих тіл;
  - визначити залежність деформації сталюого дроту від діючої сили та обчислити модуль Юнга.
- 

#### **Список обладнання:**

- стадевий дріт;
  - мікрометр;
  - набір тягарців;
  - лінійка;
  - індикатор.
- 

#### **Долабораторна підготовка**

*Для виконання роботи потрібно вивчити наступний матеріал:* пружні сили, закон Гука; потенціальна енергія системи; консервативні сили; енергія пружної деформації.

#### **Теоретичні основи**

Під дією прикладених сил будь-яке тверде тіло деформується, тобто змінює свої розміри та форму. Якщо після припинення дії сили тіло приймає початкові розміри, то деформацію називають пружною (в іншому випадку – пластичною). Одне й те саме тверде тіло може при короткочасній дії сили вести себе як крихке, а при досить тривалій, але слабкій дії, буде пластичним.

Пружні деформації спостерігаються тоді, коли сила (а точніше, сила, віднесена до одиниці площі, тобто напруга), що зумовлює деформацію, не перевищує деяку, визначену для кожного тіла межу – межу пружності. Деякі речовини (метали, каучук) можуть зазнавати значної пружної деформації, в той час як в інших випадках (кераміка,

пресовані матеріали) навіть незначна деформація перестає бути пружною.

Пластичною називається деформація, яка не зникає (принаймні повністю) після припинення дії навантаження, а отже форма твердого тіла не відновлюється (таку деформацію називають необоротною). Пластичні деформації є основою технологічних процесів обробки матеріалів, що об'єднані назвою «обробка металів тиском», або холодна обробка металів. До таких процесів належать: прокатування (прокатне виробництво), пресування, штампування і кування (ковальсько-штампувальне виробництво) тощо.

Деформації реального тіла завжди є пластичними, але якщо величина залишкової деформації є дуже малою, то нею можна знехтувати та розглядати випадок пружної деформації, що ми і будемо надалі робити.

Для встановлення робочої формули даної роботи розглянемо стрижень, який піддається деформації розтягу (рис. 3.1).

Під дією сили  $F$  стрижень з початковою довжиною  $l_0$  та площею поперечного перерізу  $S$  розтягується на величину абсолютного видовження  $\Delta l = l - l_0$ .

Як величину, що характеризує деформацію стрижня, беруть відносну зміну її довжини  $\Delta l / l$ . Для стрижня із сталі відносне видовження при пружній деформації є пропорційним силі, що припадає на одиницю площі поперечного перерізу стрижня, тобто напрузі розтягу. При малих деформаціях  $\Delta l$  можна знехтувати зміною  $S$  при деформації (рис. 3.1).

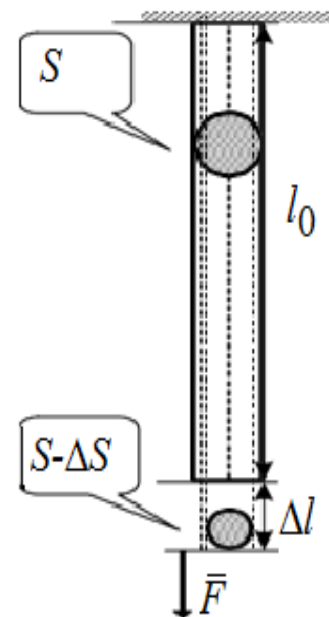


Рис. 3.1

Тоді:

$$\frac{\Delta l}{l_0} \propto \frac{F}{S}$$

Закон Гука, що виражає таку залежність, має вигляд:

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (3.1)$$

де  $E$  – модуль пружності, або модуль Юнга.

Отже, виходячи з (3.1) можна записати:

$$E = \frac{F}{\left| \Delta l / l_0 \right| \cdot S} \quad (3.2)$$

Модуль Юнга характеризує пружні властивості матеріалу і, як видно з формули 3.2 чисельно дорівнює силі, яку теоретично треба прикласти до стрижня, щоб збільшити його довжину вдвічі. Одиницею вимірювання модуля Юнга є  $[1 \text{ Н/м}^2] = [1 \text{ Па}]$ . Співвідношення 3.1 справджується не лише для сил розтягу, але і для сил стиску.

В розглянутому вище випадку сила спрямована перпендикулярно до поверхні, і *напруга* називається *нормальною*. Якщо сила спрямована вздовж дотичної до поверхні, на яку вона діє, *напруга* називають *тангенціальною*.

Модуль Юнга визначає механічні властивості однорідного твердого тіла у випадку пружних деформацій, зокрема швидкість поширення повздовжніх () звукових хвиль  $v = \sqrt{E/\rho}$ , де  $\rho$  – густина речовини.

---

## Обладнання

Для визначення модуля Юнга в даній роботі необхідно знати довжину дроту, площу поперечного перерізу та виміряти видовження під дією відомої сили. Найбільші труднощі виникають при вимірюванні видовження, оскільки ця величина є дуже малою. Всі інші величини вимірюють звичайним способом: довжину – за допомогою лінійки, діаметр – за допомогою мікрометра.

Для виконання лабораторної роботи використовують установку, показану на рис. 3.2.

Установка складається із досліджуваного сталюого дроту *A*, верхній кінець якого нерухомо закріплено в стінному кронштейні *K*, а до нижнього кінця дроту прикріплено платформу *C*, на яку можна накладати набір каліброваних тягарців *P*.

Тягарці, необхідні для розтягування дроту *A*, беруть з спеціального підвісу *D*, закріпленого на тому ж кронштейні *K*. При розвантаженні дроту тягарці слід розмістити назад на підвіс, адже саме цим досягається постійність навантаження підвісу.

Лінійка  $L$ , встановлена вертикально поблизу дроту  $A$ , використовується для вимірювання початкової довжини дроту від місця його вертикального закріплення до нижньої мітки  $B$  на дроті.

Прецизійне вимірювання видовження дроту забезпечується за допомогою індикатора переміщення годинникового типу  $R$ , ціна поділки якого рівна 0,01 мм.

Для вимірювання видовження дроту при покроковому його навантаженні тягарцями щоразу після навантаження фіксують покази індикатора годинникового типу  $R$ .

Сила, що розтягує дріт з боку тягарців є силою тяжіння, тобто  $F = mg$ , де  $m$  – сумарна маса усіх тягарців, що розтягують дріт,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння.

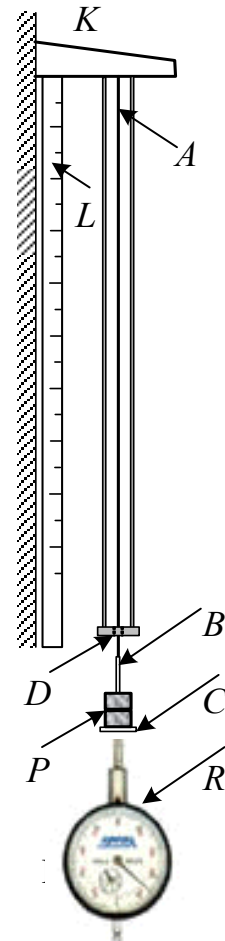
Нарешті, виразивши площу поперечного перерізу  $S$  через діаметр дроту  $d$ , з формули (3.2) отримаємо робочу формулу у вигляді:

$$E = \frac{4l_0mg}{\Delta l \pi d^2},$$

або

$$E = \frac{4l_0g}{(\Delta l/m)\pi d^2}. \quad (3.3)$$

Ця формула є справедливою за умови, що деформація, якої зазнає дріт, залишається в межах її пружності. Рис. 3.2



### Експериментальна процедура

До початку виконання дослідження підготувати таблиці 3.1 та 3.2 у програмі Excel.

1. Ознайомитися із лабораторною установкою (рис. 3.2).
2. Виміряти за допомогою мікрометра діаметр дроту  $d$  та за допомогою лінійки довжину дроту  $l_0$  до позначки  $B$  на ньому.
3. Записати видовження  $\Delta l$  дроту за показниками індикатора переміщення годинникового типу  $R$  до навантаження (тобто без тягарців на платформі  $C$ ).

### Лабораторна робота 3. ВИМІРЮВАННЯ ПРУЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ

4. Покласти на платформу  $C$  перший тягарець із набору тягарців  $P$  та записати його масу  $m$  і показники індикатора переміщення годинникового типу  $R$ .
5. Поступово додати решту тягарців, виконуючи п.4 для кожного з них.
6. Визначити значення модуля Юнга для сталі з табличних даних.
7. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 3.1.

---

#### Розрахунки

*Всі розрахунки та побудову графіків виконувати у програмі Excel.*

1. Побудувати графік залежності видовження дроту від маси тягарців  $m$ , задати лінію тренда та визначити тангенс кута нахилу цієї залежності, тобто знайти відношення  $\Delta l/m$  (приклад графіка 3.1).
2. Розрахувати величину модуля Юнга  $E$  за результатами досліду, використовуючи для цього формулу (3.3).
3. Розрахунки занести до таблиці 3.2.
4. Порівняти отримане значення модуля Юнга  $E$  з табличним його значенням для цього ж матеріалу.
5. Визначити похибки вимірювання модуля Юнга  $E$ .
6. Усі розрахунки виконувати у таблиці 3.2.
7. Подати звіт у вигляді таблиць та графіків у програмі Excel.

---

#### Лабораторний звіт

*Таблиця 3.1*

*Задані та виміряні величини*

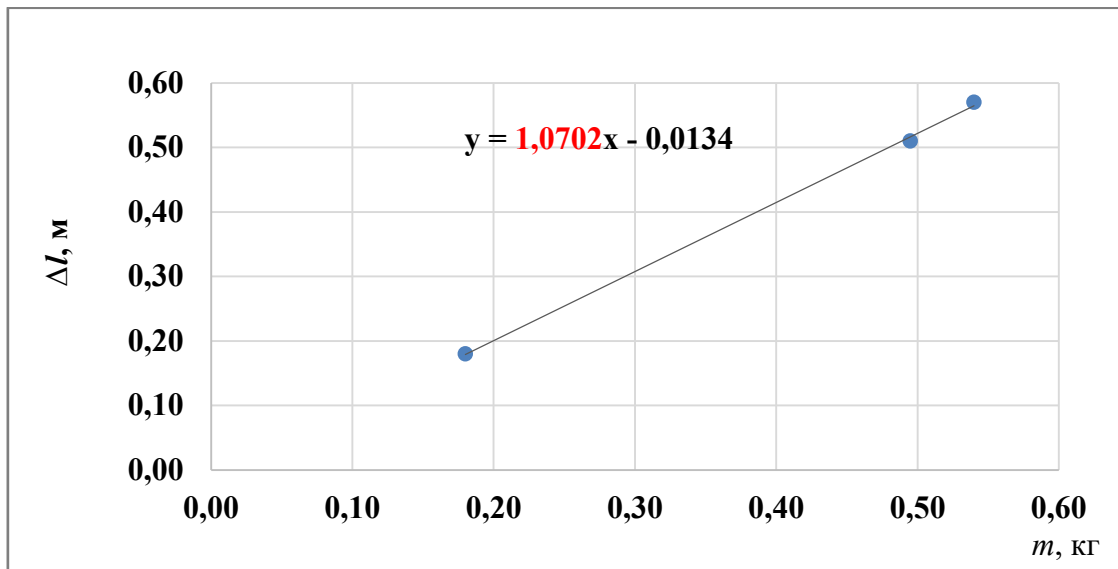
Номер досліду	$d$ , м	$l_0$ , м	$m$ , кг	$\Delta l$ , м	$E_{\text{табл}} \cdot 10^9$ , Па
					200-220

*Таблиця 3.2*

*Розрахунки шуканих величин*

$\Delta l/m$ , м/кг	$E \cdot 10^9$ , Па

Приклад графіка 3.1



### Контрольні запитання

1. Що називають деформацією твердого тіла?
2. Якою є залежність між видовженням тіла та прикладеним зусиллям?
3. Охарактеризуйте основні види деформації.
4. Що таке залишкова деформація?
5. Що таке відносна деформація?
6. Що таке межа пружності?
7. Сформулюйте та запишіть закон Гука.
8. Які умови застосовності закону Гука?
9. Сформулюйте фізичний зміст модуля Юнга. Якою є розмірність модуля Юнга?
10. Що таке деформація зсуву?
11. Виведіть робочу формулу для розрахунку модуля Юнга (3.3).
12. Які ще методи вимірювання модуля Юнга вам відомі?

### **ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ**

---

#### **Мета роботи:**

- дослідити явище теплопровідності;
  - визначити коефіцієнт теплопровідності ебоніту.
- 

#### **Список обладнання:**

- ебонітовий циліндр;
  - ємність з водою;
  - нагрівник;
  - термометр;
  - секундомір;
  - штангенциркуль.
- 

#### **Долабораторна підготовка**

*Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: явища переносу; теплопровідність, рівняння Фур'є.*

#### **Теоретичні основи**

У термодинамічних нерівноважних системах виникають *необоротні процеси*, що називаються явищами переносу та внаслідок яких відбувається просторовий перенос енергії (теплопровідність), маси (дифузія) і кількості руху (внутрішнє тертя, або в'язкість).

Для цих процесів характерним є те, що перенос енергії, маси та кількості руху завжди відбувається в напрямку, оберненому градієнту їхнього просторового розподілу, тобто система наближається до термодинамічної рівноваги.

Щоб експериментально визначити коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$ , можна використати процес переносу теплоти в твердому тілі, оскільки закономірності такого процесу завжди пов'язані з коефіцієнтом теплопровідності.

#### Лабораторна робота 4. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ

Коефіцієнт теплопровідності можна визначити з основного рівняння, яке описує процес теплопровідності – рівняння Фур'є:

$$\Delta Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \Delta S \Delta \tau,$$

де  $\Delta Q$  – кількість теплоти, що переноситься вздовж осі  $x$  крізь елемент площі  $\Delta S$  за час  $\Delta \tau$  при градієнті температури  $\frac{\partial T}{\partial x}$ .

З рівняння Фур'є можна отримати:

$$\lambda = \left| \frac{\Delta Q}{\frac{\partial T}{\partial x} \cdot \Delta S \Delta \tau} \right|.$$

Отже, коефіцієнт теплопровідності чисельно дорівнює кількості теплоти, що переноситься через одиницю площі поперечного перерізу тіла за одиницю часу за градієнта температури, який дорівнює одиниці.

Практичне вимірювання величин, які входять в наведене рівняння Фур'є, пов'язане з певними труднощами, тому краще розглядати процеси, в яких можна легко і точно виміряти всі величини, що входять до розрахункової формули для визначення  $\lambda$ .

Один з таких процесів – *регулярний режим нагрівання*.

Нехай, нагріте до деякої температури  $T$  тіло поміщене в середовище, яке добре проводить тепло (наприклад, вода). Температура цього середовища підтримується сталою і дорівнює  $T_0$ . Унаслідок теплопровідності різниця температур тіла та середовища  $T - T_0 = \Delta T$  постійно зменшуватиметься і в момент встановлення рівноваги дорівнюватиме нулю.

Закон цього зменшення, тобто функція  $\Delta T = f(\tau)$ , залежить від розмірів та форми тіла, його теплофізичних властивостей, а також від того, як було нагріте тіло (рівномірно чи ні) перед початком досліду. У початковій стадії теплообміну цей закон є досить складним.

Поступово настає так званий регулярний режим нагрівання (чи охолодження), за якого різниця температур між будь-якою точкою зразка та навколишнім середовищем залежить від часу за законом:

$$\Delta T(x, \tau) = A(x)e^{-a\tau}. \quad (4.1)$$

Величина  $a$  у формулі (4.1) називається *темпом нагрівання* (чи охолодження) і пов'язана з властивостями тіла:

$$a = \frac{\lambda}{k \rho}, \quad (4.2)$$

де  $k$  – коефіцієнт форми, що залежить від форми та розмірів тіла;  $c$  – питома теплоємність речовини;  $\rho$  – густина речовини.

Для тіла циліндричної форми:

$$k = \frac{1}{\frac{5,78}{R^2} + \frac{9,87}{h^2}}, \quad (4.3)$$

Де  $R, h$  – відповідно радіус і висота циліндра.

Таким чином, визначення коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  циліндричного зразка з відомими густиною речовини  $\rho$  та питомою теплоємністю  $C$  зводиться до визначення темпу нагрівання  $a$ . З цією метою вимірюють різницю температур між зразком і зовнішнім середовищем у різні моменти часу.

Згідно з рівнянням (4.1):

$$\ln \Delta T = \ln A = a\tau. \quad (4.4)$$

Залежність  $\ln \Delta T = f(\tau)$ , після настання регулярного режиму на графіку має вигляд прямої з *градієнтом*, що і є темпом нагрівання  $a$ .

Після визначення темпу нагрівання можна знайти коефіцієнт теплопровідності ебоніту:

$$\lambda = k \cdot a \cdot c \cdot \rho. \quad (4.5)$$

---

## Обладнання

Загальний вигляд експериментальної установки для визначення коефіцієнта теплопровідності ебоніту показано на рисунку 4.1. Основними складовими елементами установки є: штатив (Ш), на якому закріплений термометр (Т) з ебонітовим циліндром (Е); ємність з водою (В) та нагрівник (Н). За допомогою гвинта (Г) циліндр занурюється у ємність з водою (В).

За середовище, в якому нагрівається циліндр, доцільно взяти воду, яка кипить, оскільки, по-перше, в такому випадку забезпечується достатній теплообмін поверхні зразка з водою внаслідок перемішування, по-друге, температура води, що кипить, відома та не змінюється протягом часу нагрівання зразка.

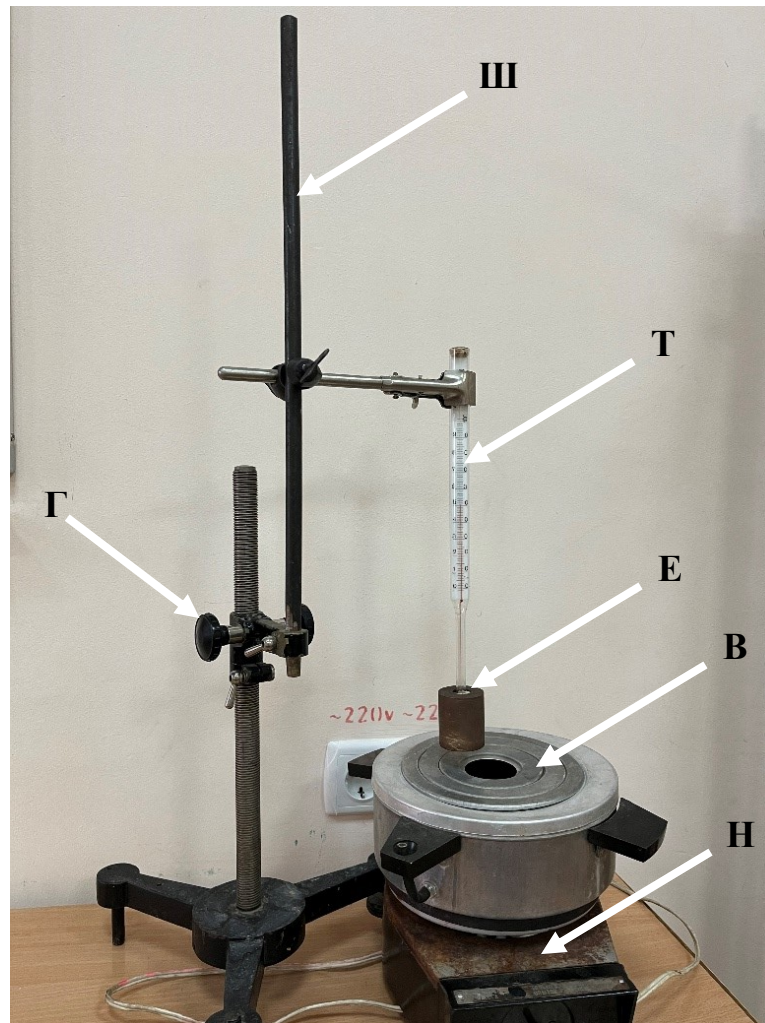


Рис. 4.1

---

### Експериментальна процедура

*До початку виконання дослідів підготувати таблиці 4.1 та 4.2 у програмі Excel.*

1. Ознайомитися з установкою.
2. Виміряти штангенциркулем висоту  $h$  та діаметр  $d$  ебонітового циліндра.
3. Увімкнути нагрівник та довести воду у посудині до кипіння. Підтримувати температуру води сталою протягом усього дослідів.
4. Занурити циліндр у воду.
5. Протягом 15-20 хв через кожні 60 с визначати значення температури зразка  $t$  °С.
6. Визначити питому теплоємність  $c$  та густину ебоніту  $\rho$ .
7. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 4.1.

## Розрахунки

Всі розрахунки та побудову графіків виконувати у програмі Excel.

1. Розрахувати різницю між температурою зразка та температурою киплячої води  $\Delta t = t_0 - t$ , температуру води вважати  $t_0 = 100$  °С.
2. Розрахувати натуральний логарифм  $\ln \Delta t$ .
3. Побудувати графік залежності  $\ln \Delta t = f(\tau)$  в програмі Excel (приклад графіка 4.1).
4. Вибрати на графіку (приклад 4.1) прямолінійну ділянку (проміжок регулярного режиму), побудувати на цій ділянці лінію тренда, показати рівняння цієї лінії та визначити градієнт (температура нагрівання  $a$ ).
5. У програмі Excel обчислити радіус циліндра  $R$  та коефіцієнт форми  $k$  за формулою (4.3).
6. Розрахувати в програмі Excel коефіцієнт теплопровідності ебоніту  $\lambda$  за формулою (4.5).
7. Визначити похибки вимірювання коефіцієнта теплопровідності ебоніту  $\lambda$ .
8. Усі розрахунки виконувати у таблиці 4.2.
9. Подати звіт у вигляді таблиць та графіків у програмі Excel.

## Лабораторний звіт

Таблиця 4.1

Задані та виміряні величини

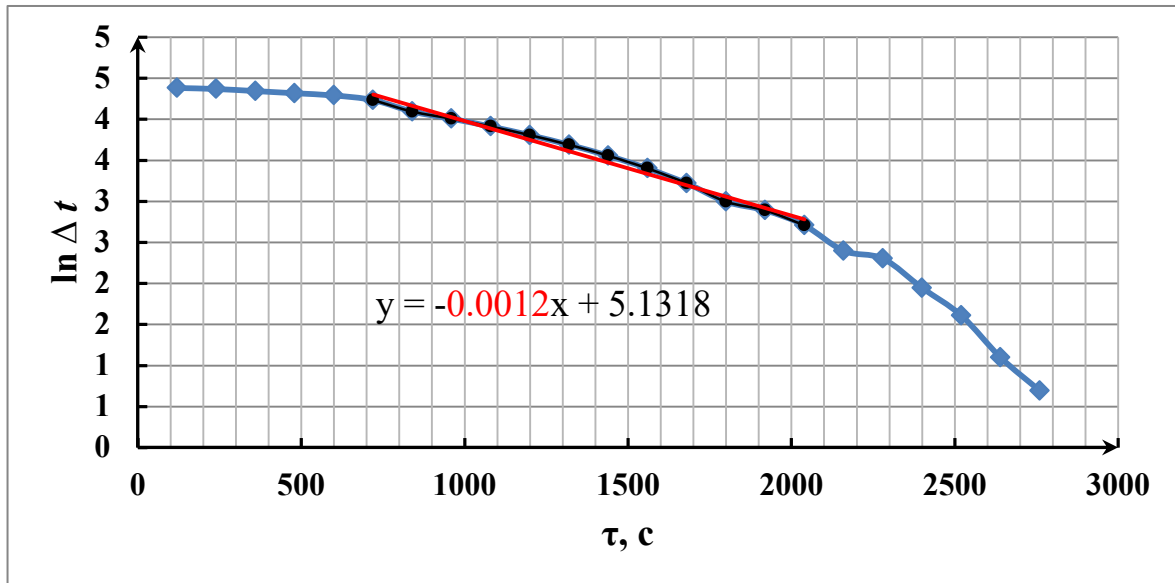
$\tau, c$	$t$ °С	$h, m$	$d, m$	$c, Дж/(кг \cdot К)$	$\rho, кг/м^3$

Таблиця 4.2

Розрахунки шуканих величин

$\Delta t$ °С	$\ln \Delta t$	$a, 1/c$	$R, m$	$k, м^2$	$\lambda, Вт/(м \cdot К)$

Приклад графіка 4.1



**Контрольні запитання**

1. Які явища переносу вам відомі?
2. Дайте означення явища теплопровідності.
3. Запишіть закон Фур'є для явища теплопровідності.
4. Дайте означення коефіцієнта теплопровідності.
5. Поясніть, що таке градієнт температури.
6. Яке практичне значення має коефіцієнт теплопровідності у будівельній галузі?

## ***ВИЗНАЧЕННЯ АБСОЛЮТНОЇ ТА ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ***

---

### **Мета роботи:**

- вивчити особливості вологого повітря;
  - визначити абсолютну та відносну вологість повітря.
- 

### **Список обладнання**

- барометр;
  - психрометр;
  - піпетка;
  - колба з водою;
  - секундомір.
- 

### **Долабораторна підготовка**

*Для виконання лабораторної роботи необхідно засвоїти такий теоретичний матеріал:* реальні гази; фази та фазові переходи; насичена та ненасичена пара; особливості розподілу вологи в повітрі; характеристики вологого повітря.

### **Теоретичні основи**

Відомо, що атмосферне повітря – це суміш газів, яка містить 78% азоту, 21% кисню і невелику кількість  $\text{CO}_2$ , водяної пари та інших газів. Вміст водяної пари в атмосфері характеризують вологістю. На практиці важливо вміти визначати кількість водяної пари в повітрі за певної температури. Вимірювання вологості й підтримання певного її рівня потрібні на багатьох підприємствах (промислових, ткацьких, кондитерських), у різних сховищах (бібліотеках, музеях, архівах), лікарнях та житлових приміщеннях. Метеорологи за зміною вологості визначають зміни погоди. Узагалі, вологість повітря істотно впливає на розвиток флори й фауни на Землі, на життя людини і визначає комфортність приміщень.

Для практичних цілей розглядають вологе повітря при атмосферному або близькому до атмосферного тиску в інтервалі температур, обмеженому знизу не занадто низькими температурами (не

## Лабораторна робота 5. ВИЗНАЧЕННЯ АБСОЛЮТНОЇ ТА ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ

нижчими за мінус 50 °С). За таких параметрів сухе повітря може знаходитись тільки в газоподібному стані, тоді як вода може знаходитись в паровій, рідкій або твердій фазі в залежності від температури суміші. Звідси випливає, що вологе повітря являє собою таку суміш газів, один з компонентів якої – водяна пара – при зниженні температури може переходити в іншу фазу (рідку або тверду) і внаслідок цього випадати із суміші. Тому кількість водяної пари в розглядуваній суміші не може бути довільною. В залежності від температури і повного тиску суміші кількість водяної пари у вологому повітрі не може перевищувати певної величини. Цим вологе повітря принципово відрізняється від звичайних газових сумішей.

У відповідності із законом Дальтона повний атмосферний тиск складається з парціальних тисків окремих компонент. Тиск водяної пари є парціальним, тобто однією зі складових повного атмосферного тиску. Зазвичай парціальний тиск водяної пари в атмосфері коливається в межах  $(0,005 \div 0,05) \cdot 10^5$  Па. Величина максимального парціального тиску водяної пари у вологому повітрі визначається лише температурою суміші і не залежить від тиску суміші.

Кількісно вологість повітря оцінюється абсолютною та відносною вологістю.

*Абсолютна вологість* – фізична величина, яка дорівнює масі водяної пари, що міститься в 1 м<sup>3</sup> повітря за даної температури. Інакше кажучи, абсолютна вологість дорівнює густині водяної пари за даної температури. Маса 1 м<sup>3</sup> сухого повітря за нормальних умов дорівнює 1293 г. На основі рівняння Клапейрона маса 1 м<sup>3</sup> повітря за температури  $t$  °С і тиску  $p$ , мм рт. ст. буде дорівнювати:

$$m = \frac{1293}{1 + \alpha t^{\circ}} \cdot \frac{p}{p_0}$$

де  $\alpha = 1/273$  град<sup>-1</sup> – коефіцієнт лінійного розширення повітря.

Густина водяної пари по відношенню до густини повітря за однакового тиску і температури дорівнює 0,622.

Рівняння Клапейрона (справедливе лише для пари води, далекої від насичення) дає для маси 1 м<sup>3</sup> водяної пари  $m$  вираз :

$$b = m = \frac{1293 \cdot 0,622}{760} \cdot \frac{p}{1 + \alpha t^{\circ}} = 1,06 \frac{p}{1 + \alpha t^{\circ}}. \quad (5.1)$$

## Лабораторна робота 5. ВИЗНАЧЕННЯ АБСОЛЮТНОЇ ТА ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ

Цей вираз дозволяє визначити абсолютну вологість, якщо відомий парціальний тиск водяної пари за даної температури.

Із формули (5.1) видно, що за малих значень температури  $t$  величина абсолютної вологості повітря  $b$  фактично пропорційна тиску водяної пари  $p$ . Тому абсолютну вологість, виражену через парціальний тиск, інколи називають *пружністю водяної пари* та вимірюють в одиницях тиску – мм рт. ст.

Однак абсолютна вологість не завжди дає можливість оцінити ступінь насиченості повітря водяною парою. Тому на практиці використовують відносну характеристику – відносну вологість, що визначається як відносна насиченість повітря водяною парою.

*Відносна вологість* ( $B$ ) – це відношення парціального тиску водяної пари за даної температури  $p$  до тиску насиченої пари за тієї самої температури  $p_H$ :

$$B = \frac{p(t^{\circ}C)}{p_H(t^{\circ}C)}. \quad (5.2)$$

Отже, для того щоб знайти відносну вологість повітря, треба знати парціальний тиск пари за даної температури та тиск насиченої пари за цієї ж самої температури. Парціальний тиск водяної пари за даної температури можна знайти, знаючи точку роси. *Точка роси* – це температура, за якої водяна пара у повітрі стає насиченою. Якщо водяну пару охолоджують нижче від точки роси, вона починає конденсуватися на твердих поверхнях (виступає роса).

Відносна вологість повітря може бути визначена також через густину водяної пари.

Найпоширенішим приладом для вимірювання вологості є *психрометр* (від грецького psychros – мокрий і metro – вимірюю), що складається з двох однакових термометрів, нижній кінець (резервуар) одного з яких обмотаний вологою легкою тканиною («вологий» термометр).

Якщо водяна пара в повітрі ненасичена ( $B < 100\%$ ), то вода з тканини буде випаровуватися. При цьому покази «вологого» термометра нижчі аніж сухого за рахунок випаровування. Що менше пари у повітрі, то інтенсивніше відбувається випаровування і нижчі показання «вологого» термометра. Різниця між температурою «сухого»

## Лабораторна робота 5. ВИЗНАЧЕННЯ АБСОЛЮТНОЇ ТА ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ

термометра  $t_c$  та температурою «вологого» термометра  $t_b$  пропорційна вологості повітря: чим більш сухим є повітря, тим більша ця різниця; якщо ж повітря насичене паром, то  $t_c = t_b$ , оскільки парціальний тиск водяної пари в повітрі дорівнює тиску насичення водяної пари за температури  $t_c$ . За різницею показань цих термометрів та за психрометричною таблицею (табл. 5.3) знаходять значення вологості.

Крім психрометра для вимірювання вологості використовують ще *гігрометри*. Наприклад, принцип дії волосяного гігрометра (від грецького *hygros* – вологий) ґрунтується на тому, що у вологому повітрі довжина натягненого людського волосся зростає, а в сухому – скорочується. Вимірюючи видовження волосини, роблять висновки про значення вологості повітря.

У даній лабораторній роботі використовується аспіраційний психрометр (рис. 5.1), принцип дії якого полягає у тому, що два однакових термометри обдуваються однаковими потоками повітря.

Резервуар одного з термометрів обгорнуто змоченим водою батистом. Завдяки випаровуванню води показники термометрів різні. «Вологий» термометр порівняно із «сухим» термометром має нижчу температуру.

Випаровування води вільною поверхнею в одиницю часу пропорційне різниці температур води та повітря (закономірність, встановлена Ньютоном):

$$Q_1 = a \cdot \Delta t \cdot S_1, \quad (5.3)$$

де  $Q_1$  – теплота випаровування;  $a$  – коефіцієнт пропорційності;  $\Delta t$  – різниця показів «сухого» та «вологого» термометрів;  $S_1$  – величина поверхні випаровування.

Випаровування рідини в одиницю часу визначається за формулою:

$$m = \frac{cS_2(p_H - p)}{P}, \quad (5.4)$$

де  $m$  – маса води, що випаровується;  $c$  – коефіцієнт пропорційності;  $S_2$  – площа поверхні, що випаровує;  $p_H$  – пружність насиченої водяної пари;  $p$  – пружність водяної пари в повітрі;  $P$  – атмосферний тиск повітря за даних умов.

## Лабораторна робота 5. ВИЗНАЧЕННЯ АБСОЛЮТНОЇ ТА ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ

Кількість теплоти  $Q_2$ , необхідної для випаровування води масою  $m$ , дорівнює:

$$Q = mr = \frac{cS_2(p_H - p)}{P}r, \quad (5.5)$$

де  $r$  – питома теплота випаровування.

При  $Q_1 = Q_2$ , з (5.3) та (5.5) маємо:

$$\alpha\Delta tS_1 = \frac{cS_2(p_H - p)}{P}r. \quad (5.6)$$

Але, за умови  $S_1 = S_2$ , маємо:

$$p = p_H - A\Delta tP, \quad (5.7)$$

де  $A$  – стала для даного приладу величина (стала психрометра), яка визначається швидкістю потоку повітря і знаходиться дослідним шляхом:

$$A = \frac{a}{c \cdot r} = \text{const}$$

Остаточно формула для розрахунку абсолютної вологості повітря має вигляд:

$$b = p = p_H - 0,002(t_c - t_B) \cdot P, \quad (5.8)$$

де  $p_H$  – тиск насиченої пари за температури волого термометра  $t_B$ ;  $t_c$  – температура сухого термометра;  $P$  – атмосферний тиск повітря визначений у мм рт.ст.

Значення тиску  $p_H$  визначають з таблиці «Залежність тиску насичених парів води від температури» (табл. 5.4). Атмосферний тиск визначають за допомогою барометра.

---

### Обладнання

Будову стандартного аспіраційного термометра зображено на рис. 5.1. Він складається з двох однакових термометрів Т, балончик одного з термометрів покрито батистом Б. Аспіратор має пружинний вентилятор, який заводиться ключем К.

Швидкість повітряного потоку близька до 2,5 м/с. Для запобігання нагріву приладу ззовні його металеві частини мають дзеркальне покриття. Батист змочують водою за допомогою гумової груші з піпеткою. Грушу заповнюють дистильованою водою. Невеликим

## Лабораторна робота 5. ВИЗНАЧЕННЯ АБСОЛЮТНОЇ ТА ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ

стисканням груші через піпетку змочують батист. Необхідно уникати попадання води на другий термометр. Ключем К заводять вентилятор на 5-6 обертів і спостерігають за показниками термометрів.

На сьогодні на практиці для визначення відносної вологості повітря використовують електронні психрометри (рис. 5.2).

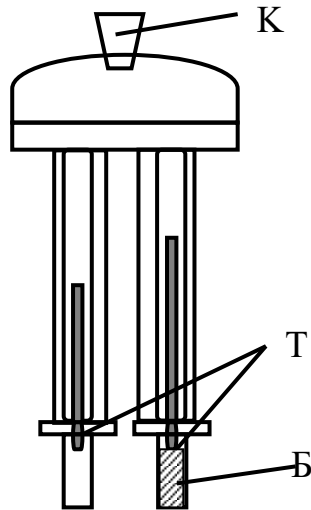


Рис.5.1



Рис.5.2

---

### Експериментальна процедура

До початку виконання дослідження підготувати таблиці 5.1, 5.2, 5.3 та 5.4 у програмі Excel.

#### Спосіб I.

1. За допомогою груші змочити батист, який намотаний на резервуар одного з термометрів (Б) психрометра.
2. Завести механічний пристрій вентилятора (К) на 5-6 повних обертів.
3. Через 4-5 хвилин зняти покази «сухого»  $t_C$  та «вологого»  $t_B$  термометрів.
4. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 5.1.

#### Спосіб II.

1. За допомогою барометра визначити атмосферний тиск  $P$ .
2. За таблицею 5.4 знайти значення тиску насичених парів  $p_H$  за температури, яка відповідає показам «сухого» термометра  $t_C$  у мм рт.ст.
3. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 5.1.

## Розрахунки

Всі розрахунки виконувати у програмі Excel.

### Спосіб I.

1. Знайти різницю температур «сухого» та «вологого» термометрів  $\Delta t$ .
2. Визначити значення відносної вологості повітря  $V_{табл}$  за допомогою психрометричної таблиці 5.3.
3. Визначити похибки вимірювання відносної вологості повітря  $V_{табл}$ .
4. Усі розрахунки виконувати у таблиці 5.2.
5. Подати звіт у вигляді таблиць у програмі Excel.

### Спосіб II.

1. Виразити значення тиску насичених парів  $p_H(t_C)$  у Па.
2. Застосувати формулу (5.8) та розрахувати абсолютну вологість повітря  $b(p)$  у програмі Excel.
3. За формулою (5.2) розрахувати відносну вологість повітря  $V$ .
4. Визначити похибки вимірювання відносної вологості повітря  $V$ .
5. Всі розрахунки виконувати у табл. 5.2.
6. Подати звіт у вигляді таблиць у програмі Excel.

## Лабораторний звіт

Таблиця 5.1

Задані та виміряні величини

Спосіб I		Спосіб II	
$t_C, ^\circ\text{C}$	$t_B, ^\circ\text{C}$	$P, \text{Па}$	$p_H(t_C), \text{мм. рт.ст.}$

Таблиця 5.2

Розрахунки шуканих величин

Спосіб I		Спосіб II		
$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$V_{табл}, \%$	$p_H(t_C), \text{Па}$	$b, \text{Па}$	$V, \%$

Таблиця 5.3

Психрометрична таблиця

Покази сухого термометра, °C	Різниця показів сухого й вологого термометрів, °C										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	100	81	63	45	28	11	–	–	–	–	–
2	100	84	68	51	35	20	–	–	–	–	–
4	100	85	70	56	42	28	14	–	–	–	–
6	100	87	75	63	51	40	28	18	7	–	–
8	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	–
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	–
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	–
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	–
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	50	45	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Таблиця 5.4

Залежність тиску насиченої водяної пари від температури

$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{H}_2\text{O}}$ мм рт. ст.	$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{H}_2\text{O}}$ мм рт. ст.	$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{H}_2\text{O}}$ мм рт. ст.
-30	0,28	-3	3,57	24	22,38
-29	0,31	-2	3,88	25	23,76
-28	0,35	-1	4,22	26	25,21
-27	0,38	0	4,58	27	26,74
-26	0,43	1	4,93	28	28,35
-25	0,47	2	5,29	29	30,04
-24	0,52	3	5,69	30	31,82
-23	0,58	4	6,10	31	33,70
-22	0,64	5	6,54	32	35,66
-21	0,70	6	7,01	33	37,73
-20	0,77	7	7,51	34	39,90
-19	0,85	8	8,05	35	42,18
-18	0,94	9	8,61	36	44,56
-17	1,03	10	9,21	37	47,07
-16	1,13	11	9,84	38	49,69
-15	1,24	12	10,52	39	52,44
-14	1,36	13	11,23	40	55,32
-13	1,49	14	11,99	45	71,88
-12	1,63	15	12,79	50	92,50
-11	1,78	16	13,63	55	118,00
-10	1,95	17	14,53	60	149,40
-9	2,13	18	15,48	65	187,50
-8	2,32	19	16,48	70	233,70
-7	2,53	20	17,54	75	289,10
-6	2,76	21	18,65	80	355,10
-5	3,01	22	19,83	90	525,80
-4	3,28	23	21,07	100	760,00

### Контрольні запитання

1. Дайте пояснення фази та фазових переходів.
2. Що таке насичена та ненасичена пара?
3. Що називається абсолютною вологістю повітря?
4. Що називається відносною вологістю повітря?
5. Які ви знаєте методи вимірювання вологості повітря?
6. За рахунок якої енергії відбувається випаровування рідини?
7. Що називають точкою роси?
8. Як побудований психрометр, гігрометр?
9. На якому явищі ґрунтується психрометричний спосіб вимірювання вологості повітря?
- 10.3 якою метою потрібно контролювати вологість повітря?
11. Наведіть орієнтовний склад атмосфери.

## **ДОСЛІДНЕ ВИВЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ ВІД ВИСОТИ НАД ЗЕМЛЕЮ**

### **Мета роботи:**

- вивчити поняття про атмосферу Землі;
- дослідити залежність атмосферного тиску від висоти над Землею;
- отримати дослідне підтвердження барометричної формули.

---

### **Список обладнання:**

- барометр;
- термометр.

---

### **Долабораторна підготовка**

*Для виконання лабораторної роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал:* атмосфера, атмосферний тиск, барометрична формула.

### **Теоретичні основи**

Атмосфера – це газоподібна оболонка, яка оточує Землю. Атмосфера обертається із Землею як одне ціле і має масу  $5,15 \cdot 10^{18}$  кг. Хімічний склад атмосфери біля поверхні Землі такий: 78 % азоту, 21 % кисню, 0,9 % аргону, а решту складають у невеликих кількостях інші гази ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{He}_2$ ,  $\text{Ne}_2$  тощо). Відсотковий склад атмосфери незначно змінюється до висоти понад 100 км. Вище за 100 км склад атмосфери (повітря) змінюється – росте частка легких газів, частина молекул розпадається на атоми та іони, утворюючи іоносферу.

Атмосфера до висоти 20 км має назву тропосфери, до 40 км – стратосфери, до 80 км – мезосфери і вище іоносфери. Газ атмосфери знаходиться у полі тяжіння Землі і тисне на її поверхню. Тиск, який створює газ атмосфери своєю вагою на поверхню Землі, називається атмосферним тиском. Якщо вирізати стовпчик повітря у вигляді паралелепіпеда висотою 20 км (більш немає сенсу) та поперечним перерізом в  $1 \text{ см}^2$ , то вага такого стовпчика досягає 1,013 кг (за умови

**Лабораторна робота 6. ДОСЛІДНЕ ВИВЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ ВІД ВИСОТИ НАД ЗЕМЛЕЮ**

$t = 0$  °С та нормальній величині прискорення Земного тяжіння на широті  $45^{\circ}$  на рівні моря). Атмосферний тиск вимірюється в Па ( $\text{Н/м}^2$ ), мм рт.ст., атмосферах. Співвідношення між цими одиницями наступне:

$$1 \text{ атм} = 1,014 \cdot 10^5 \text{ Па} = 760 \text{ мм. рт. ст.} = 1,013 \text{ кг/см}^2.$$

Тиск та густина повітря в атмосфері з висотою зменшуються. Розглянемо залежність атмосферного тиску від висоти. Якщо атмосферний тиск на висоті  $h$  дорівнює  $p$  (рис. 6.1), то на висоті  $h+dh$  він буде  $p+dp$ . Різниця тиску  $p$  та  $p+dp$  дорівнює вазі  $P$  газу, який знаходиться в об'ємі циліндра висотою  $dh$  з основою, площа якої дорівнює одиниці.

Тоді

$$p - (p + dp) = \rho g dh,$$

де  $\rho$  – густина повітря, або:

$$dp = -\rho g dh \quad (6.1),$$

а знак "мінус" показує, що із збільшенням висоти тиск зменшується.

З висотою  $dh$  густина  $\rho$  майже не змінюється.

Використавши рівняння стану ідеального газу, матимемо:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT \quad \text{або} \quad \rho = \frac{m}{V} = \frac{p\mu}{RT} \quad (6.2)$$

Підставивши вираз (6.2) в (6.1), отримаємо:

$$dp = \frac{p\mu g dh}{RT} \quad \text{або} \quad \frac{dp}{p} = -\frac{\mu g dh}{RT}.$$

За відсутності вітру та повітряних течій, температура атмосфери залишається незмінною.

Таку атмосферу називають ізотермічною.

Ізотермічна атмосфера – це ідеалізоване уявлення про атмосферу, але в деяких межах (висот) воно виправдане.

Тоді

$$\int_{P_0}^P \frac{dp}{p} = -\int_0^h \frac{\mu g}{RT} dh,$$

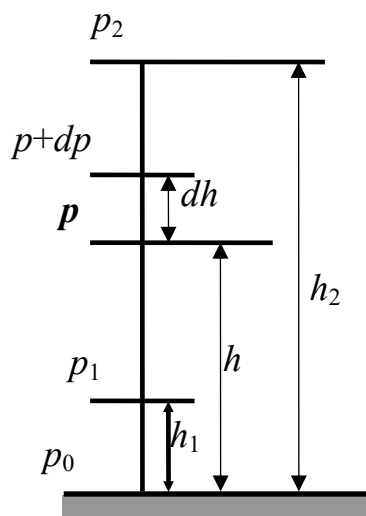


Рис. 6.1

звідки

$$p = p_0 e^{-\frac{\mu g h}{RT}}, \quad (6.3)$$

де  $p_0$  – тиск на висоті  $h=0$ .

Вираз (6.3) має назву *барометричної формули*. За допомогою цієї формули можна визначити висоту, на якій ми знаходимося, за значенням тиску. Прилади для визначення висоти над Земною поверхнею називаються висотомірами або альтиметрами.

Для дослідної перевірки барометричної формули достатньо заміряти тиск  $p_1$  на висоті  $h_1$ , а потім тиск  $p_2$  на висоті  $h_2$  (рис. 6.1):

$$p_1 = p_0 e^{-\frac{\mu g h_1}{RT}} \quad \text{та} \quad p_2 = p_0 e^{-\frac{\mu g h_2}{RT}}$$

Підставивши значення  $p$  та  $h$  у (6.3), маємо:

$$\ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{\mu g}{RT} (h_2 - h_1), \quad (6.4)$$

де  $p_1$  та  $p_2$  – атмосферний тиск на висоті  $h_1$  та  $h_2$  відповідно;  $\mu = 0.029$  кг/моль – молярна маса повітря;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $R = 8,31$  Дж/(моль·К) – універсальна газова стала;  $T$  – абсолютна температура.

Отже, дослідна перевірка барометричної формули (6.3) зводиться до перевірки співвідношення (6.4).

---

## Обладнання

Атмосферний тиск вимірюють з допомогою приладів – барометрів. Найбільш поширеними раніше були ртутні барометри (рис. 6.2), а на сьогодні – барометри-анероїди (рис. 6.3).

На рис. 6.2 показано ртутний барометр. Він складається з скляної трубки, з якої відкачали повітря, зануреної у посудину із ртуттю. Ртуть піднімається на висоту  $h$  під дією атмосферного тиску, тому тиск часто вимірюють в мм рт. ст., оскільки  $p = \rho g h$ .

Будову барометра-анероїда показано на рисунку 6.4. Головна частина барометра-анероїда – легка й пружна порожня металева коробочка 1 з гофрованою (ребристою) поверхнею. Повітря в коробочці перебуває за зниженого тиску. До стінки коробочки прикріплена

## Лабораторна робота 6. ДОСЛІДНЕ ВИВЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ ВІД ВИСОТИ НАД ЗЕМЛЕЮ

стрілка 2, насаджена на вісь 3. Кінець стрілки пересувається по шкалі 4, розміченій у міліметрах ртутного стовпа або в паскалях. Усі деталі барометра розміщені в корпусі, спереду закритому склом.

Зміна атмосферного тиску приводить до зміни сили, яка стискає стінки коробочки. Відповідно, змінюється й вигин цих стінок, що спричиняє рух стрілки. Барометри-анероїди зручніші у використанні, ніж ртутні прилади: вони легкі, компактні та безпечні.

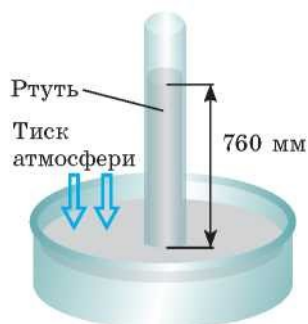


Рис. 6.2



Рис. 6.3

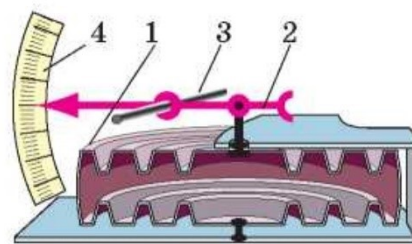


Рис. 6.4

---

### Експериментальна процедура

До початку виконання дослідів підготувати таблиці 6.1 та 6.2 у програмі Excel.

1. Ознайомитись з приладами.
2. Заміряти тиск  $p_1$  на висоті  $h_1$ . Прийняти висоту  $h_1=0$  на рівні першого поверху.
3. Заміряти тиск  $p_2$  на висоті 9-го поверху лабораторного корпусу (висота  $h_2 = 24$  м).
4. Визначити температуру навколишнього повітря на даний момент.
5. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 6.1.

---

### Розрахунки

Всі розрахунки виконувати у програмі Excel.

1. Користуючись формулою (6.4) зробити дослідну перевірку барометричної формули.
2. Розрахунки виконувати у таблиці 6.2.
3. Подати звіт у вигляді таблиць у програмі Excel.

Лабораторний звіт

Таблиця 6.1

Задані та виміряні величини

$p_1$ , Па	$h_1$ , м	$p_2$ , Па	$h_2$ , м	$t$ °С	$T$ , К	$\mu$ , кг/моль	$g$ , м/с <sup>2</sup>	$R$ , Дж/(моль·К)
	0		24					

Таблиця 6.2

Розрахунки шуканих величин

$\ln \frac{p_1}{p_2}$	
$\frac{\mu g}{RT} (h_2 - h_1)$	

Контрольні запитання

1. Що таке атмосфера і який склад вона має?
2. На які класи поділяються атмосферні шари?
3. Фізичний зміст атмосферного тиску та одиниці його вимірювання.
4. Яка залежність атмосферного тиску від висоти?
5. Виведіть барометричну формулу.
6. Яка будова барометрів?
7. Які прилади називають альтиметрами?

## **ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ПРОВІДНИКА ЗА ДОПОМОГОЮ АМПЕРМЕТРА ТА ВОЛЬТМЕТРА**

### **Мета роботи:**

- вивчити закони постійного струму на прикладі розгалужених кіл;
- визначити невідомий опір методом вимірювання напруги та струму за різних способів вмикання приладів.

---

### **Список обладнання:**

- амперметр;
- вольтметр;
- джерело струму;
- реостат;
- з'єднувальні провідники.

---

### **Долабораторна підготовка**

*Для виконання роботи необхідно вивчити такий теоретичний матеріал:* електричний струм; сила струму та його густина; закон Ома для однорідної та неоднорідної ділянок кола; опір провідників; правила Кірхгофа для розгалужених кіл.

### **Теоретичні основи**

*Електричним струмом* називають впорядковане переміщення заряджених частинок (носіїв заряду). *Струмом провідності* називають направлений рух вільних носіїв заряду у провідному середовищі. Струми, які утворюються у процесі руху заряджених макротіл, називають *конвекційними*, а короткочасні електричні струми, що виникають у діелектричних середовищах внаслідок зміщення зв'язаних зарядів під дією зовнішнього електричного поля – *струмами поляризації*.

За напрям струму вважають напрям руху позитивних зарядів. У металах напрям струму є протилежним до напрямку направленого руху електронів.

Основними умовами виникнення струму у провіднику є:

- 1) наявність вільних носіїв заряду;
- 2) створення і підтримання у провіднику електричного поля.

Кількісною мірою електричного струму є сила струму і його густина. *Сила струму* – скалярна фізична величина, яка чисельно дорівнює електричному заряду, що переноситься через поперечний переріз провідника за одиницю часу:

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Одиницею вимірювання сили струму є 1 А (ампер).

*Густина струму* – векторна фізична величина, що чисельно дорівнює електричному заряду, який переноситься через перпендикулярний до напрямку руху носіїв переріз одиничної площі провідника за одиницю часу:

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS} \vec{n} = \frac{dq}{dt} \cdot \frac{1}{dS} \vec{n}$$

де  $dS$  – площа перерізу провідника;  $\vec{n}$  – одиничний вектор нормалі до поверхні перерізу провідника.

Постійним електричним струмом називають такий струм, значення і напрям якого не змінюються, тобто  $\vec{j} = const$

Для визначення силу струму в електричних колах використовують закони Ома. Під електричним колом розуміють систему, яка складається із джерел струму (з електрорушійною силою  $\varepsilon$ , опором  $r$ ) і споживачів електричної енергії (з опором  $R$ ), з'єднаних між собою провідниками.

Закон Ома для однорідної ділянки кола, на який діють тільки кулонівські сили (тобто ділянки, яка не містить джерела струму,  $\varepsilon = 0$ ,  $r = 0$ ):

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R}. \quad (7.1)$$

де  $\varphi_1 - \varphi_2$  – різниця потенціалів на кінцях ділянки кола,  $U$  – напруга;  $R$  – зовнішній опір, тобто опір всіх елементів ділянки кола, крім джерела струму.

Якщо у колі діють і сторонні сили, то закон Ома для неоднорідної ділянки кола, тобто ділянки, яка містить джерело струму, буде:

$$I = \frac{U}{R+r} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1 \pm \varepsilon}{R+r},$$

де  $\varepsilon$  – електрорушійна сила джерела струму;  $r$  – внутрішній опір джерела струму.

У разі замкненого (повного) кола, тобто при  $\varphi_1 = \varphi_2$ , маємо:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}.$$

Електричний опір провідника – це скалярна фізична величина, яка є властивістю провідника щодо перешкоджання упорядкованому рухові носіїв заряду вздовж нього і вимірюється в омах: 1 Ом – це опір такого провідника, по якому протікає струм в 1 А при напрузі на кінцях в 1 В. Наявність опору у металевих провідників першого роду пов’язана із розсіюванням енергії електронів провідності на теплову енергію коливань кристалічної решітки або неоднорідності її структури (домішки, дефекти). Цей опір інакше називають активним, або омичним, оскільки розрізняють ще реактивний (індуктивний і ємнісний) опір у колах змінного струму.

Опір провідника залежить від матеріалу, параметрів (довжини, площі поперечного перерізу) та температури. Для провідника циліндричної форми:

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

де  $\rho$  – питомий опір матеріалу, з якого виготовлений провідник, вимірюється в 1 Ом·м;  $l$  – довжина провідника;  $S$  – площа поперечного перерізу провідника.

Існує декілька способів вимірювання електричних опорів. Для безпосереднього вимірювання опорів застосовують омметри. Але часто використовують найпростіший спосіб вимірювання опорів – метод прямого вимірювання струму та напруги за допомогою амперметра і вольтметра.

Як і до інших вимірювальних приладів, до амперметрів та вольтметрів висувають такі вимоги: при вмиканні їх у коло не повинно відбуватись помітної зміни режиму роботи всього кола або окремих його ділянок.

**Лабораторна робота 7. ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ПРОВІДНИКА ЗА ДОПОМОГОЮ АМПЕРМЕТРА ТА ВОЛЬТМЕТРА**

Для того, щоб виміряти величину струму, необхідно через прилад пропустити увесь цей струм (або наперед відому його частину), тому амперметр потрібно вмикати послідовно у розрив тієї ділянки мережі, де необхідно виміряти струм. Однак при такому підключенні опір амперметра збільшить загальний опір кола і зменшить струм у ньому. Щоб цей ефект зменшити, обмотку амперметрів роблять із невеликої кількості витків дроту великої товщини, завдяки чому обмотка має невеликий опір.

Для вимірювання напруги між будь-якими двома точками електричного кола до них паралельно підключають вольтметр, при цьому частина струму буде відгалужуватись через нього. Щоб зменшити вплив вольтметра на коло, опір вольтметра роблять значно більшим, ніж опір ділянки кола. Тому струм, який проходить через вольтметр, дуже малий.

На рисунку 7.1 та 7.2 наведено дві можливі схеми підключення амперметра і вольтметра для визначення невідомого опору.

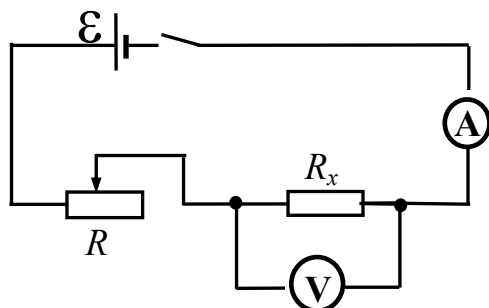


Рис. 7.1

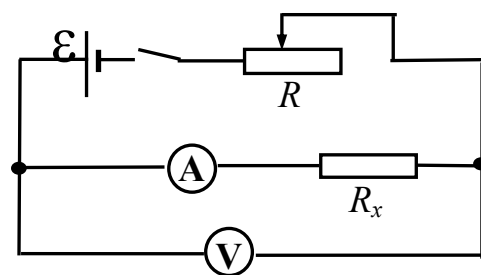


Рис. 7.2

Першу схему (рис. 7.1) використовують для вимірювання малих опорів (порівняно з опором вольтметра). Амперметр у цій схемі вимірює загальний струм, який протікає і по опору  $R_x$ , і по обмотці вольтметра. Якщо опір  $R_x$  малий, то по ньому проходить майже весь струм, оскільки струм, який тече через вольтметр, дуже малий.

Задачею цієї роботи є визначити похибку при користуванні формулою (7.1). Невідомий опір можна знайти за формулою:

$$R_x = \frac{U}{I - \frac{U}{R_B}}, \quad (7.2)$$

де  $R_B$  – опір вольтметра. З формул 7.1 та 7.2 видно, що  $R < R_x$ . Причому, чим більший опір вольтметра, тим ближче  $R$  до  $R_x$ .

Другу схему (рис. 7.2) використовують для вимірювання великих опорів (порівняно з опором амперметра). Вольтметр у цій схемі вимірює спад напруги і на опорі  $R_x$ , і на обмотці амперметра. Оскільки опір  $R_x$ , дуже великий, на нього витрачається майже вся напруга мережі. Невідомий опір можна знайти за формулою:

$$R_x = \frac{U}{I} - R_A, \quad (7.3)$$

де  $R_A$  – опір амперметра. З формул (7.1) і (7.3) видно, що  $R > R_x$ . Причому, чим менший опір амперметра, тим ближче  $R$  до  $R_x$ .

Метод амперметра і вольтметра застосовують тоді, коли можна обійтись без великої точності вимірювань.

Якщо амперметр і вольтметр задовольняють названим вимогам, то за їхніми показами величину невідомого опору розраховують, використовуючи закон Ома для ділянки кола (7.1).

---

## **Обладнання**

Для виконання роботи використовують одні й ті самі амперметр та вольтметр, підключаючи їх відповідно до схем (рис. 7.1 або рис. 7.2).

Для створення напруги застосовують джерело живлення  $\mathcal{E}$ , а для зміни напруги – реостат  $R$ .

Провідники для з'єднання приладів додаються окремо.

---

## **Експериментальна процедура**

*До початку виконання дослідів підготувати таблиці 7.1, 7.2, 7.3 та 7.4, у програмі Excel.*

1. Зібрати коло за схемою, показаною на рисунку 7.1.
2. Визначити ціну поділки амперметра та вольтметра.
3. Записати значення сили струму  $I$  при трьох різних значеннях напруги  $U$ .
4. Зібрати коло за схемою, показаною на рисунку 7.2
5. Записати значення сили струму  $I$  при трьох різних значеннях напруги  $U$ .
6. Визначити опір амперметра та вольтметра.
7. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 7.1 та 7.3.

## Розрахунки

Всі розрахунки виконувати у програмі Excel.

1. Розрахувати опір  $R$  за формулою 7.1 для трьох значень напруги та сили струму.
2. Знайти середнє значення  $R_{сер}$ .
3. Обчислити опір  $R_x$  за формулою 7.2 для першої схеми вмикання приладів для трьох значень напруги та сили струму.
4. Обчислити опір  $R_x$  за формулою 7.3 для другої схеми вмикання приладів для трьох значень напруги та сили струму.
5. Знайти середнє значення результатів  $R_{хсер}$  для кожної схеми вмикання приладів.
6. Порівняти, наскільки відрізняються результати розрахунків за формулою 7.1 від значення розрахованого опору за формулами 7.2 та 7.3.
7. Виразити у відсотках відносно похибку визначення опору для кожної схеми вмикання приладів:

$$\varepsilon = \frac{|R_{сер} - R_{хсер}|}{R_{сер}} \cdot 100\%.$$

8. Результати обчислень занести до таблиці 7.2 та 7.4.
9. Подати звіт у вигляді таблиць у програмі Excel.

## Лабораторний звіт

Таблиця 7.1

Задані та виміряні величини

Номер досліджу	$U, В$	$I, А$	$R_A, Ом$

Таблиця 7.2

Розрахунки шуканих величин

$R, Ом (7.1)$	$R_{сер}, Ом$	$R_x, Ом (7.2)$	$R_{хсер}, Ом$	$\varepsilon, \%$

Таблиця 7.3

Задані та виміряні величини

Номер досліджу	$U$ , В	$I$ , А	$R_V$ , Ом

Таблиця 7.4

Розрахунки шуканих величин

$R$ , Ом (7.1)	$R_{сер}$ , Ом	$R_x$ , Ом (7.3)	$R_{хсер}$ , Ом	$\varepsilon$ , %

---

### Контрольні запитання

1. Що називають електричним струмом?
2. Які умови існування постійного струму?
3. Дайте визначення сили струму та його густини.
4. Дайте визначення різниці потенціалів, електрорушійної сили та напруги.
5. Що називають однорідною та неоднорідною ділянками кола?
6. Запишіть закон постійного струму для неоднорідної ділянки кола. Покажіть, що це узагальнений закон, з якого можна вивести закон Ома як для ділянки, так і для замкненого кола.
7. Дайте визначення опору провідника. Чим зумовлений опір провідника?
8. Як амперметр і вольтметр вмикають в коло? Чому саме так?

## ГРАДУЮВАННЯ ГАЛЬВАНОМЕТРА

---

### Мета роботи:

- вивчити закони постійного струму;
  - навчитися складати електричні кола, градуювати прилади для вимірювання струму і напруги та визначати ціну поділки на шкалі градуйованого гальванометра.
- 

### Список обладнання:

- гальванометр;
  - амперметр;
  - вольтметр;
  - реостат;
  - джерело струму;
  - з'єднувальні провідники.
- 

### Долабораторна підготовка

*Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал:* електричний струм; сила струму та його густина; закон Ома для ділянки кола; опір провідників; правила Кірхгофа для розгалужених кіл.

### Теоретичні основи

Для розрахунку сили струму, опору або електрорушійної сили (ЕРС) джерела струму на окремих ділянках розгалужених електричних кіл використовують правила Кірхгофа.

*Розгалуженим колом* називають коло, в якому є точки з'єднання трьох і більше провідників. Розгалужені кола характеризують:

- 1) кількістю вузлів, тобто таких точок, в яких сходяться три і більше провідників зі струмами;
- 2) кількістю гілок (*розгалужень*), тобто ділянок кола, які з'єднують два сусідні вузли;
- 3) кількістю незалежних контурів, тобто замкнених кіл.

Перше правило Кірхгофа (правило вузлів) є законом збереження заряду і стосується вузлів розгалуженого кола: алгебраїчна сума сил струмів, які сходяться у вузол, дорівнює нулеві:

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0,$$

де  $n$  – кількість гілок, що сходяться у вузлі.

*Правило знаків:* струми, які входять до вузла, записують зі знаком “плюс”, а струми, які виходять із нього, зі знаком “мінус”.

Друге правило Кірхгофа (правило контурів) є законом збереження енергії та узагальненням закону Ома для довільного контуру розгалуженого електричного кола: у замкненому контурі алгебраїчна сума спадів напруги (добутків сил струмів на опори) дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, які діють у цьому контурі:

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i + \sum_{k=1}^m I_k r_k = \sum_{k=1}^m \varepsilon_k,$$

де  $n$  – кількість гілок у контурі;  $m$  – кількість ЕРС у контурі.

*Правила знаків:*

1) за обходу контуру за довільно обраним напрямком доданки спадів напруги  $\sum_{i=1}^n I_i R_i$  та  $\sum_{k=1}^m I_k r_k$  беруть зі знаком “плюс”, якщо напрямок обходу контуру збігається з напрямком струму, зі знаком “мінус”, якщо напрямок обходу контуру протилежний напрямку струму;

2) доданки  $\sum_{k=1}^m \varepsilon_k$  беруть зі знаком “плюс”, якщо в разі обходу контуру за довільно обраним напрямком джерело струму проходимо від негативного полюса до позитивного, і зі знаком “мінус”, якщо джерело проходимо від позитивного полюса до негативного.

Розв’язуючи задачі, в яких розглядають розгалужені кола, варто дотримуватись певної послідовності дій.

На всіх ділянках схеми розгалуженого кола довільно позначити стрілками напрям струму.

1. Записати за першим правилом Кірхгофа кількість  $n - 1$  рівнянь відповідно до правила знаків.
2. Довільно обрати напрям кожного простого контуру, наприклад, за рухом годинникової стрілки.

3. Записати за другим правилом Кірхгофа кількість  $p - (n - 1)$  рівнянь відповідно до правила знаків, де  $p$  – кількість гілок кола.
4. Перевірити, щоб усі електрорушійні сили й опори входили в отриману систему рівнянь, а кількість рівнянь дорівнювала кількості різних струмів у розгалуженому колі. Якщо внаслідок обчислення деякі струми матимуть знак “–”, то це означає, що їхні справжні напрями протилежні напрямам, позначеним на схемі.

У колах постійного та змінного струму для вимірювання сили струму використовують амперметри, а для вимірювання напруги – вольтметри. Ці прилади виготовляють на основі одного й того самого вимірювального приладу – гальванометра, відрізняються вони один від одного внутрішнім опором і шкалою. Зазвичай гальванометр розрахований на вимірювання незначних струмів.

Амперметри, як і вольтметри, часто виготовляють на різні діапазони струмів чи напруги. Для цього в корпусі приладу монтують два або декілька шунтів (чи додаткових опорів), які за допомогою перемикача з’єднують з клемми гальванометра. В приладах, які мають кілька діапазонів вимірювання, максимальну силу струму (напругу) вказують біля перемикача діапазонів або біля відповідної клемми приладу.

Важливими характеристиками електровимірювальних приладів є ціна поділки шкали та клас точності приладу. *Ціна поділки  $K$*  визначається зміною значення вимірюваної фізичної величини для переведення стрілки приладу до наступної поділки шкали. Для її визначення треба *поділити максимальну силу струму (напругу), яку зможе виміряти даний прилад, на кількість поділок на шкалі приладу.*

У цій роботі потрібно *проградувати* гальванометр, тобто за показниками приладів з відомою ціною поділки шкали (еталонних) визначити ціну поділки шкали гальванометра спочатку як амперметра, а потім – як вольтметра.

### Дослід 1.

Для градуювання гальванометра як амперметра в коло з метою зміни сили струму вмикають послідовно реостат  $R$  (рис. 8.1), опір якого має бути незначним – кілька десятків Ом.

Застосувавши правила Кірхгофа:

$$I = I_{\Gamma} + I_{\text{ш}}; \quad I_{\Gamma} R_{\Gamma} = I_{\text{ш}} R_{\text{ш}}; \quad I_{\Gamma} = nK,$$

## Лабораторна робота 8. ГРАДУЮВАННЯ ГАЛЬВАНОМЕТРА

знайдемо зв'язок показників еталонного амперметра з показниками гальванометра:

$$I = nK \left[ 1 + \frac{R_{\Gamma}}{R_{\text{ш}}} \right],$$

де  $K$  – ціна поділки гальванометра;  $n$  – номер поділки.

Повний струм і номер поділки утворюють лінійну функцію, з графіка якої знаходимо ціну поділки гальванометра як амперметра:

$$K = \frac{\Delta I}{\Delta n} \cdot \frac{R_{\text{ш}}}{(R_{\text{ш}} + R_{\Gamma})}. \quad (8.1)$$

### Дослід 2.

Для градуювання гальванометра як *вольтметра* для зміни сили струму використовують потенціометр  $\Pi$  (рис. 8.2). У такому разі загальний опір потенціометра повинен бути великим (декілька сотень Ом).

Застосувавши правила Кірхгофа:

$$U = I_{\Gamma} (R_{\Gamma} + R_{\text{д}}),$$

де  $I_{\Gamma} = nK$ , знайдемо зв'язок показників еталонного вольтметра з показниками гальванометра:

$$U = nK [R_{\text{д}} + R_{\Gamma}],$$

де  $K$  – ціна поділки гальванометра;  $n$  – номер поділки.

Напруга і номер поділки утворюють лінійну функцію, з графіка якої знаходимо ціну поділки гальванометра як вольтметра:

$$K = \frac{\Delta U}{\Delta n} \frac{1}{(R_{\text{д}} + R_{\Gamma})}. \quad (8.2)$$

Іноді, особливо для приладів, призначених для вимірювання малих значень струмів та напруги, зручно розглядати не ціну поділки шкали, а *чутливість приладу*  $S$ , яку визначають лінійним або кутовим переміщенням покажчика (стрілки), що відповідає одиниці вимірюваної величини. Ціна поділки шкали та чутливість приладу обернено пропорційні одна одній, тобто:

$$S = 1/K. \quad (8.3)$$

Обладнання

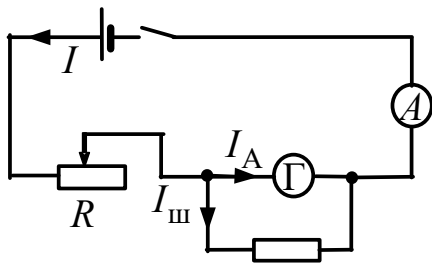


Рис. 8.1  $R_{ш}$

Для того щоб гальванометром можна було виміряти великі струми, паралельно йому вмикають шунт – провідник із малим відомим опором  $R_{ш}$ , меншим за опір амперметра. Опір шунта має бути таким, щоб через гальванометр проходив струм, не більший за допустиме значення, а основна частина струму проходила через шунт. Схема такого з'єднання зображена на рис. 8.1.

Застосувавши закони Ома та правила Кірхгофа, отримаємо формулу для розрахунку опору шунта:

$$R_{ш} = \frac{I_{Г} \cdot R_{Г}}{I_{\max} - I_{Г}}, \quad (8.4)$$

де  $I_{Г}$  – максимальне значення сили струму, на яку розрахований гальванометр,  $I_{\max}$  – максимальне значення сили струму, яку потрібно виміряти цим гальванометром,  $R_{Г}$  – опір гальванометра.

У випадку застосування гальванометра для вимірювання дуже великої напруги, до нього послідовно вмикають достатньо великий додатковий опір  $R_{Д}$ .

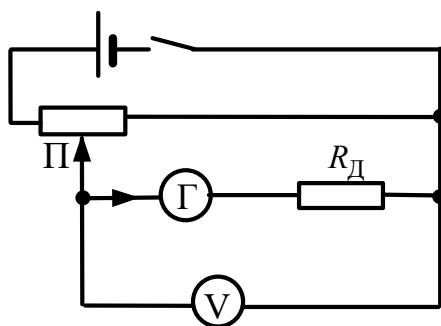


Рис. 8.2

Схема такого з'єднання зображена на рис. 8.2. При цьому загальний опір збільшується, і струм у ньому, навіть за значної напруги, не перевищує величини, допустимої для даного гальванометра. Додатковий опір розраховують за формулою, яку отримують із законів Ома та правил Кірхгофа:

$$R_{Д} = \frac{U_{\max} - I_{Г} R_{Г}}{I_{Г}}, \quad (8.5)$$

де  $U_{\max}$  – максимальна напруга, яку необхідно виміряти,  $I_{Г}$  – максимальне значення сили струму, на яку розрахований гальванометр,  $R_{Г}$  – опір гальванометра.

### Експериментальна процедура

До початку виконання дослідів підготувати таблиці 8.1, 8.2, 8.3 та 8.4 у програмі Excel.

#### Дослід 1. Градування гальванометра як амперметра

1. Скласти коло за схемою (рис. 8.1).
2. Змінюючи за допомогою реостата  $R$  силу струму в колі, записати в таблицю 8.1 показники еталонного (в амперах) та градуйованого (в поділках) приладів.
3. Визначити значення максимальної сили струму, на яку розрахований гальванометр  $I_{\Gamma}$ , максимальне значення сили струму  $I_{\max}$  та  $R_{\Gamma}$  опір гальванометра.
4. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 8.1

#### Дослід 2. Градування гальванометра як вольтметра

1. Скласти коло за схемою (рис. 8.2).
2. Змінюючи напругу за допомогою потенціометра  $\Pi$ , записати до таблиці 8.3 показники еталонного (у вольтах) та градуйованого (в поділках) приладів.
3. Визначити значення максимальної напруги, яку необхідно виміряти, максимальне значення сили струму, на яку розрахований гальванометр  $I_{\Gamma}$  та опір гальванометра  $R_{\Gamma}$ .
4. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 8.3.

---

### Розрахунки

Всі розрахунки та побудову графіків виконувати у програмі Excel.

#### Дослід 1. Градування гальванометра як амперметра

1. За формулою 8.4 розрахувати величину опору шунта  $R_{\text{ш}}$ .
2. За отриманими даними побудувати графік залежності сили струму  $I$  від показників градуйованого приладу  $n$  (приклад 8.1).
3. Задати на графіку рівняння лінії тренда та визначити градієнт  $\Delta I / \Delta n$ .
4. Користуючись формулою 8.1, визначити ціну поділки шкали градуйованого приладу.
5. Розрахувати за допомогою формули (8.3) чутливість градуйованого приладу.
6. Подати звіт у вигляді таблиць та графіків у програмі Excel.

## Дослід 2. Градування гальванометра як вольтметра

1. За формулою (8.5) розрахувати величину додаткового опору  $R_D$ .
2. За отриманими даними побудувати графік залежності напруги  $U$  від показників градуйованого приладу  $n$  (приклад 8.2)
3. Задати на графіку рівняння лінії тренда та визначити градієнт  $\Delta U/\Delta n$
4. За допомогою формули (8.2) визначити ціну поділки шкали градуйованого приладу.
5. Розрахувати за допомогою формули (8.3) чутливість градуйованого приладу.
6. Подати звіт у вигляді таблиць та графіків у програмі Excel

### Лабораторний звіт

Таблиця 8.1

Задані та виміряні величини

Номер досліджу	$n$ , поділок	$I$ , А	$I_{\max}$ , А	$I_{\Gamma}$ , А	$R_{\Gamma}$ , Ом

Таблиця 8.2

Розрахунки шуканих величин

$R_{ш}$ , Ом	$\Delta I/\Delta n$ , А/поділ.	$K$ , А/поділ.	$S$ , поділ./А

Таблиця 8.3

Задані та виміряні величини

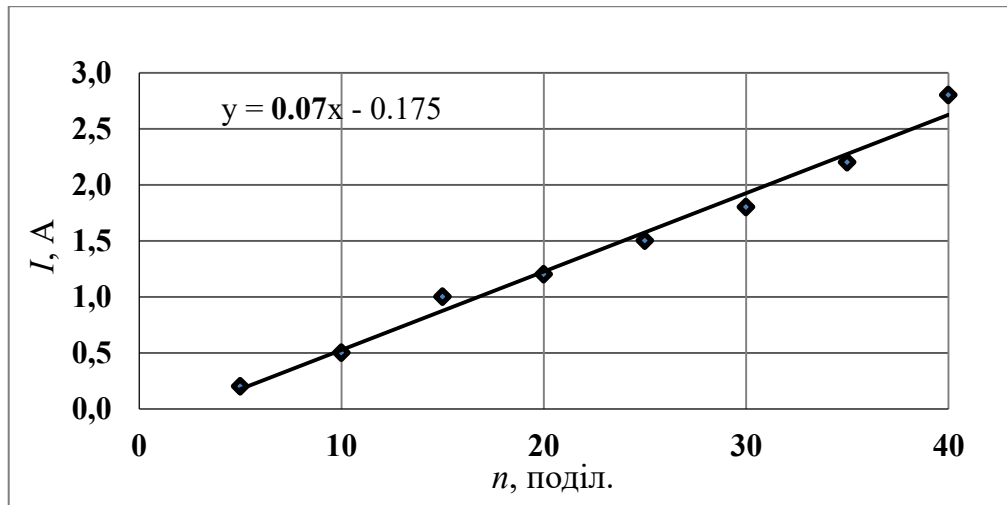
Номер досліджу	$n$ , поділок	$U$ , В	$U_{\max}$ , В	$I_{\Gamma}$ , А	$R_{\Gamma}$ , Ом

Таблиця 8.4

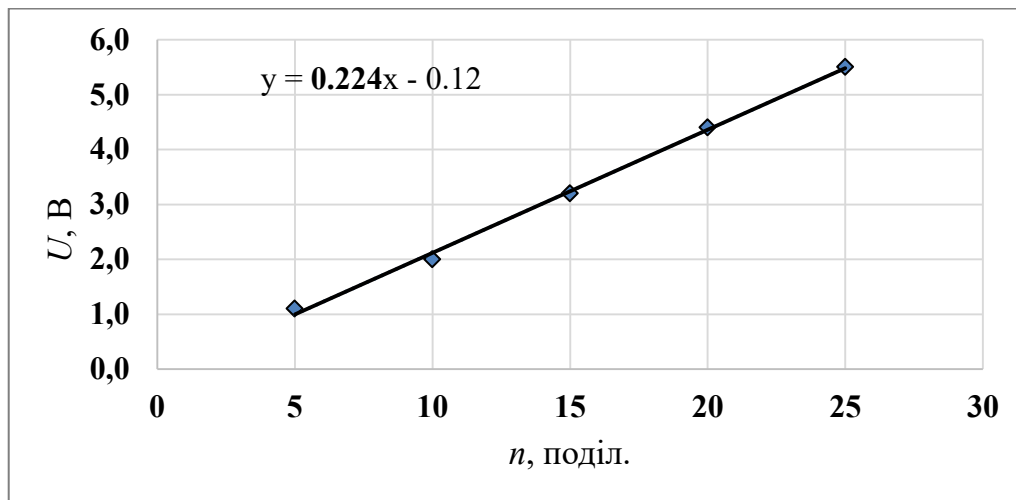
Розрахунки шуканих величин

$R_D$ , Ом	$\Delta U/\Delta n$ , В/поділ.	$K$ , В/поділ.	$S$ , поділ./В

Приклад графіка 8.1



Приклад графіка 8.2



### Контрольні запитання

1. Що називають електричним струмом?
2. Дайте визначення сили та густини струму.
3. Що таке напруга на ділянці кола, різниця потенціалів, ЕРС?
4. Дайте визначення опору. Від яких величин і як залежить опір провідника?
5. Що таке шунт? Як його використовують та яким чином вмикають в коло?
6. У яких випадках виникає потреба у застосуванні додаткового опору?
7. Як розрахувати опір шунта? Як розрахувати опір додаткового опору?
8. Що означає проградувати прилад?
9. Що таке ціна поділки і чутливість приладу?
10. Сформулюйте правила Кірхгофа. Доповніть їх правилами знаків.

### ГРАДУЮВАННЯ ТЕРМОПАРИ

---

#### Мета роботи:

- вивчити термоелектричні явища;
  - проградувати термопару;
  - ознайомитись з методом вимірювання температури за допомогою термопари.
- 

#### Список обладнання:

- диференціальна термопара;
  - гальванометр;
  - нагрівник;
  - термометри;
  - з'єднувальні провідники.
- 

#### Долабораторна підготовка

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: класична теорія електропровідності металів; робота виходу електронів з металу; контактна різниця потенціалів; термоелектричні явища та їхнє практичне використання.

#### Теоретичні основи

Термоелектричні явища – це явища, зумовлені взаємозв'язком між тепловими та електричними процесами, що виникають у контактах із різних металів або напівпровідників. Під час пропускання струму через коло, що складається з різнорідних металів (рис. 9.1), крім тепла Джоуля – Ленца, в одних спаях відбувається виділення, а в інших – поглинання додаткового тепла.

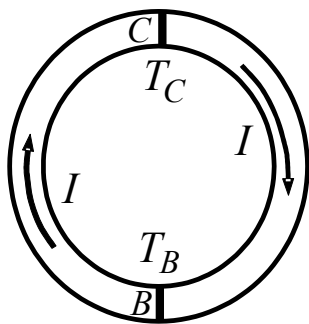


Рис. 9.1

Фізичний зміст цього явища полягає в тому, що носії струму (електрони) в різних металах мають різне значення потенціальної енергії, тому в разі переходу через спай в ділянку з нижчим рівнем потенціальної енергії, вони віддають надлишок

енергії кристалічній ґратці, унаслідок чого спай нагрівається. За зворотного переходу носіїв струму відбувається охолодження спаю. Це явище, назване ім'ям *Пельтьє*, використовують, наприклад, для створення холодильних установок.

Якщо здійснити контакт двох різних металів, між ними виникає *контактна різниця потенціалів* зумовлена тим, що робота виходу електронів з цих металів неоднакова, оскільки різними є рівні потенціальної енергії цих електронів (рівні Фермі). *Рівень Фермі* – це найвищий енергетичний рівень, який мають електрони за абсолютного нуля температур. У разі виникнення контакту між металами електрони з металу з більш високим рівнем Фермі (тобто з меншою роботою виходу) почнуть переходити на більш низькі вільні рівні другого металу, в якому рівень Фермі знаходиться нижче. Перехід буде відбуватися доти, доки рівні Фермі не вирівняються. Величину цієї різниці потенціалів, наприклад, для контакту *C* (рис. 9.1), визначають за формулою:

$$\Delta\varphi_C = \frac{A_2 - A_1}{e} + \frac{kT_C}{e} \ln \frac{n_1}{n_2},$$

де  $A_1$  і  $A_2$  – робота виходу електронів з першого і другого металів,  $e$  – заряд електрона,  $k$  – стала Больцмана;  $T_C$  – температура контакту *C*;  $n_1$  та  $n_2$  – концентрація електронів у першому і другому металах.

Якщо контакти з'єднати в точці *B* і підтримувати цей контакт за температури  $T_B$ , то між точками кола *BC* виникне різниця потенціалів, що дістала назву *термоелектрорушійна сила* (термо-ЕРС):

$$\varepsilon = \Delta\varphi_B - \Delta\varphi_C = (T_B - T_C) \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}.$$

Позначимо:

$$\alpha = \frac{k}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}.$$

Тоді:

$$\varepsilon = \alpha(T_B - T_C) \quad (9.1)$$

Отже, якщо спаї *C* і *B* (рис. 9.1) підтримувати за різних температур, то у колі потече струм. Це явище відкрито Зеєбеком і назване на його честь.

Коефіцієнт у формулі (9.1) називають *питомою термоелектрорушійною силою* цієї пари металів, що визначає величину,

## Лабораторна робота 9. ГРАДУЮВАННЯ ТЕРМОПАРИ

на яку змінюється електрорушійна сила внаслідок зміни різниці температур спаїв на 1 К:

$$\alpha = \frac{\delta \mathcal{E}}{\delta(\Delta T)}. \quad (9.2)$$

Для більшості пар металів значення *питомої термоелектрорушійної сили* становить порядку  $10^{-5} \div 10^{-4}$  В/К, тоді як для напівпровідників значення  $\alpha$  може бути значно більшим і сягати  $1,5 \cdot 10^{-3}$  В/К.

В основі дії приладів для вимірювання температур (термопар) покладено явище Зеебека. *Термопара* – це пристрій, що складається із контакту (спаю) двох різних металів (або сплавів) та приладу для реєстрації термоструму, наприклад, гальванометра (рис. 9.2).

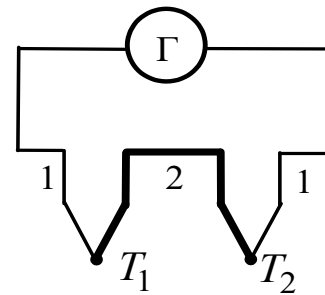


Рис. 9.2

Принцип дії термопари (в цьому випадку – *диференціальної термопари*) полягає у тому, що один спай вміщують у середовище, температуру якого слід виміряти, а другий – у середовище з відомою сталою температурою (наприклад, у посудину з льодом за  $0^\circ\text{C}$ ). Термопари мають ряд переваг порівняно зі звичайними термометрами: по-перше, вони дають можливість визначати температуру в широкому діапазоні (від десятків до тисяч градусів абсолютної шкали), по-друге фіксувати її зміну до сотих та тисячних градусів.

Можливість встановлення гальванометра на значному віддаленні від термопари дає змогу проводити дистанційне вимірювання температури. Вимірювати, наприклад, можна розподіл температурного поля в будівельних конструкціях у процесі їхнього виготовлення або експлуатації. Досліджуючи фізико-хімічні процеси, які відбуваються під час формування структури будівельного матеріалу, широко використовують диференціальний термографічний аналіз, у якому теплота, що виділяється або поглинається матеріалами, також вимірюється за допомогою термопар.

*Мета цієї лабораторної роботи – проградуювати термопару, тобто встановити залежність між термо-ЕРС  $\mathcal{E}$  та різницею температур гарячого та холодного спаїв термопари  $\Delta T$ , побудувати графік та за його*

градієнтом визначити значення питомої термо-ЕРС (згідно з формулою 9.2).

### Обладнання

Установка для градуювання термопари (рис. 9.3) складається з диференціальної термопари 1; приладу для вимірювання термоструму (гальванометра) 2; термометра гарячого спаю термопари 3, нагрівника 4. Холодний спай термопари перебуває за кімнатної температури, та вимірюється термометром 5.

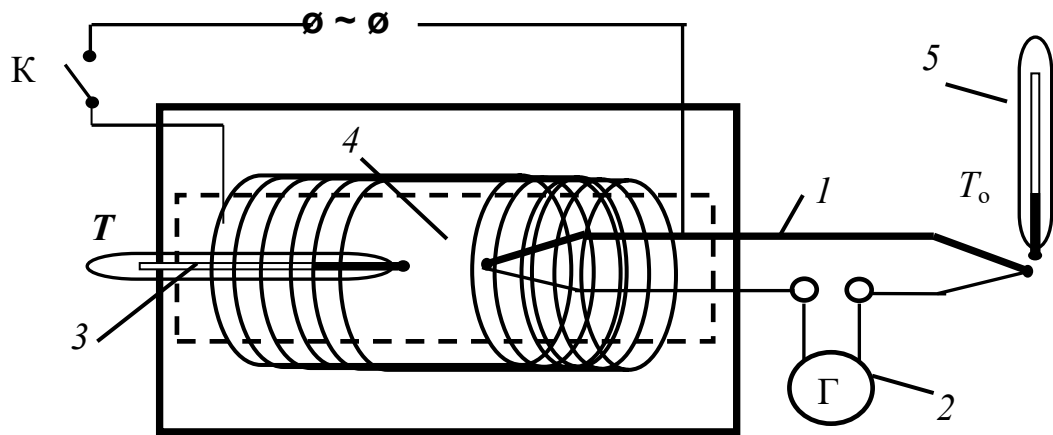


Рис. 9.3

### Експериментальна процедура

До початку виконання досліду підготувати таблиці 9.1 та 9.2 у програмі Excel.

1. Визначити вказані на гальванометрі:  $C_{\Gamma}$  – ціну поділки шкали гальванометра та  $R_{\Gamma}$  – його внутрішній опір.
2. Визначити температуру холодного спаю  $T_0$ , яка дорівнює температурі навколишнього повітря.
3. Ввімкнути нагрівник 4 (рис. 9.3).
4. Визначити кількість поділок  $n$  гальванометра, який вимірює термострум, та відповідну до них температуру гарячого спаю  $T$ .
5. Виміри зробити для кількості не менше за 8-10 значень.
6. Вимкнути нагрівник.
7. У процесі охолодження термопари фіксувати температуру гарячого спаю  $T$ , яка відповідає тим самим показникам гальванометра  $n$ .
8. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 9.1.

### Розрахунки

Всі розрахунки та побудову графіків виконувати у програмі Excel.

1. Розрахувати термо-ЕРС у вольтах:  $\varepsilon = n \cdot C_{\Gamma} \cdot R_{\Gamma}$ .
2. Обчислити середні арифметичні значення температур  $T_{\text{сер}}$ .
3. Обчислити  $\Delta T = T_{\text{сер}} - T_0$  – різницю середньої температури гарячого  $T_{\text{сер}}$  та холодного спаїв термопари  $T_0$ .
4. У програмі Excel побудувати графічну залежність  $\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T$ .
5. Показати на графіку лінію тренда, що має бути прямою.
6. Задати на графіку рівняння лінії тренда та визначити з нього значення градієнта – питому термо-ЕРС  $\alpha$  (дивись приклад графіка 9.1).
7. Записати отриманий результат питомої термо-ЕРС до таблиці 9.2.
8. Подати звіт у вигляді таблиць та графіків у програмі Excel.

### Лабораторний звіт

Таблиця 9.1

Задані та виміряні величини

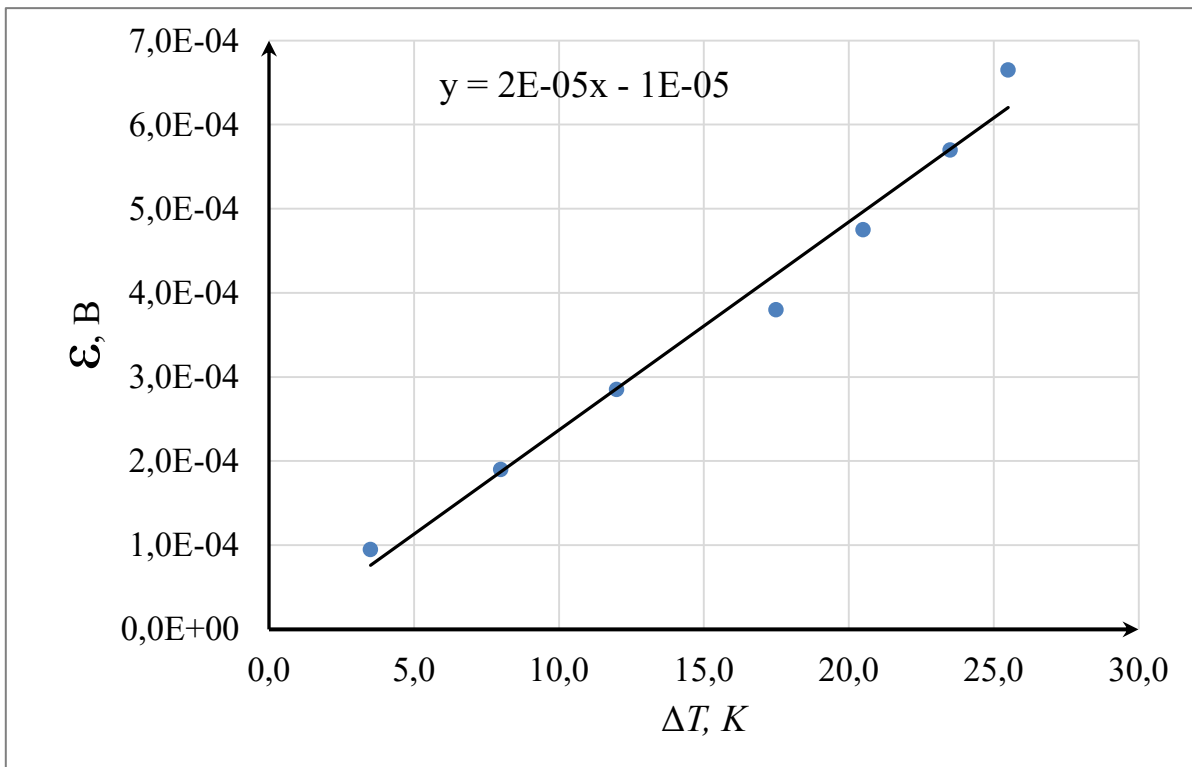
Ціна поділки шкали гальванометра $C_{\Gamma}$ , А/под.	Внутрішній опір гальванометра $R_{\Gamma}$ , Ом	Температура холодного спаю термопари, $T_0$ , °С	Поділки гальванометра, $n$	Температура гарячого спаю термопари, $T$ , °С	
				під час нагрівання	під час охолодження

Таблиця 9.2

Розрахунки шуканих величин

Термо-ЕРС $\varepsilon$ , В	Середнє значення температури гарячого спаю термопари, $T_{\text{сер}}$ , °С	Різниця температур $\Delta T = T_{\text{сер}} - T_0$ , °С	Питома термо-ЕРС $\alpha$ , В/К

Приклад графіка 9.1



### Контрольні запитання

1. Що таке термоелектричні явища?
2. Поясніть фізичну суть явища Зеєбека та Пельтьє.
3. Що таке рівень Фермі?
4. Як виникає контактна різниця потенціалів?
5. Дайте визначення термоелектрорушійної сили.
6. Який фізичний зміст питомої термо-ЕРС  $\alpha$ ?
7. Що таке термопара?
8. Що означає «проградувати термопару»?
9. Застосування термопари та її переваги над іншими приладами для вимірювання температури.

## ***ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗАНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ІНДУКЦІЇ ТА НАПРУЖЕНОСТІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ***

---

### **Мета роботи:**

- ознайомитись з характеристиками магнітного поля та особливостями земного магнетизму;
  - вивчити закон Ампера, його застосування та принцип суперпозиції магнітних полів;
  - вивчити закон Біо-Савара-Лапласа та його застосування;
  - визначити горизонтальну складову індукції та напруженості магнітного поля Землі за допомогою тангенс-гальванометра.
- 

### **Список обладнання:**

- установка (тангенс-гальванометр);
  - амперметр;
  - джерело струму;
  - реостат;
  - з'єднувальні провідники.
- 

### **Долабораторна підготовка**

*Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал:* магнітне поле; індукція та напруженість магнітного поля; закон Ампера; принцип суперпозиції магнітних полів; закон Біо – Савара – Лапласа; магнітне поле колового провідника зі струмом; напруженість магнітного поля.

### **Теоретичні основи**

*Магнітне поле є складовою електромагнітного поля, що є особливою формою матерії, через яку відбувається магнітна взаємодія, виникає навколо рухомих заряджених частинок, провідників зі струмом, магнітів або тіл, що мають магнітні властивості, діє на ці об'єкти, а також спричиняється змінним у часі електричним полем).*

**Лабораторна робота 10. ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ТА НАПРУЖЕНОСТІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ**

Основною силовою характеристикою магнітного поля є вектор магнітної індукції  $\vec{B}$  – векторна величина, означення якої можна подати трьома рівноправними способами: за дією магнітного поля на елемент струму (закон Ампера), за дією магнітного поля на рухома заряджену частинку (сила Лоренца) та за обертальною дією магнітного поля на рамку зі струмом.

Магнітне поле можна зобразити графічно за допомогою *ліній магнітної індукції* (магнітними силовими лініями), тобто кривими, дотичні до яких в кожній точці збігаються з напрямком вектора  $\vec{B}$  у цих точках (на рис. 10.1 це тонкі лінії).

Другою характеристикою магнітного поля є напруженість  $\vec{H}$ , яка *не залежить* від магнітних властивостей середовища. У випадку однорідного та ізотропного середовища

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \quad (10.1)$$

де  $\mu$  – відносна магнітна проникність середовища;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна стала.

Застосування компаса, магнітна стрілка якого завжди встановлюється в кожному місці Землі певним чином, свідчить про те, що Земля є магнітом і що у навколосемному просторі є магнітне поле. Північний магнітний полюс – умовна точка на земній поверхні, в якій магнітне поле Землі спрямоване строго донизу (під кутом  $90^\circ$  до поверхні). Слід зазначити, що з фізичного погляду цей полюс є «південним»  $S$ , оскільки притягує північний полюс стрілки компаса  $N$  (рис. 10.1).

Магнітні полюси Землі не збігаються з її географічними полюсами (рис. 10.1). Магнітні полюси

повільно дрейфують. Наприклад, у 1600 році магнітний полюс північної

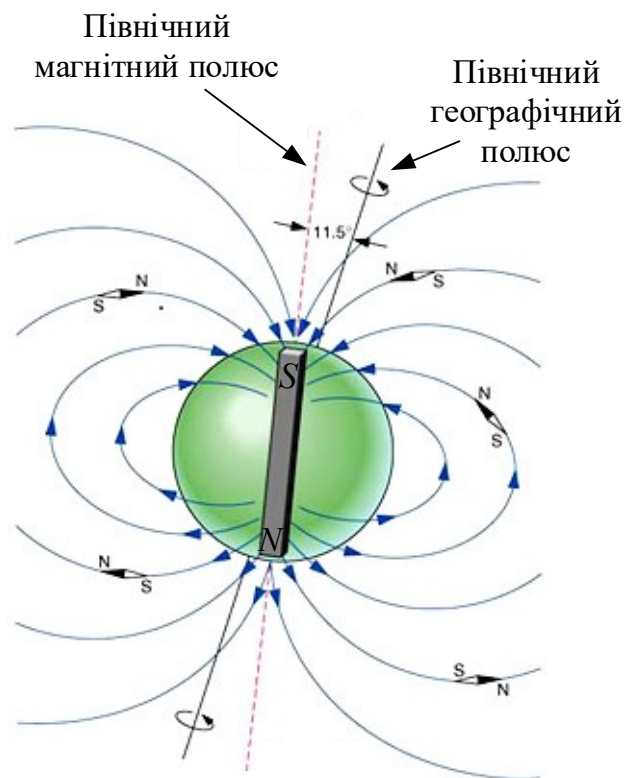


Рис. 10.1

**Лабораторна робота 10. ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ТА НАПРУЖЕНОСТІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ**

півкулі знаходився на відстані близько 1300 км від географічного полюса, а тепер ця відстань становить майже 2100 км.

Унаслідок розходження магнітних та географічних полюсів між площиною магнітного меридіана (у цій площині встановлюється стрілка компаса) і площиною географічного меридіана для кожного місця Землі завжди є певний кут, який називається кутом схилення. Стрілка компаса встановлюється не горизонтально до поверхні Землі, а під деяким кутом, який називається кутом нахилу. Це означає, що *лінії магнітного поля не паралельні поверхні Землі, а дещо нахилені*. Кут нахилу є неоднаковим для різних точок Землі. Силкові лінії магнітного поля Землі на екваторі напрямлені горизонтально до її поверхні, біля магнітних полюсів – вертикально, а в усіх інших місцях – під деяким кутом. Таким чином, магнітне поле у кожній точці Землі характеризується горизонтальною складовою напруженості магнітного поля (проекцією напруженості магнітного поля на горизонтальну площину), кутами схилення і нахилення.

Для визначення горизонтальної складової магнітної індукції  $B_{\Gamma}$  магнітного поля Землі у цій лабораторній роботі користуються тангенс-гальванометром, схему якого показано на рис 10.2.

Тангенс-гальванометр складається з колової рамки, на яку намотано  $N$  витків провідника. Магнітна стрілка, насаджена на вертикальну вісь, може вільно обертатись тільки у горизонтальній площині, тому за її допомогою можна визначити тільки горизонтальну складову індукції магнітного поля Землі. Під час проходження струму витком провідника магнітна, стрілка буде перебувати під дією двох магнітних полів (рис. 10.3): горизонтальної складової магнітної індукції

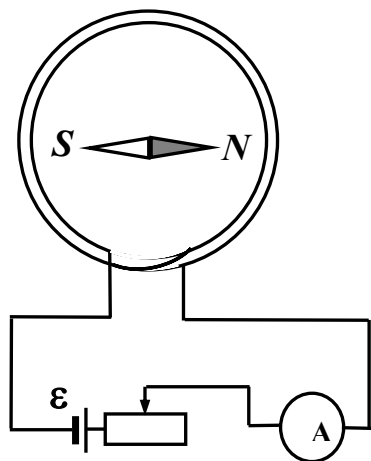


Рис. 10.2

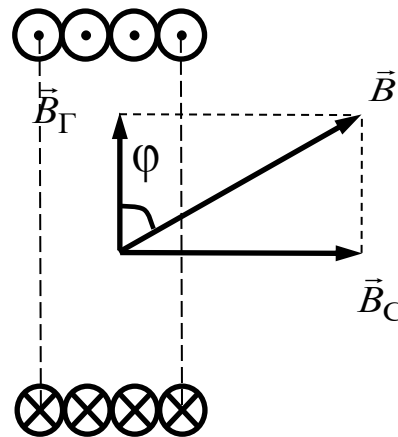


Рис. 10.3

**Лабораторна робота 10. ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ТА НАПРУЖЕНОСТІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ**

поля Землі  $B_{\Gamma}$  та магнітного поля струму  $B_C$ . Стрілка встановлюється (згідно з принципом суперпозиції магнітних полів) у напрямку *рівнодійної* індукції  $\vec{B}$  цих магнітних полів:

$$\vec{B} = \vec{B}_{\Gamma} + \vec{B}_C.$$

Оскільки, за відсутності струму у рамці вісь магнітної стрілки збігається з площиною рамки, то кут між  $B_{\Gamma}$  і  $B_C$  є прямим, а величини  $B_{\Gamma}$  і  $B_C$  пов'язані між собою співвідношенням (рис. 10.3):

$$\vec{B}_{\Gamma} = \vec{B}_C \cdot \text{ctg}\varphi, \quad (10.2)$$

де  $\varphi$  – кут відхилення магнітної стрілки (кут між векторами горизонтальної складової магнітної індукції поля Землі  $B_{\Gamma}$  та рівнодійної індукції  $B$  (рис. 10.3).

За *законом Біо – Савара – Лапласа* індукція магнітного поля в центрі контуру у вигляді кола зі струмом  $I$ :

$$B_C = \mu\mu_0 \frac{NI}{2R}, \quad (10.3)$$

де  $R$  – радіус рамки;  $I$  – сила струму;  $N$  – кількість витків рамки;  $\mu_0$  – магнітна стала;  $\mu$  – відносна магнітна проникність середовища (у даному випадку  $\mu = 1$ ).

Враховавши 10.2 та 10.3, формула для розрахунку горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі буде:

$$B_{\Gamma} = \mu\mu_0 \frac{IN}{2R} \text{ctg}\varphi, \quad (10.4)$$

Крім того, застосувавши зв'язок між вектором магнітної індукції та напруженістю магнітного поля (10.1) можна розрахувати середнє значення горизонтальної складової напруженості магнітного поля Землі:

$$\vec{H}_{\Gamma\text{сер}} = \frac{\vec{B}_{\Gamma\text{сер}}}{\mu\mu_0}. \quad (10.5)$$

---

### Обладнання

Для виконання роботи використовують тангенс-гальванометр (рис. 10.2), амперметр для вимірювання невеликого струму  $I$ , реостат для зміни значення струму у витках рамки та джерело струму. Тангенс кута відхилення магнітної стрілки пропорційний силі колового струму, тому прилад, який застосовується в цій роботі для визначення горизонтальної

складової індукції та напруженості магнітного поля Землі й має назву «Тангенс-гальванометр». Значення кількості витків рамки  $N$  та радіуса рамки  $R$  вказано на установці.

---

### **Експериментальна процедура**

*До початку виконання досліду підготувати таблицю 10.1 та 10.2 у програмі Excel.*

1. Скласти електричне коло за схемою, що показана на рис. 10.2.
2. Рамку розмістити так, щоб магнітна стрілка була розташована в площині рамки.
3. Звільнити магнітну стрілку з допомогою аретиру.
4. Визначити ціну поділки амперметра.
5. Замкнути коло, реостатом встановити значення струму, вказане викладачем.
6. Визначити кут відхилення стрілки  $\varphi'$ .
7. Збільшуючи силу струму реостатом, задати ще два значення сили струму та визначити відповідні кути відхилення стрілки  $\varphi'$ , на які магнітна стрілка відхилилась від нуля праворуч.
8. Розімкнути коло та змінити полярність приєднання котушки, замкнути коло і реостатом встановити значення струму таке саме, як в п. 5.
9. Визначити кут відхилення стрілки  $\varphi''$ , на який магнітна стрілка відхилилась від нуля ліворуч.
10. Збільшуючи силу струму реостатом визначити відповідні кути відхилення стрілки  $\varphi''$ , на які магнітна стрілка відхилилась від нуля ліворуч за тих самих значеннях струму, що й у п.7.
11. Визначити значення кількості витків рамки  $N$  та радіуса рамки  $R$ .
12. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 10.1.

---

### **Розрахунки**

*Всі розрахунки виконувати у програмі Excel.*

1. Знайти середні значення кута відхилення для кожного із значень сили струму.
2. Обчислити значення  $B_T$  за формулою (10.4) для всіх значень сили струму

**Лабораторна робота 10. ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ТА НАПРУЖЕНОСТІ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ**

3. Знайти середнє значення  $B_{Гсер}$ .
4. Визначити похибки вимірювання  $B_{Г}$ .
5. Обчислити середнє значення  $H_{Гсер}$  за формулою (10.5)
6. Усі розрахунки записати до таблиці 10.2.
7. Подати звіт у вигляді таблиць у програмі Excel.

**Лабораторний звіт**

*Таблиця 10.1*

*Задані та виміряні величини*

Номер досліджу	$I, A$	$\varphi'$	$\varphi''$	$N$	$R, m$	$\mu_0, \text{Гн/м}$	$\mu$

*Таблиця 10.2*

*Розрахунки шуканих величин*

Номер досліджу	$\varphi_{сер}$	$B_{Г}, \text{Тл}$	$B_{Гсер}, \text{Тл}$	$H_{Гсер}, \text{А/м}$

**Контрольні запитання**

1. Що називають магнітним полем?
2. Яку силу називають силою Ампера? Сформулюйте правило для визначення напрямку цієї сили.
3. Дайте визначення індукції магнітного поля. Що називають силовими лініями індукції магнітного поля? У чому полягає принцип суперпозиції магнітних полів?
4. У чому полягає різниця між індукцією та напруженістю магнітного поля? Який між ними зв'язок?
5. Зобразіть картину силових ліній магнітного поля Землі.
6. Сформулюйте та запишіть закон Біо – Савара – Лапласа.
7. Виведіть формулу для індукції або напруженості магнітного поля в центрі колового провідника зі струмом.

## ***ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ КОРОТКОГО СОЛЕНОЇДА***

---

### **Мета роботи:**

- ознайомитись з характеристиками магнітного поля;
  - вивчити закон Біо-Савара-Лапласа та принцип суперпозиції магнітних полів;
  - вивчити закон повного струму та його застосування до розрахунку магнітних полів тороїда та соленоїда;
  - вивчити явище електромагнітної індукції;
  - визначити розподіл індукції магнітного поля у просторі навколо осі короткого соленоїда.
- 

### **Список обладнання:**

- короткий соленоїд;
  - вимірювальна котушка;
  - гальванометр;
  - амперметр;
  - джерело струму;
  - перемикач;
  - реостат;
  - з'єднувальні провідники;
  - лінійка.
- 

### **Долабораторна підготовка**

*Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал:* індукція та напруженість магнітного поля; закон Біо – Савара – Лапласа; принцип суперпозиції магнітних полів; напруженість магнітного поля; закон повного струму; розрахунок магнітних полів тороїда та соленоїда; явище електромагнітної індукції, магнітний потік.

### **Теоретичні основи**

Струм, який протікає по провіднику, утворює в навколишньому просторі магнітне поле. Для утворення магнітних полів використовують

**Лабораторна робота 11. ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ КОРОТКОГО СОЛЕНОЇДА**

провідники різних форм та розмірів, серед яких типовим є соленоїд. *Соленоїд* – це провідник, намотаний на циліндричний каркас. Лінії індукції магнітного поля соленоїда зображено на рис. 11.1.

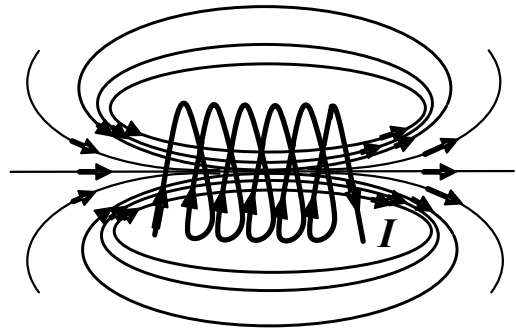


Рис. 11.1

Для розрахунку індукції або напруженості магнітного поля, утвореного провідником зі струмом, можна застосовувати закон Біо – Савара – Лапласа. Проте в деяких випадках (наприклад, в розрахунках поля тороїда або соленоїда) зручно використовувати *закон повного струму*: циркуляція вектора індукції магнітного поля вздовж довільно вибраного у просторі замкненого контуру дорівнює алгебричній сумі струмів, охоплених цим контуром, помноженій на  $\mu_0$ :

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \sum_{i=1}^N I_i, \quad (11.1)$$

де  $\vec{B}$  – індукція магнітного поля в довільній точці вибраного контуру  $L$ ;  $d\vec{\ell}$  – елемент довжини контуру;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна стала;

$\mu$  – відносна магнітна проникність середовища;  $\sum_{i=1}^N I_i$  – алгебрична сума

струмів, охоплених цим контуром.

Розраховуючи алгебраїчну суму струмів, позитивним слід вважати такий струм, напрям якого пов'язаний з напрямком обходу контуру правилом „правого гвинта”; струм протилежного напрямку слід вважати негативним.

Застосовуючи закон повного струму, можна вивести формулу для *індукції магнітного поля  $B$  у центрі довгого соленоїда або тороїда зі струмом  $I$* :

$$B = \mu\mu_0 In_0, \quad (11.2)$$

де  $I$  – струм у витках;  $n_0$  – кількість витків на одиницю довжини соленоїда або тороїда.

Розрахунки, виконані на підставі закону Біо – Савара – Лапласа, дають змогу отримати формулу для індукції магнітного поля в довільній

## Лабораторна робота 11. ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ КОРОТКОГО СОЛЕНОЇДА

точці на осі *короткого соленоїда* – такого соленоїда, довжина якого має практично той самий порядок, що й ширина:

$$B = \mu\mu_0 \frac{n_0 I}{2} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2), \quad (11.3)$$

де  $\alpha_1, \alpha_2$  – кути між віссю соленоїда та радіус-векторами, проведеними з даної точки до кінців соленоїда (рис. 11.2).

Для нескінченно довгого соленоїда  $\alpha_1 \rightarrow 0$ ,  $\alpha_2 \rightarrow 0$ , і вираз (11.3) стає тотожним виразу (11.2).

Враховуючи геометричні розміри соленоїда (рис. 11.2), значення  $\cos \alpha_1$  та  $\cos \alpha_2$  можна виразити через довжину  $l$  та радіус  $r$  соленоїда і вираз (11.3) записати у вигляді:

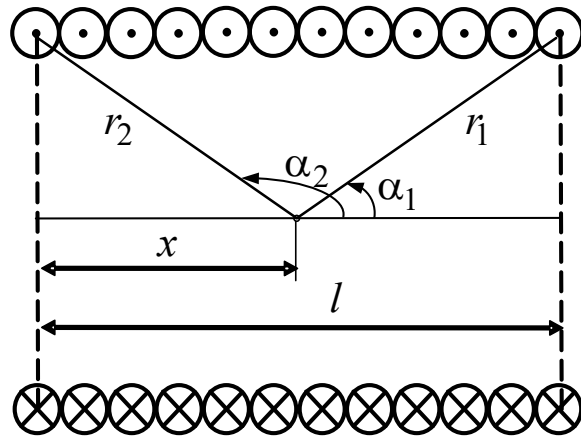


Рис.11.2

$$B = \mu\mu_0 \frac{n_0 I}{2} \left[ \frac{l-x}{\sqrt{(l-x)^2 + r^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + r^2}} \right], \quad (11.4)$$

де  $l, r$  – відповідно довжина та радіус соленоїда;  $x$  – координата точки на осі короткого соленоїда.

Досліджуючи цю функцію на екстремум, можна встановити, що індукція магнітного поля сягає максимуму за  $x = l/2$ . Таким чином, індукція магнітного поля, максимальна у *центрі короткого соленоїда*, дорівнює:

$$B_0 = \mu\mu_0 n_0 I \frac{l}{\sqrt{4r^2 + l^2}}. \quad (11.5)$$

У даній роботі для визначення індукції магнітного поля в різних точках осі короткого соленоїда використовують *метод балістичного гальванометра*. Балістичний гальванометр – це дзеркальний магнітоелектричний гальванометр з великим періодом власних коливань рамки (10...20 с), з'єднаний з вимірювальною котушкою. Такий період коливань досягається збільшенням моменту інерції рухомої частини приладу або послабленням пружини, що підтримує рівновагу рамки. У процесі вимірювання час протікання струму повинен бути значно

## Лабораторна робота 11. ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ КОРОТКОГО СОЛЕНОЇДА

меншим, ніж період власних коливань рамки. Якщо цієї умови дотримано, максимальне відхилення стрілки гальванометра  $\Phi_{\max}$  пропорційне кількості електричного заряду, який пройшов по колу:

$$\Phi_{\max} = Cq, \quad (11.6)$$

де  $C$  – стала величина.

Для виконання роботи складають коло за схемою, зображеною на рис. 11.3, де застосовано такі позначення:

$C$  – короткий соленоїд;

ВК – вимірювальна котушка;

$\Gamma$  – гальванометр;

$A$  – амперметр;

$E$  – джерело струму;

$R$  – реостат;

$K$  – перемикач.

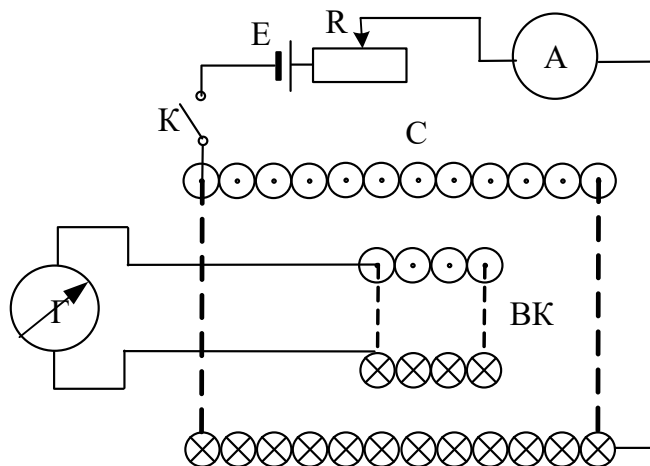


Рис. 11.3

У момент замикання перемикача  $K$  струм у соленоїді зростає від нуля до  $I_{\max}$ , а у вимірювальній котушці (ВК) за рахунок *явища електромагнітної індукції* виникає індукційний струм, що виражається згідно із законом Фарадея:

$$I_{\text{інд}} = \frac{\varepsilon_i}{R} = \frac{1}{R} \left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = \frac{NS}{R} \left| \frac{dB}{dt} \right|, \quad (11.7)$$

де  $\varepsilon_i$  – електрорушійна сила індукції;  $\frac{d\Phi}{dt}$  – зміна магнітного потоку;

$N$  – кількість витків ВК;  $S$ ,  $R$  – відповідно площа перерізу та опір вимірювальної котушки.

За допомогою інтегрування (3.6.7) отримаємо:

$$B = \frac{R}{NS} \int_0^t I_{\text{інд}} \cdot dt = \frac{R}{NS} \cdot q, \quad (11.8)$$

де  $q$  – заряд, який протікає по ВК за короточасної зміни сили струму в короткому соленоїді.

Враховуючи (11.6) та (11.8), остаточно отримаємо:

$$B = \frac{R}{NSC} \Phi_{\max} = K\Phi_{\max}, \quad (11.9)$$

## Лабораторна робота 11. ВИВЧЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ КОРОТКОГО СОЛЕНОЇДА

де  $K$  – стала величина;  $\varphi_{\max}$  – максимальний кут відхилення стрілки балістичного гальванометра.

Отже, між величиною індукції магнітного поля і максимальним кутом відхилення стрілки гальванометра є пропорційний зв'язок.

---

### Експериментальна процедура

До початку виконання дослідів підготувати таблицю 11.1 та 11.2 у програмі Excel.

1. Скласти електричне коло, зображене на рис. 11.3.
  2. Помістити вимірювальну котушку у центрі короткого соленоїда.
  3. За допомогою реостата виставити значення струму  $I$  (задається викладачем).
  4. В момент замикання вимикача визначити максимальний кут відхилення стрілки гальванометра  $\varphi_{0\max}$  у центрі короткого соленоїда.
  5. Визначити значення довжини  $l$  та радіусу  $r$  соленоїда
  6. Послідовно розташовуючи вимірювальну котушку в різних точках на осі соленоїда, виміряти координати  $x$  та максимальні кути відхилення стрілки гальванометра  $\varphi_{\max}$  для цих точок.
  7. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 11.1.
- 

### Розрахунки

Всі розрахунки та побудову графіків виконувати у програмі Excel.

1. За формулою (11.5) розрахувати індукцію в центрі соленоїда  $B_0$ .
2. Знаючи  $B_0$  і  $\varphi_{0\max}$  та користуючись за формулою (11.9) визначити сталу  $K$ :

$$K = \frac{B_0}{\varphi_{0\max}}$$

3. За формулою (11.9) розрахувати індукцію магнітного поля  $B$  у відповідних тосках на осі короткого соленоїда.
4. Результати обчислень записати до таблиці 11.2.
5. Визначити похибки вимірювання  $B$ .
6. Побудувати графік залежності  $B = f(x)$ .

## Лабораторний звіт

Таблиця 11.1

Задані та виміряні величини

№ пор.	$I$ , А	$\Phi_{0\max}$	$l$ , м	$r$ , м	$x$ , м	$\Phi_0$

Таблиця 11.2

Розрахунки шуканих величин

№ пор.	$B_0$ , Тл	$K$ , Тл/рад	$B$ , Тл

### Контрольні запитання

1. Що називають магнітним полем?
2. Дайте визначення індукції та напруженості магнітного поля. Як вони пов'язані між собою?
3. Сформулюйте закон Біо – Савара – Лапласа.
4. Запишіть закон повного струму.
5. Що таке соленоїд? Який соленоїд називають довгим, коротким?
6. Що називають силовими лініями індукції магнітного поля?
7. Зобразіть та поясніть картину силових ліній магнітного поля короткого соленоїда.
8. Виведіть формулу для визначення індукції магнітного поля на осі нескінченно довгого соленоїда із закону повного струму.
9. Який метод слід застосувати в цій роботі для визначення індукції магнітного поля короткого соленоїда?
10. Сформулюйте визначення явища електромагнітної індукції та запишіть для нього формулу Фарадея.
11. Запишіть та поясніть формулу магнітного потоку.
12. Поясніть появу струму у вимірювальній котушці ВК схеми (11.3).

## ***ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА МЕТОДОМ СХРЕЩЕНИХ ПОЛІВ***

---

### **Мета роботи:**

- вивчити рух заряджених частинок в електричному та магнітному полях;
  - визначити питомий заряд електрона.
- 

### **Список обладнання:**

- електронна лампа (діод);
  - амперметр;
  - міліамперметр;
  - вольтметр;
  - потенціометри;
  - реостат;
  - джерела живлення;
  - з'єднувальні провідники.
- 

### **Долабораторна підготовка**

*Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал:* сила Лоренца; рух заряджених частинок в електричному та магнітному полях.

### **Теоретичні основи**

Відомо, що на заряджену частинку, яка рухається у магнітному полі, діє сила Лоренца

$$\vec{F}_L = q[\vec{v} \times \vec{B}],$$

модуль якої дорівнює

$$F_L = qvB \sin \alpha, \quad (12.1)$$

де  $q$ ,  $v$  – відповідно заряд та швидкість рухомої частинки;  $\alpha$  – кут між напрямками векторів швидкості  $\vec{v}$  та магнітної індукції  $\vec{B}$ .

**Лабораторна робота 12. ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА МЕТОДОМ СХРЕЩЕНИХ ПОЛІВ**

Рух зарядженої частинки в електричному та магнітному полях залежить, як від величини заряду, так і від маси, які входять в рівняння руху у вигляді відношення  $q/m$ , яке називають *питомим зарядом*. Для визначення питомого заряду електрона  $e/m$  розглянемо його рух в однорідному магнітному полі.

Нехай електрон влітає в однорідне магнітне поле під прямим кутом до напрямку силових ліній магнітного поля. У цьому випадку сила Лоренца спричиняє доцентрове прискорення, тобто  $F_{\text{л}} = ma_{\text{доц}}$ , отже, враховуючи (12.1) та  $\sin \alpha = 1$ , маємо:

$$e \cdot v \cdot B = (mv^2/R). \quad (12.2)$$

З формули (12.2) величина питомого заряду електрона дорівнюватиме:

$$\frac{e}{m} = \frac{v}{B \cdot R}. \quad (12.3)$$

Для експериментального визначення питомого заряду електрона скористаємося електронною лампою з циліндричними катодом К та анодом А, яку помістимо коаксіально всередину довгого соленоїда С (рис. 12.1). Якщо прикласти між анодом та катодом достатньо велику напругу, то електрони, що «вириваються» з катода внаслідок його нагрівання струмом, полетять до анода. Амперметр А буде фіксувати деякий анодний струм  $I_a$  (рис. 12.1).

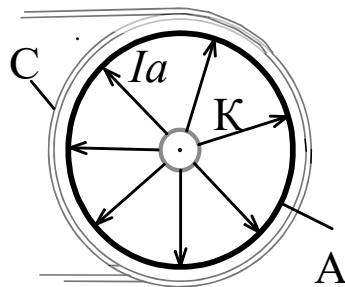


Рис. 12.1

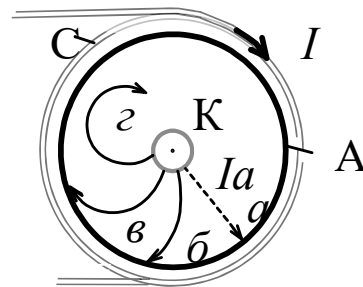


Рис. 12.2

Швидкість, якої набуває електрон, прискорений електричним полем лампи, в момент попадання на анод можна знайти із закону збереження енергії електрона:

$$v = \sqrt{\frac{2eU_A}{m}}, \quad (12.4)$$

**Лабораторна робота 12. ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА МЕТОДОМ СХРЕЩЕНИХ ПОЛІВ**

де  $U_A$  – напруга між катодом та анодом у лампі (іншими словами – анодна напруга).

Приєднаємо соленоїд до деякого джерела ЕРС. В соленоїді з’явиться електричний струм  $I$ , а навколо соленоїда виникне магнітне поле. Індукція магнітного поля  $B$  всередині соленоїда за законом Біо – Савара – Лапласа буде визначатись силою струму  $I$  в соленоїді:

$$B = \mu_0 I \cdot n, \quad (12.5)$$

де  $n$  – кількість витків соленоїда на одиницю довжини.

Усередині соленоїда магнітне поле напрямлене вздовж вісі лампи, тому на електрони, що рухаються під дією електричного поля між катодом та анодом (перпендикулярно магнітному полю), почне діяти сила Лоренца (12.1).

Під дією цієї сили траєкторії електронів будуть викривлюватись, причому тим сильніше, чим більша величина магнітного поля (чим більший струм в соленоїді) (рис. 12.2, б, в). За деякого критичного значення струму в соленоїді  $I = I_{кр}$  траєкторії електронів перетворяться на коло і струм в анодному колі зникне  $I_A = 0$  (рис. 12.2, з).

У момент падіння анодного струму до нуля радіус кола, по якому рухаються електрони, дорівнює:

$$R_{кр} = (r_A - r_K) / 2, \quad (12.6)$$

де  $r_A, r_K$  – відповідно радіуси анода та катода електронної лампи.

Теоретично залежність анодного струму від індукції магнітного поля має вигляд, показаний на рис. 12.3 суцільною лінією. Але, оскільки електрони вилітають з катода з різними швидкостями, дійсна

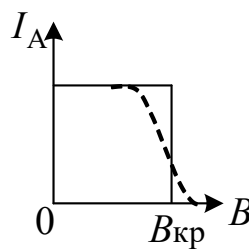


Рис. 12.3

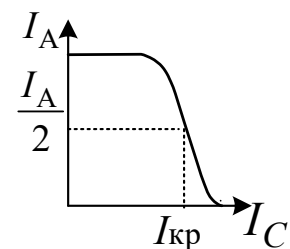


Рис. 12.4

залежність має вигляд, показаний на рис. 12.3 пунктирною лінією. Тобто в разі наближення  $B$  до  $B_{кр}$  струм уже починає спадати, і навіть коли  $B > B_{кр}$ , струм іще існує. Тобто насправді струм спадає не миттєво, а поступово.

**Лабораторна робота 12. ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА МЕТОДОМ СХРЕЩЕНИХ ПОЛІВ**

З рівнянь (12.3) – (12.6) виразимо питомий заряд електрона через величини, які в умовах лабораторної роботи можна знайти експериментально:

$$\frac{e}{m} = \frac{8 \cdot U_A}{(\mu_0 \cdot I_{кр} \cdot n)^2 \cdot (r_A - r_K)^2}. \quad (12.7)$$

Таким чином, для експериментального визначення питомого заряду електрона достатньо знайти критичне значення сили струму в соленоїді  $I_{кр}$  за певного фіксованого значення анодної напруги  $U_A$ .

Для цього потрібно:

- 1) на підставі експериментальних даних побудувати графік залежності анодного струму  $I_A$  від струму в соленоїді  $I_C$  за певного значення  $U_A$  (рис. 12.4);
- 2) знайти на графіку критичне значення сили струму в соленоїді  $I_{кр}$ , за якого струм падає до  $I_A/2$  (рис. 12.4).

---

**Обладнання**

Лабораторна установка (рис. 12.5) складається з електронної лампи Л (діода), соленоїда С, витки якого охоплюють лампу, реостата R, потенціометра П, двох блоків живлення (220 В), вольтметра, амперметра та міліамперметра. Реостат R змінює силу струму у соленоїді  $I_C$ , яка вимірюється амперметром А. За допомогою потенціометра П задається значення анодної напруги  $U_A$ , яка вимірюється вольтметром V. Міліамперметр mA вимірює анодний струм  $I_A$ .

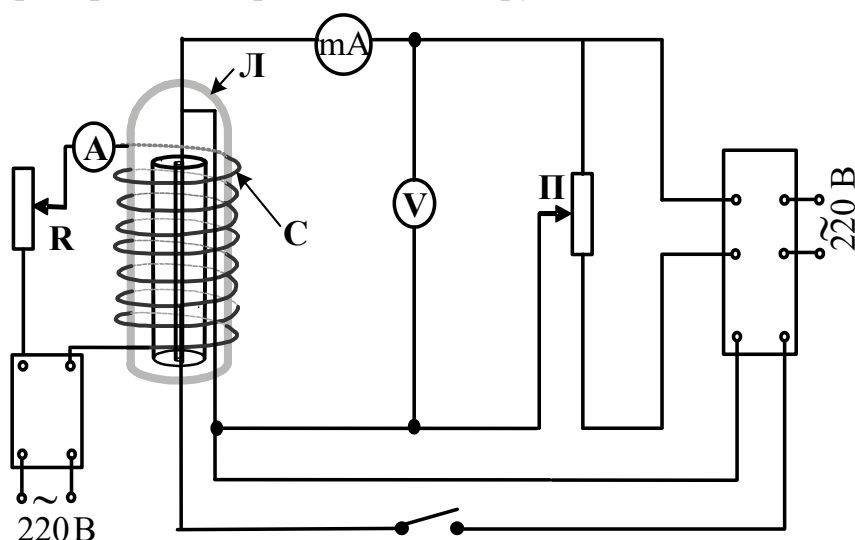


Рис. 12.5

---

### Експериментальна процедура

До початку виконання досліду підготувати таблицю 12.1 та 12.2 у програмі Excel.

1. Ознайомитись з лабораторною установкою, використовуючи схему (рис. 12.5).
2. Визначити значення радіуса анода  $r_A$ , катода  $r_K$  електронної лампи та кількість витків соленоїда на одиницю довжини  $n$ .
3. Знайти табличне значення питомого заряду електрона.
4. Встановити анодну напругу  $U_{A1}$  (вказує викладач).
5. Виміряти анодний струм  $I_A$  за різних значень струму в соленоїді  $I_C$ .
6. Повторити п. 4 для іншого значення анодної напруги  $U_{A1}$  (вказує викладач).
7. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 12.1.

---

### Розрахунки

Всі розрахунки та побудову графіків виконувати у програмі Excel.

1. Побудувати графік залежності анодного струму від струму в соленоїді  $I_A = f(I_C)$  (рис. 12.4).
2. За графіком визначити критичне значення сили струму  $I_{кр}$  в соленоїді, за якого анодний струм падає до  $I_A/2$ .
3. За формулою (12.7) розрахувати питомий заряд електрона для кожного значення анодної напруги.
4. Результати записати до таблиці 12.2.
5. Знайти середнє значення для величини питомого заряду електрона та порівняти з табличними даними.
6. Розрахувати швидкість  $v$ , якої набуває електрон, за формулою (12.4), використовуючи визначене значення питомого заряду електрона для двох значень анодної напруги.

---

### Лабораторний звіт

Таблиця 12.1

Задані та виміряні величини

№ пор.	$r_A$ , м	$r_K$ , м	$n$ , м <sup>-1</sup>	$\mu_0$ , Гн/м	$U_A$ , В	$I_A$ , мА	$I_C$ , А	$(q/m)_{\text{табл}}$ , Кл/кг

Таблиця 12.2

Розрахунки шуканих величин

№ пор.	$I_A/2, \text{ А}$	$I_{кр}, \text{ А}$	$n, \text{ м}^{-1}$	$q/m, \text{ Кл/кг}$	$(q/m)_{сер}, \text{ Кл/кг}$	$v_1, \text{ м/с}$	$v_2, \text{ м/с}$

### Контрольні запитання

1. Що називають магнітним полем?
2. Що називають силою Лоренца? Запишіть формулу для цієї сили.
3. Сформулюйте правило для визначення напрямку сили Лоренца.
4. Чи виконує сила Лоренца роботу? Чи змінюється швидкість зарядженої частинки, що влітає в постійне магнітне поле?
5. Якою буде траєкторія зарядженої частинки, що влетіла в магнітне поле:
  - а) перпендикулярно силовим лініям індукції магнітного поля;
  - б) за умов, коли кут не є прямим?
6. Виведіть формулу для розрахунку питомого заряду частинки, яка влітає в магнітне поле. Чому дорівнює її період обертання?
7. Від чого залежить радіус кривизни траєкторії зарядженої частинки, що влітає в магнітне поле?
8. Наведіть приклади прояву руху заряджених частинок в природі та застосування в науці та техніці.

### **ВИЗНАЧЕННЯ ККД ТРАНСФОРМАТОРА**

---

#### **Мета роботи:**

- вивчити явища самоіндукції та взаємоіндукції;
  - визначити залежність ККД трансформатора від струму навантаження.
- 

#### **Список обладнання:**

- трансформатор;
  - ватметр;
  - амперметри;
  - джерело струму;
  - навантаження;
  - реостат;
  - з'єднувальні провідники.
- 

#### **Долабораторна підготовка**

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: явище електромагнітної індукції; явище самоіндукції; індуктивність; явище взаємної індукції, трансформатор.

#### **Теоретичні основи**

Явище виникнення електрорушійної сили індукції в замкненому контурі, розміщеному близько до замкненого контуру, в якому тече змінний струм, називають *явищем взаємної індукції*.

Контури зі змінними струмами, в яких виникає явище взаємоіндукції через взаємне перетинання магнітних потоків, мають *індукційний зв'язок*. Електрорушійні сили  $\mathcal{E}_i$ , що виникають унаслідок взаємоіндукції, пропорційні швидкості змін струмів у контурах, які мають індуктивний зв'язок (за законом Генрі):

$$\mathcal{E}_{i1} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt} \quad \text{та} \quad \mathcal{E}_{i2} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt},$$

де  $L_{12} = L_{21}$ , і мають назву *коефіцієнтів взаємної індуктивності контурів*.

Коефіцієнти взаємодукції, які є мірою магнітного зв'язку між контурами, залежать від геометричної форми, розмірів і взаємного розміщення контурів зі струмом, а також від магнітних властивостей середовища, у якому розміщені контури.

На практиці для збільшення значення  $L_{12}$  обидва контури насаджують на спільне залізне осердя, котре виготовляють із матеріалів з магнітною проникністю  $\mu \gg 1$ , до яких належать феромагнетики.

Явище взаємної індукції покладено в основу роботи *трансформатора* – пристрою для перетворення змінного струму однієї напруги в змінний струм іншої напруги за сталої частоти струму. *Трансформатор складається* з двох або більше обмоток, що мають спільне осердя з феромагнітного матеріалу (рис. 13.1).

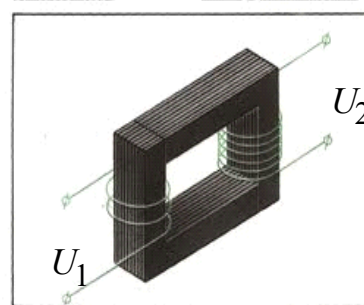


Рис. 13.1

Розрізняють два режими роботи трансформатора: холостий хід і робота навантаженого трансформатора. У режимі холостого ходу вторинна обмотка трансформатора розімкнена (трансформатор не навантажений). При цьому струм у первинній обмотці мінімальний і визначається повним опором обмотки за змінного струму:

$$Z = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}, \quad (13.1)$$

де  $R_1$  – активний опір обмотки;  $\omega = 2\pi\nu$  – циклічна частота змінного струму ( $\nu = 50$  Гц);  $L_1$  – індуктивність обмотки;  $\omega L_1$  – індуктивний опір первинної обмотки.

Робота трансформатора на навантаження супроводжується зменшенням індуктивного опору первинної обмотки, струм у ній зростає пропорційно навантаженню.

Нехтуючи втратами енергії, які у сучасних трансформаторах не перевищують 2%, на підставі закону збереження енергії можна записати, що потужність струму в обох обмотках трансформатора практично однакова, тобто:

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2. \quad (13.2)$$

Трансформатор характеризується коефіцієнтом трансформації:

$$k = N_2 / N_1 = U_2 / U_1. \quad (13.3)$$

*Коефіцієнт трансформації* чисельно дорівнює відношенню кількості витків другої обмотки трансформатора до кількості витків першої обмотки та показує, у скільки разів змінюється вихідна напруга порівняно із напругою на вході трансформатора. Якщо  $k > 1$ , то трансформатор підвищує напругу і його називають *підвищувальним*, а за  $k < 1$  трансформатор є *знижувальним*.

Розрізняють два види втрат потужності в трансформаторі: втрати в обмотках та втрати в осерді. Втрати потужності в обмотках виникають внаслідок їхнього нагрівання під час проходження струму (згідно із законом Джоуля – Ленца). Для зменшення цих втрат обмотки виготовляють з провідників, які мають малий питомий опір, наприклад, з міді.

*Втрати в осерді* зводяться до трьох факторів: виділення тепла від наведених струмів (струмів Фуко); втрати енергії, пов'язані з перемагнічуванням осердя; втрати внаслідок розсіювання магнітних силових ліній. Для протидії струмам Фуко осердя виготовляють з тонких пластин, ізольованих одна від одної. Для боротьби з втратами на перемагнічування осердя виготовляють з феромагнетику з малою коерцитивною силою. Коерцитивна сила  $H_K$  – це напруженість такого зовнішнього магнітного поля, яка потрібна для розмагнічування осердя. Зменшення втрат шляхом розсіювання силових ліній досягають спеціальною геометричною формою осердя.

Коефіцієнтом корисної дії (ККД) називається відношення корисної потужності до витраченої:

$$\eta = P_k / P \quad . \quad (13.4)$$

Якщо втрати потужності виразити через  $\Delta P$ , формулу (13.4) можна записати у такому вигляді:

$$\eta = (P - \Delta P) / P. \quad (13.5)$$

Найпростіше врахувати втрати потужності можна так:

$$\Delta P = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + P_0, \quad (13.6)$$

де  $I_1^2 R_1$ ,  $I_2^2 R_2$  – потужності теплових втрат відповідно в первинній та вторинній обмотці;  $P_0$  – потужність холостого ходу (враховуються всі види втрат, крім втрат в обмотках).

### Лабораторна робота 13. ВИЗНАЧЕННЯ ККД ТРАНСФОРМАТОРА

Тому остаточний вираз для розрахунку ККД трансформатора набуває такого вигляду:

$$\eta = \left[ 1 - \frac{I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + P_0}{P} \right] \cdot 100\% . \quad (13.7)$$

Трансформатори різняться за призначенням, розмірами, типами і видами залежно від потреб конкретних споживачів електричного струму. Трансформатори є основними елементами систем енергопостачання, електромашин, електрообладнання, електроустановок та їхніх деталей для отримання потрібної для них напруги живлення.

Зокрема, можна виділити трансформатори для зварювальних апаратів, апаратів для прогріву бетону, ґрунту і труб, трансформатори для компресорів, транспортерів, бетономішалок, електроприводів будівельних машин, насосних і компресорних установок, гідродинамічні трансформатори для будівельних і транспортних машин, трансформатори для освітлення будівельних майданчиків, ручних електричних машин та інших споживачів енергії.

---

#### Обладнання

Лабораторна установка (рис. 12.5) складається з трансформатора, на первинну обмотку якого подається з мережі змінного струму напруга 220 В. До первинного кола під'єднано ватметр та амперметр  $A_1$ . До вторинного кола під'єднано амперметр  $A_2$ , реостат  $R$  навантаження (запобіжник)  $H$ .

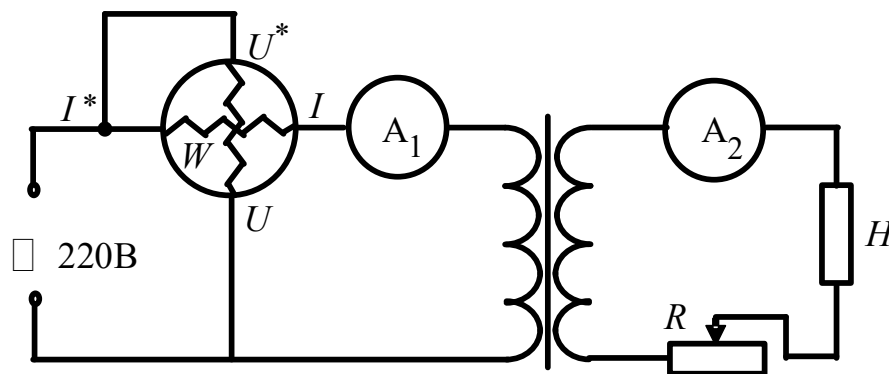


Рис. 13.2

### Експериментальна процедура

До початку виконання дослідів підготувати таблицю 13.1 та 13.2 у програмі Excel.

1. Зібрати коло вторинної котушки трансформатора (рис. 13.2): послідовно з'єднати за допомогою провідників вторинну котушку трансформатора, навантаження  $H$ , амперметр  $A_2$  та реостат  $R$ .
2. Під'єднати установку до мережі 220 В і за розімкненої вторинної обмотки визначити за показниками ватметра потужність холостого ходу  $P_0$ .
3. Замкнути вторинне коло (рис. 13.2) і за різних положень повзунка реостата  $R$  визначити значення струму у первинній котушці  $I_1$ , потужність  $P$  та значення струму у вторинній котушці  $I_2$ .
4. Визначити значення опору первинної котушки  $R_1$  та опору вторинної котушки  $R_2$ .
5. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 13.1

### Розрахунки

Всі розрахунки та побудову графіків виконувати у програмі Excel.

1. За формулою (13.7) розрахувати ККД ( $\eta$ , %) трансформатора для всіх вимірів струмів та потужності.
2. Результати записати до таблиці 13.2.
3. За одержаними результатами побудувати графік залежності ККД ( $\eta$ , %) від струму у вторинному колі  $I_2$ .

### Лабораторний звіт

Таблиця 13.1

Задані та виміряні величини

№ пор.	$P_0$ , Вт	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$P$ , Вт

Таблиця 13.2

Розрахунки шуканих величин

№ пор.	$\eta$ , %

**Контрольні запитання**

1. У чому полягає суть явища електромагнітної індукції? Сформулюйте закон Фарадея для явища електромагнітної індукції.
2. Що називають магнітним потоком? Сформулюйте правило Ленца.
3. Дайте визначення явища взаємоіндукції.
4. Що таке коефіцієнт взаємоіндукції, і від чого він залежить?
5. Що таке трансформатор? Опишіть його будову.
6. Що називають коефіцієнтом трансформації? Які трансформатори називають підвищувальними? знижувальними?
7. Як обчислити ККД трансформатора?
8. Наведіть приклади втрат потужності у трансформаторі. Поясніть, якими методами зменшують кожний вид втрат

## ***ВИЗНАЧЕННЯ ІНДУКТИВНОСТІ КОТУШКИ ТА ДРОСЕЛЯ***

---

### **Мета роботи:**

- вивчити явище самоіндукції;
  - визначити індуктивність котушки та дроселя.
- 

### **Список обладнання:**

- котушка (короткий соленоїд);
  - осердя;
  - амперметр;
  - вольтметр;
  - реостат;
  - з'єднувальні провідники;
  - джерело постійного та змінного струму.
- 

### **Долабораторна підготовка**

*Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал:* явище електромагнітної індукції; явище самоіндукції; індуктивність; явище взаємної індукції, трансформатор

### **Теоретичні основи**

Перед виконанням слід ознайомитися з вказівками до робіт № 12, № 13.

Якщо у провідному контурі протікає струм  $I$ , то в просторі виникає магнітне поле, індукція якого в кожній точці за законом Біо – Савара – Лапласа пропорційна силі струму. В результаті контур пронизує власний магнітний потік  $\Phi$  (або з контуром зчеплений магнітний потік), величина якого пропорційна силі струму:

$$\Phi = L \cdot I, \quad (14.1.)$$

де  $L$  – індуктивність контуру.

*Індуктивність контуру* – це коефіцієнт пропорційності, який не залежить від сили струму й індукції магнітного поля, а є однозначною характеристикою провідного контуру, що визначається формою і

#### Лабораторна робота 14. ВИЗНАЧЕННЯ ІНДУКТИВНОСТІ КОТУШКИ ТА ДРОСЕЛЯ

розмірами контуру, а також магнітними властивостями навколишнього середовища.

Котушка довжиною  $\ell$  з  $N$  витками заповнена матеріалом з магнітною проникністю  $\mu$ , має індуктивність:

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{\ell} \quad (14.2)$$

де  $S$  – площа перерізу котушки. Котушку, в яку вставлене осердя з матеріалом, магнітна проникність котрого  $\mu \gg 1$ , називають *дроселем*.

Явище виникнення індукційного струму в провіднику внаслідок зміни магнітного потоку, зумовленої зміною струму в тому самому провіднику, називають *самоіндукцією*.

Величина електрорушійної сили самоіндукції була визначена американським фізиком Дж. Генрі (за  $L = \text{const}$ ):

$$\varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (14.3)$$

З останнього виразу випливає, що *індуктивність* – це характеристика, що визначає *міру інертних властивостей* провідника стосовно зміни струму, чисельно дорівнює тій ЕРС самоіндукції, що виникає в контурі за швидкості зміни сили струму в ньому 1А за 1с:

$$L = \frac{|\varepsilon_{si}|}{dI/dt}.$$

Якщо до котушки індуктивністю  $L$  прикласти змінну напругу частоти  $\omega$ :

$$U = U_m \cos \omega t,$$

то струм у колі :

$$I = \frac{U_m}{\omega L} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{U_m}{R_L} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (14.4)$$

де величину  $R_L = \omega L$  називають індуктивним опором.

Провідник, з якого виконано котушку, має омичний (активний) опір  $R$ . В результаті повний опір  $Z$  котушки індуктивності:

$$Z = \sqrt{R^2 + R_L^2}. \quad (14.5)$$

## Лабораторна робота 14. ВИЗНАЧЕННЯ ІНДУКТИВНОСТІ КОТУШКИ ТА ДРОСЕЛЯ

Змінний струм з циклічною частотою  $\omega$  характеризують частотою  $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$ , тому з формули (3.9.5) випливає, що

$$L = \frac{1}{2\pi\nu} \sqrt{Z^2 - R^2}. \quad (14.6)$$

Тобто омичний опір  $R$  та повний опір  $Z$  котушки індуктивності (або дроселя) можна визначити так:

$$R = \frac{U_0}{I_0} \quad \text{та} \quad Z = \frac{U}{I}, \quad (14.7)$$

де  $U_0$ ,  $U$  – напруга на котушці відповідно за постійного та змінного струму;  $I_0$ ,  $I$  – відповідно сила постійного та змінного струму.

У разі розмикання або замикання електричних кіл сила струму в них різко змінюється, що призводить до виникнення струмів самоіндукції, які називають *екстраструмами самоіндукції*.

$$\text{Для екстраструму розмикання} \quad I = I_0 e^{-R/L \cdot t}.$$

$$\text{Для екстраструму замикання} \quad I = I_0 \left(1 - e^{-R/L \cdot t}\right).$$

Якщо електричне коло містить котушки з великими значеннями індуктивності  $L$ , то *екстраструми розмикання* в таких колах можуть значно перевищувати струми в колі від джерела. Часто це стає причиною яскравого спалаху лампочок і плавлення запобіжників внаслідок розмикання електричних кіл споживачів. Великі струми самоіндукції через швидке вимкнення спричиняють пробій повітряного проміжку між контактами вимикачів і появу дугового розряду, що призводить до плавлення контактів. Для гасіння дуги в коло вмикають конденсатори. Явище самоіндукції використовують в пусках ламп денного освітлення для запалювання газового розряду.

---

### Обладнання

Лабораторна установка (рис. 14.1, 14.2) складається з послідовно з'єднаних джерела струму  $E_1$  (або  $E_2$ ), котушки  $L$ , амперметра  $A$ , реостата  $\Pi$  та паралельно під'єданого до котушки вольтметра  $V$ .

Для знаходження *активного опору* котушки  $R$  використовують джерело постійного струму  $E1$  (випрямляч) (рис. 14.1). Для знаходження *повного опору* котушки без осердя  $Z$  та котушки з осердям (дроселя)  $Z_1$  використовують джерело змінного струму  $E2$  (рис. 14.2).

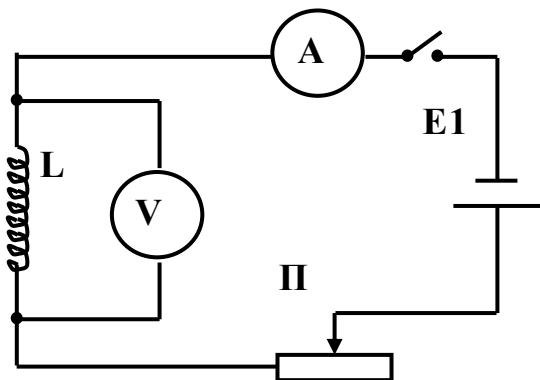


Рис. 14.1

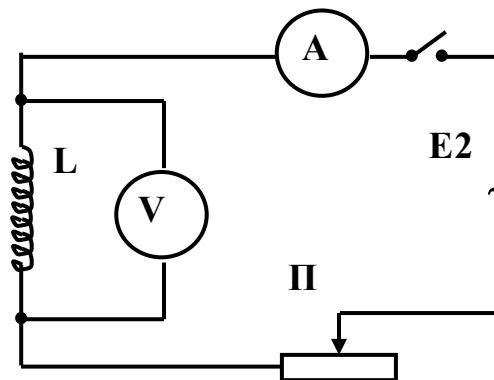


Рис. 14.2

---

### Експериментальна процедура

До початку виконання дослідів підготувати таблицю 14.1 та 14.2 у програмі Excel.

1. Скласти коло постійного струму, схему якого подано на рис. 14.1.
2. За допомогою реостата  $\Pi$  змінювати значення сили струму  $I_0$  за трьох (або більше) показників напруги  $U_0$  для постійного струму.
3. Скласти коло змінного струму за схемою, що подано на рис. 14.2.
4. За допомогою реостата  $\Pi$  змінювати значення сили струму  $I$  за трьох (або більше) показників напруги  $U$  для змінного струму.
5. Вставити осердя та виміряти силу струму  $I_1$  для трьох показників (або більше) напруги  $U_1$  для дроселя.
6. Значення частоти  $\nu$  змінного струму у колі прийняти рівним 50 Гц.
7. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 14.1.

---

### Розрахунки

Всі розрахунки виконувати у програмі Excel.

1. За формулами (14.7) розрахувати активний опір котушки  $R$ , повний опір котушки  $Z$  та повний опір дроселя  $Z_1$ .
2. Розрахувати середні значення  $R$ ,  $Z$  та  $Z_1$ .
3. За формулою (14.6) знайти індуктивність котушки  $L_K$  і дроселя  $L_D$ .
4. Розрахувати магнітну проникність осердя  $\mu$  за формулою (14.2).
5. Подати звіт у вигляді таблиць та графіків у програмі Excel.

**Лабораторний звіт**

Таблиця 14.1

Задані та виміряні величини

№ пор.	$U_0, \text{В}$	$I_0, \text{А}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$\nu, \text{Гц}$	$\mu_0, \text{Гн/м}$

Таблиця 14.2

Розрахунки шуканих величин

№ пор.	$R, \text{Ом}$	$Z, \text{Ом}$	$Z_1, \text{Ом}$	$L_K, \text{Гн}$	$L_D, \text{Гн}$	$\mu$

**Контрольні запитання**

1. У чому полягає суть явища електромагнітної індукції? Сформулюйте закон Фарадея для явища електромагнітної індукції.
2. Що називають магнітним потоком?
3. Сформулюйте правило Ленца.
4. У чому полягає суть явища самоіндукції?
5. Запишіть закон Генрі для явища самоіндукції.
6. Дайте визначення індуктивності контуру.
7. Що таке індуктивність котушки і від чого вона залежить?
8. Чим відрізняється котушка від дроселя?
9. Що таке магнітна проникність речовини?
10. Дайте визначення діа-, пара- та феромагнетиків.
11. Що таке екстраструми самоіндукції? Наведіть приклади шкідливого впливу екстраструмів розмикання. Наведіть приклади їхнього використання.

## **ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗГАСАННЯ КОЛИВАНЬ ФІЗИЧНОГО МАЯТНИКА**

---

### **Мета роботи:**

- вивчити основні закономірності згасаючих коливань;
  - визначити коефіцієнт згасання коливань фізичного маятника;
  - визначити логарифмічний декремент згасання коливань фізичного маятника.
- 

### **Список обладнання:**

- установка (фізичний маятник);
  - шкала;
  - секундомір.
- 

### **Долабораторна підготовка**

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: коливальні процеси та системи; фізичний маятник; згасаючі коливання; характеристики згасання.

### **Теоретичні основи**

Коливанням називають усякий регулярний або майже регулярний процес, в якому будь-яка величина набуває однакових значень через рівні або майже рівні проміжки часу.

Фізичний маятник – це будь-яке тверде тіло, здатне здійснювати під дією сили тяжіння коливання навколо нерухомої горизонтальної осі, яка не проходить через центр мас тіла (рис. 15.1).

Унаслідок відхилення фізичного маятника на деякий кут  $\varphi$  від положення рівноваги виникає, зумовлений силою тяжіння, обертальний момент  $M_{\text{тяж}}$ , який прагне повернути маятник у положення рівноваги:

$$M_{\text{тяж}} = mgl \cdot \sin \varphi \quad (15.1)$$

де  $m$  – маса тіла;  $l$  – відстань від осі обертання до центра мас маятника.

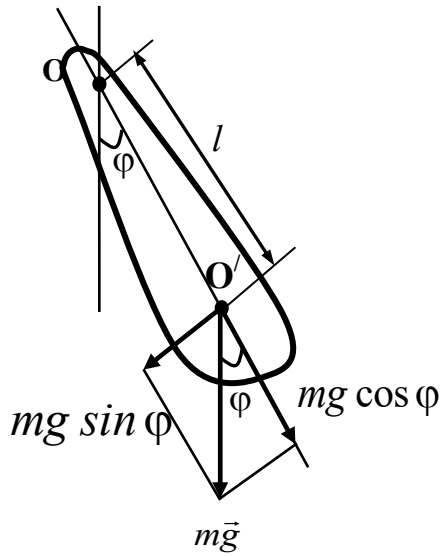


Рис. 15.1

Якщо маятник відпустити з такого положення, то він почне здійснювати коливальний рух. Коливальному руху маятника перешкоджають опір повітря і тертя в осі маятника. Відомо, що в разі невеликої швидкості руху сумарний момент сил опору  $M_{\text{оп}}$  буде пропорційний кутовій швидкості руху маятника:

$$M_{\text{оп}} = -r \cdot \omega = -r \frac{d\varphi}{dt}, \quad (15.2)$$

де  $r$  – коефіцієнт опору навколишнього середовища;  $\omega = d\varphi/dt$  – кутова

швидкість. Знак “мінус” свідчить про те, що вектори  $\vec{M}_{\text{оп}}$  та  $\vec{\omega}$  мають протилежний напрям.  $\delta$

Основний закон динаміки обертального руху:

$$\vec{\beta} = \sum_{i=1}^n \vec{M}_i / J, \quad (15.3)$$

де  $\vec{\beta}$  – кутове прискорення;  $\sum_{i=1}^n \vec{M}_i$  – векторна сума моментів зовнішніх сил;  $J$  – момент інерції системи.

Оскільки фізичний маятник здійснює обертальний рух під дією двох моментів сил  $M_{\text{тяж}}$  і  $M_{\text{оп}}$ , рівняння його руху, після підстановок значень моментів сил (15.1, 15.2) у (15.3) та відповідних перетворень, матиме вигляд:

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + r \frac{d\varphi}{dt} + mgl \sin \varphi = 0, \quad (15.4)$$

де  $J$  – момент інерції маятника відносно осі обертання;  $d^2\varphi/dt^2 = \beta$  – кутове прискорення маятника.

**Лабораторна 15** ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗГАСАННЯ КОЛИВАНЬ ФІЗИЧНОГО МАЯТНИКА

Зважаючи на те, що за малих коливань (коливань з малими кутами відхилення, для яких можна вважати, що  $\sin \varphi \approx \varphi$ ), а також вводячи позначення  $r/J = 2\delta$  та  $mgl/J = \omega_0^2$ , диференціальне рівняння вільних згасаючих коливань фізичного маятника можна записати у вигляді:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\delta \frac{d\varphi}{dt} + \omega_0^2\varphi = 0. \quad (15.5)$$

Розв'язок цього рівняння є функція залежності кута обертання маятника від часу:

$$\varphi = Ae^{-\delta t} \cdot \cos(\omega t + \alpha). \quad (15.6)$$

Рух маятника можна розглядати як коливання з частотою  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$  та амплітудою, яка змінюється з часом за законом:

$$A = A_0 e^{-\delta t} \quad (15.7)$$

Період згасаючих коливань дорівнює:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}}. \quad (15.8)$$

Якщо коефіцієнт опору середовища невеликий, тобто можна вважати його рівним нулю ( $r = 0$ ), то і коефіцієнт згасання  $\delta = 0$ . Тоді формулу періоду коливань можна записати у вигляді:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi}{mgl}. \quad (15.9)$$

Швидкість згасаючих коливань характеризується коефіцієнтом згасання  $\delta$ . Для визначення коефіцієнта згасання користуються залежністю амплітуди від часу (15.7), яка подається у вигляді логарифмічної функції:

$$\ln A = \ln A_0 - \delta t. \quad (15.10)$$

У координатах  $(\ln A; t)$  рівняння (15.10) є прямою лінією.

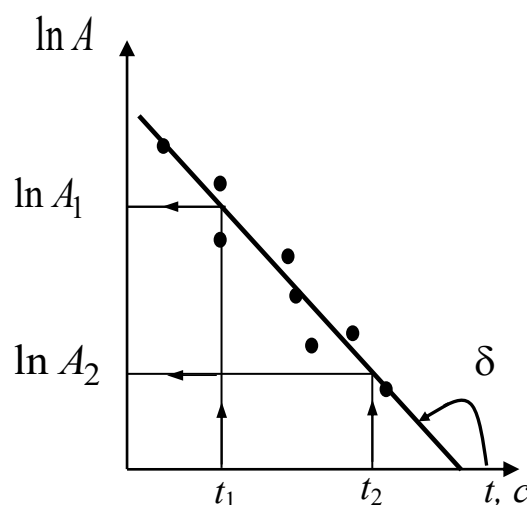


Рис. 15.2

Градiєнтом цієї прямої і буде коефіцієнт згасання  $\delta$  (рис. 15.2):

$$\delta = -\frac{d(\ln A)}{dt} \quad \text{або} \quad \delta = \frac{\ln \frac{A_0}{A}}{\Delta t}. \quad (15.11)$$

Якщо  $\frac{A_0}{A} = e \approx 2,71828\dots$ , то:

$$\delta = \frac{1}{t_e}. \quad (15.12)$$

Отже, коефіцієнт згасання  $\delta$  – це величина, обернена до проміжку часу  $t_e$ , упродовж якого амплітуда коливань зменшується в  $e \approx 2,71$  разів.

Співвідношення (15.11) можна використовувати для експериментального визначення коефіцієнта згасання  $\chi$ .

Окрім коефіцієнта згасання для характеристики згасання застосовують також логарифмічний декремент згасання  $\chi$ , який визначають логарифмом відношення амплітуд, що відповідають моментам часу, які відрізняються на період:

$$\chi = \ln \frac{A_0 e^{-\delta t}}{A_0 e^{-\delta(t+T)}} = \ln e^{\delta T} = \delta T. \quad (15.13)$$

Період коливань маятника розраховують за формулою:

$$T = \frac{\tau}{N}, \quad (15.14)$$

де  $\tau$  – час протягом якого здійснюється  $N$  повних коливань.

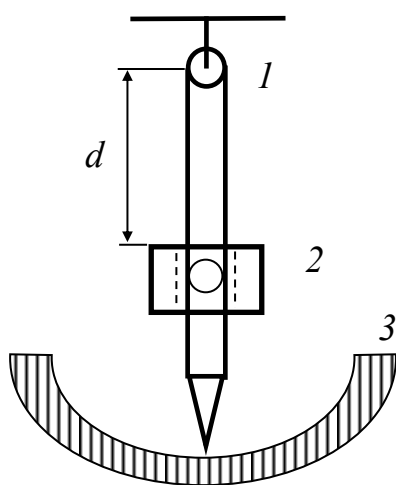


Рис. 15.3

### Обладнання

Фізичний маятник виготовлено у вигляді металевого стержня  $l$  (рис. 15.3), до верхнього кінця якого прикріплено дві призми, що спираються своїми ребрами на раму.

Для зміни періоду коливань на стержень надітий масивний вантаж  $2$ , положення якого можна регулювати гвинтами.

Відлік амплітуди коливань у градусах виконують за шкалою 3.

---

### Експериментальна процедура

*До початку виконання дослідів підготувати таблиці 15.1 та 15.2 у програмі Excel.*

1. Встановити вантаж на стержні у крайнє нижнє положення.
2. Відхилити маятник на кут  $8^{\circ}$ – $10^{\circ}$  від положення рівноваги і відпустити.
3. Виміряти час  $\tau$ , за який маятник зробить  $N$  повних коливань.
4. Ще раз відхилити маятник на кут  $8^{\circ}$ – $10^{\circ}$  і відпустити його.
5. Через кожні 10 – 15 секунд за шкалою 3 визначати амплітуду коливань  $A$  доти, доки вона не зменшиться до  $1^{\circ}$ – $2^{\circ}$ .
6. Пересунути вантаж у положення, яке визначить викладач, та виконати пункти 4 – 5 для другого положення маятника.
7. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 5.1

---

### Розрахунки

*Всі розрахунки виконувати у програмі Excel в таблиці 15.2, побудову графіку виконувати у програмі Excel.*

1. Розрахувати період коливань маятника за формулою (15.14).
2. Побудувати графік залежності амплітуди коливань  $A$  від часу  $t$  в програмі Excel (приклад 15.1).
3. Показати на графіку лінію тренда та її рівняння, яке буде відповідати рівнянню (15.7).
4. Визначити з отриманого рівняння коефіцієнт згасання  $\delta(1)$  та занести його значення до табл. 15.2.
5. Розрахувати в програмі Excel значення  $\ln A$ .
6. Побудувати графік залежності  $\ln A = f(t)$  (приклад 15.2).
7. Показати на графіку лінію тренда та її рівняння, яке буде відповідати рівнянню (15.10).
8. Визначити з отриманого рівняння коефіцієнт згасання  $\delta(2)$  та занести його значення до табл. 15.2.
9. Розрахувати середнє значення коефіцієнта згасання  $\delta(\text{сер})$ .

**Лабораторна 15** ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗГАСАННЯ КОЛИВАНЬ ФІЗИЧНОГО МАЯТНИКА

10. Розрахувати логарифмічний декремент згасання  $\chi$  за формулою (15.13), застосувавши середнє значення коефіцієнта згасання  $\delta(\text{сер})$ .
11. Повторити обробку результатів для другого положення маятника.
12. Подати звіт у вигляді таблиць та графіків у програмі Excel.

**Лабораторний звіт**

Таблиця 15.1

Задані та виміряні величини

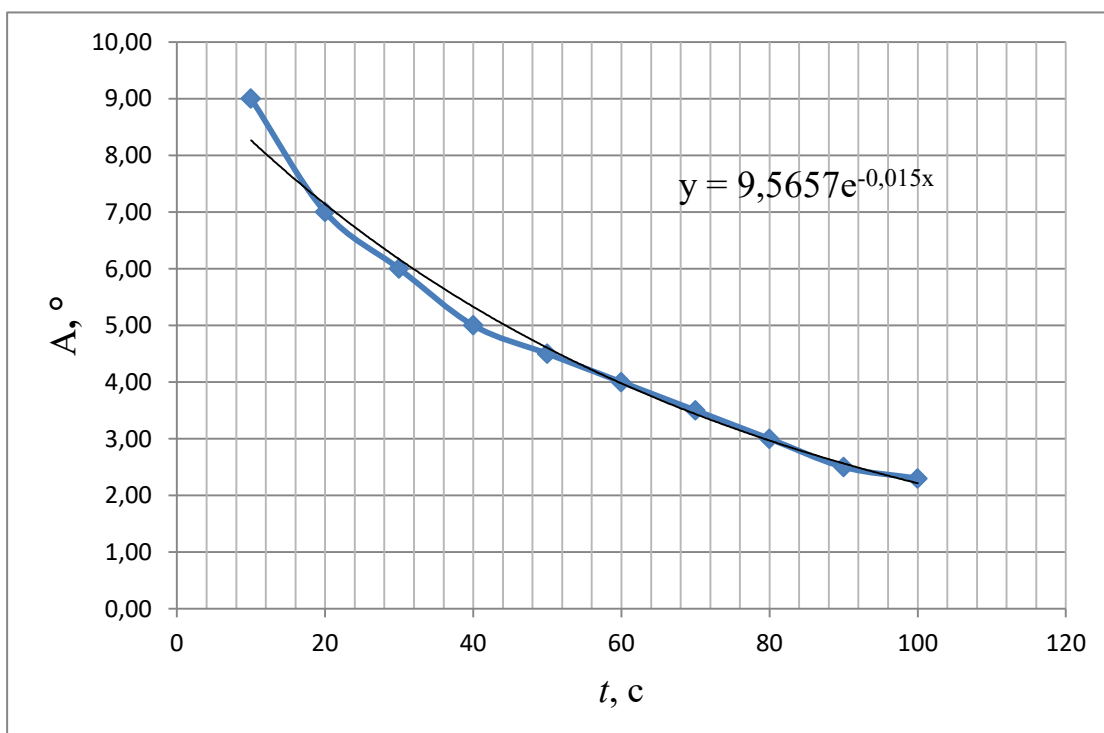
$\tau, \text{c}$	N	$t, \text{c}$	$A^\circ$

Таблиця 15.2

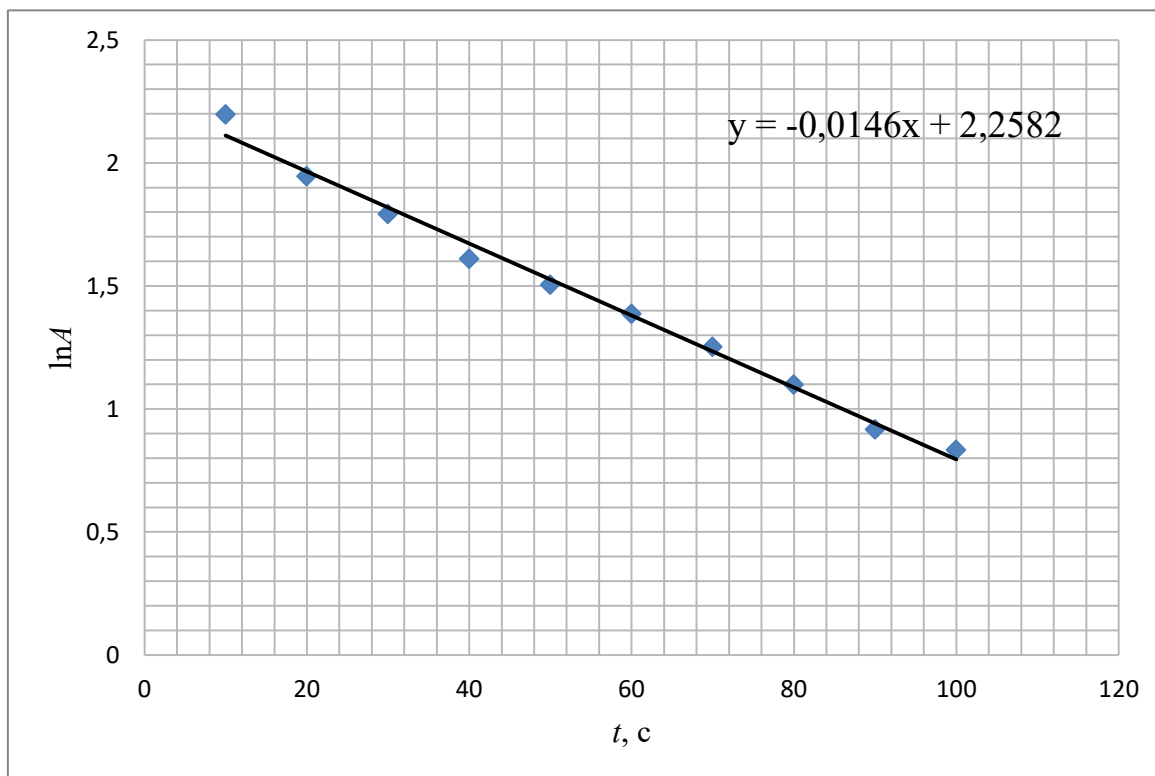
Розрахунки шуканих величин

$T, \text{c}$	$\delta(1), 1/\text{c}$	$\ln A$	$\delta(2), 1/\text{c}$	$\delta(\text{сер}), 1/\text{c}$	$\chi$

Приклад графіка 15.1



Приклад графіка 15.2



**Контрольні запитання**

1. Що таке коливання? Які коливання належать до малих?
2. Які коливання називають вільними?
3. Які коливання називають незгасаючими? згасаючими? Зобразіть їх графічно.
4. Які коливання називають вимушеними?
5. Які коливання називають гармонійними? Напишіть їхнє рівняння.
6. Дайте означення амплітуди, фази, початкової фази, періоду, лінійної та циклічної частоти коливань.
7. Що таке фізичний маятник? Назвіть інші механічні коливальні системи, дайте їхнє означення.
8. Виведіть диференціальні рівняння згасаючих коливань фізичного, пружинного та математичного маятників. Запишіть їхній розв'язок.
9. Що таке коефіцієнт згасання? логарифмічний декремент згасання? У чому полягає їхній фізичний зміст?
10. Від чого залежить період коливань фізичного, пружинного і математичного маятників?

***ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА РЕЗОНАНСУ В  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ  
КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ***

---

**Мета роботи:**

- вивчити явище резонансу в електричному коливальному контурі;
  - побудувати резонансні криві;
  - визначити резонансні характеристики контуру.
- 

**Список обладнання:**

- установка (ламповий генератор);
  - міліамперметр;
  - джерело живлення.
- 

**Долабораторна підготовка**

*Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал:* вільні згасаючі коливання; вимушені коливання; резонанс; вимушені електромагнітні коливання в електричному коливальному контурі; автоколивальні системи.

**Теоретичні основи**

*Електромагнітний коливальний контур* складається з послідовно з'єднаних конденсатора ємністю  $C$ , котушки індуктивністю  $L$  та омичного опору  $R$  (опору підвідних провідників). Після підзарядки конденсатора в такому контурі виникають *згасаючі електромагнітні коливання*, тобто відбувається періодична зміна заряду та напруги на конденсаторі і, відповідно, сили струму в контурі. Втрати енергії в такому процесі відбуваються внаслідок виділення теплоти на омичному опорі та електромагнітного випромінювання. Щоб викликати і підтримувати незгасаючі коливання, до контуру слід неперервно підводити енергію від зовнішнього джерела з метою компенсації втрат енергії. Для цього можна застосувати *триод* – електронну лампу з трьома електродами (катодом, анодом та сіткою).

**Лабораторна робота 16. ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА РЕЗОНАНСУ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ**

На рис. 16.1 показано схему лампового генератора зі зворотним зв'язком. В анодне коло тріода ввімкнено послідовно коливальний контур і батарею  $U_a$ , у коло сітки – котушку  $L_a$ , індуктивно пов'язану з котушкою  $L$  коливального контуру.

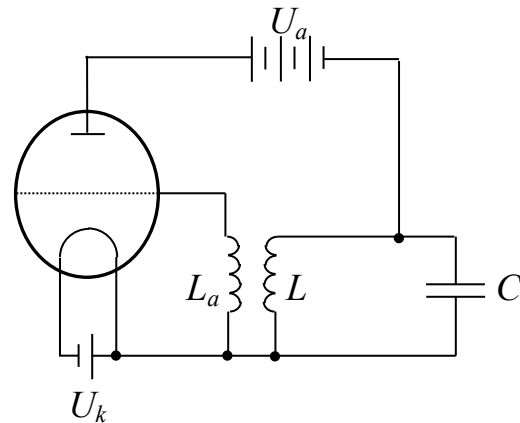


Рис. 16.1

Коли на катод подано напругу  $U_k$ , його нитка розжарюється, створюється анодний струм та вмикається батарея  $U_a$ . Це призводить до виникнення короточасного струму в колі, який заряджає конденсатор: нижня обкладка отримує позитивний заряд, верхня – негативний. Далі конденсатор розряджається через котушку індуктивності  $L$  і в контурі виникають синусоїдальні електричні коливання.

Однак згасаючий синусоїдальний струм, проходячи через котушку  $L$  контуру, збуджуватиме в котушці  $L_a$  електрорушійну силу (ЕРС) індукції, і між сіткою та катодом лампового тріода утворюється змінна напруга. Ця напруга регулює енергію, що підводиться від джерела до коливального контуру.

У негативний півперіод (коли на сітці негативний потенціал, на катоді – позитивний) лампу «закрито» і джерело струму не працює. Навпаки, у позитивний півперіод (коли на сітці позитивний потенціал, на катоді – негативний) джерело  $U_a$  створює анодний струм, поповнюючи енергію коливального контуру. Завдяки цьому в контурі існуватимуть незгасаючі коливання. Одержані таким чином незгасаючі коливання не є строго гармонійними, але їхня відмінність від гармонійних настільки мала, що нею можна знехтувати.

Така система, яка сама регулює введення енергії в контур, називається автоколивальною, а збуджені в ній коливання – автоколиваннями. В автоколивальних системах відбуваються коливання з постійною частотою й амплітудою, значення яких не залежать від зовнішнього впливу і визначаються властивостями самої системи.

Крім генераторів на електронних лампах, широко використовують напівпровідникові генератори електричних коливань – на транзисторах. За структурою вони аналогічні, але мають істотні переваги: у них немає нагрівних катодів, які споживають потужність і потребують час на розжарення; працюють за нижчої напруги; мають значно менші розміри тощо.

В автоколивальних системах (і не тільки в електромагнітних) за деяких умов може виникати резонанс. *Явище резонансу у коливальному контурі* полягає у різкому зростанні амплітуди вимушених коливань струму у контурі або напруги на обкладинках конденсатора за наближення частоти  $\omega$  зовнішньої ЕРС до частоти власних коливань у контурі  $\omega_0$ .

Найпростіше такі коливання можна збудити завдяки індуктивному зв'язку котушки індуктивності контуру  $L$  із зовнішньою котушкою  $L_a$ , якою протікає змінний струм. Якщо індукована у контурі ЕРС змінюється за законом  $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t$ , то *диференціальне рівняння вимушених коливань* матиме вигляд:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = \varepsilon_0 \sin \omega t, \quad (16.1)$$

де  $L$  – індуктивність котушки,  $C$  – ємність конденсатора,  $R$  – активний (омічний) опір.

Зважаючи на те, що частота власних (незгасаючих) коливань у контурі  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ , а коефіцієнт згасання  $\delta = R/2L$ , запишемо рівняння (16.1) у вигляді:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\delta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = \varepsilon_0 \sin \omega t. \quad (16.2)$$

Розв'язки цього рівняння для амплітуд напруги  $U_m$  на конденсаторі та сили струму  $I_m$  у контурі мають вигляд:

$$U_{C_m} = \frac{\varepsilon_0}{\frac{\omega}{\omega_0^2} \sqrt{\left(\frac{\omega_0^2}{\omega} - \omega\right)^2 + 4\delta^2}} \quad (16.3) \quad \text{та} \quad I_m = \frac{\varepsilon_0}{L \sqrt{\left(\frac{\omega_0^2}{\omega} - \omega\right)^2 + 4\delta^2}}. \quad (16.4)$$

Графіки відповідних функцій  $U_{Cm} = f(\omega)$  і  $I_m = f(\omega)$  зображені на рис. 16.2 та 16.3.

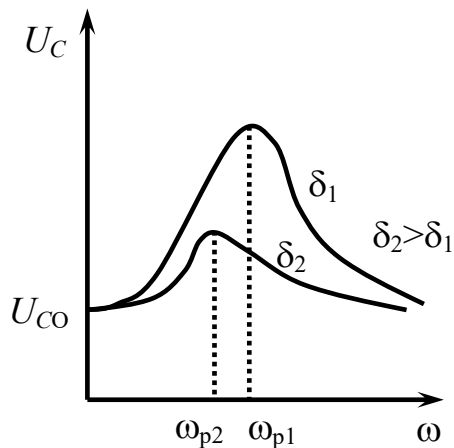


Рис. 16.2

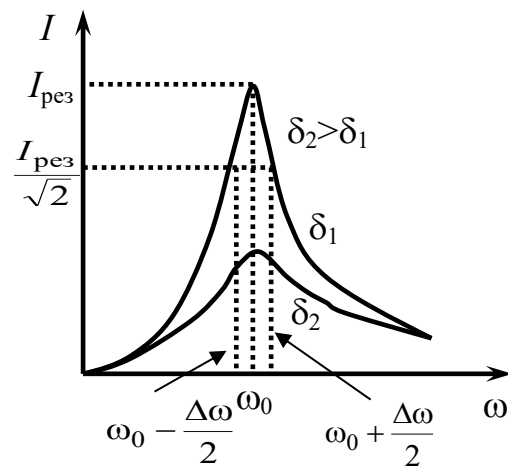


Рис. 16.3

Як видно з графіків, амплітуди напруги і сили струму різко зростають у разі наближення частоти зовнішньої ЕРС  $\omega$  до значення частоти власних коливань  $\omega_0$ . Слід наголосити, що *резонансна частота*  $\omega_p$  (частота, за якої амплітуди напруги та струму є максимальними) для сили струму  $I_m$  збігається з частотою власних коливань  $\omega_0$ , якщо немає згасання, а для напруги  $U_m$  резонансна частота визначається як:

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}, \quad (16.5)$$

тобто спадає у разі збільшення коефіцієнта згасання.

Особливістю обох графіків є те, що внаслідок збільшення величини згасання ширина резонансної кривої зростає, а її висота спадає.

Кількісною характеристикою форми резонансної кривої є *добротність*  $Q$  – величина, яка характеризує втрати енергії в контурі і за означенням дорівнює  $\pi/\chi$ , де  $\chi$  – логарифмічний декремент згасання вільних коливань в контурі. *Добротність* відображає, у скільки разів амплітуда напруги на конденсаторі при резонансі перевищує амплітуду зовнішньої ЕРС. Крім того, *добротність контуру* характеризує пік резонансних кривих. Наприклад, на графіку  $I_m = f(\omega)$  (рис. 16.3) зображено ширину  $\Delta\omega$  резонансної кривої для сили струму на половині максимальної потужності. Із закону Джоуля – Ленца випливає, що

потужність у колі пропорційна квадрату сили струму. Це означає, що коли сила струму у контурі зменшується у  $\sqrt{2}$  разів відносно максимального значення, потужність зменшується удвічі. За умов малого згасання можна показати, що це відбувається, коли частота  $\omega$  зовнішньої ЕРС відхиляється від  $\omega_0$  на величину коефіцієнта згасання  $\beta$ .

Ширина резонансної кривої або смуга пропускання коливального контуру  $\Delta\omega = 2\delta$  пов'язана з добротністю виразом:

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega}. \quad (16.6)$$

### Обладнання

У цій роботі використано ламповий генератор (рис. 16.4), який має індуктивний зв'язок з досліджуваним коливальним контуром і регулюється повзунком  $P_1$ . Частота коливань генератора за допомогою перемикача  $P_2$  регулюється у діапазоні 0,7...1,4 МГц, значення ємності конденсатора коливального контуру – перемикачем  $P_3$ . Якщо встановити на конденсаторі деяке значення ємності  $C$ , то, обертаючи перемикач частоти генератора  $P_2$ , можна добитися резонансу, що буде підтверджено спалахом лампи  $L$ , а показники  $P_2$  – резонансній частоті. Для реєстрації струму використовують міліамперметр.

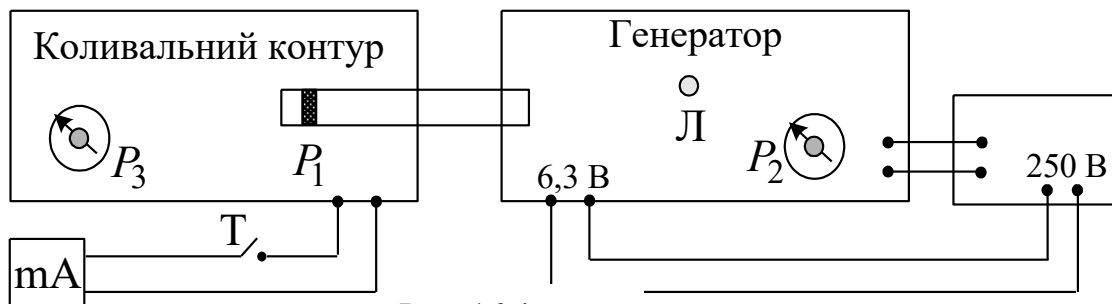


Рис. 16.4

### Експериментальна процедура

До початку виконання дослідження підготувати таблицю 16.1 та 16.2 у програмі Excel.

1. Перед вмиканням приладу слід пересвідчитись, що індуктивний зв'язок генератора з контуром є мінімальним, тобто повзунок  $P_1$  перебуває у крайньому лівому положенні, а тумблер  $T$  (рис. 16.4), який вмикає міліамперметр, – у положенні "Увімкнено".

**Лабораторна робота 16.** ДОСЛІДЖЕННЯ ЯВИЩА РЕЗОНАНСУ В ЕЛЕКТРОМАГНІТНОМУ КОЛИВАЛЬНОМУ КОНТУРІ

2. Перемикач ємності конденсатора  $P_3$  коливального контуру встановити в середнє положення, а перемикач частоти  $P_2$  генератора – у крайнє лїве положення.
3. Увімкнути прилад і зачекати 2 хвилини, поки нагрїється катод лампи. Свідченням готовності приладу до роботи є те, що міліамперметр почне показувати струм.
4. Вимкнути міліамперметр, встановити на конденсаторі перемикачем  $P_3$  перше значення ємності  $C_1$  (задається викладачем).
5. Встановити між коливальним контуром та генератором індуктивний зв'язок, тобто перевести повзунок  $P_1$  у крайнє праве положення.
6. Поворотом перемикача частоти  $P_2$  добитись загоряння лампи Л та записати значення резонансної частоти  $\nu_{рез1}$  для ємності  $C_1$ .
7. Перевести повзунок  $P_1$  у крайнє лїве положення (індуктивний зв'язок генератора з контуром є мінімальним) та ввімкнути міліамперметр.
8. Змінюючи значення частоти генератора  $\nu$ , записати відповідні їм значення сили струму  $I$ .
9. Повторити пункти 4–6 для двох наступних значень ємності конденсатора (задаються викладачем).
10. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 6.1.

---

### Розрахунки

*Всі розрахунки виконувати у програмі Excel в таблиці 16.2, побудову графіку виконувати у програмі Excel.*

1. Користуючись отриманими даними, побудувати резонансні криві  $I = f(\nu)$  в програмі Excel (приклад 16.1).
  2. Визначити смуги пропускання коливального контуру.
  3. Для цього на кожному графіку  $I = f(\nu)$  провести пряму, паралельну осі частот на рівні  $I_{рез} / \sqrt{2}$ , точки перетину спроектувати на вісь частот. Визначати відповідні частоти  $\nu(1)$  та  $\nu(2)$ .
  4. Розрахувати ширину резонансних кривих  $\Delta\omega = 2\pi\Delta\nu$ .
  5. Обчислити добротність коливального контуру для кожного значення ємності за формулою (16.6), де  $\omega_0 = 2\pi\nu_{рез}$ .
  6. Подати звіт у вигляді таблиць та графіків у програмі Excel.
-

## Лабораторний звіт

Таблиця 16.1

Задані та виміряні величини

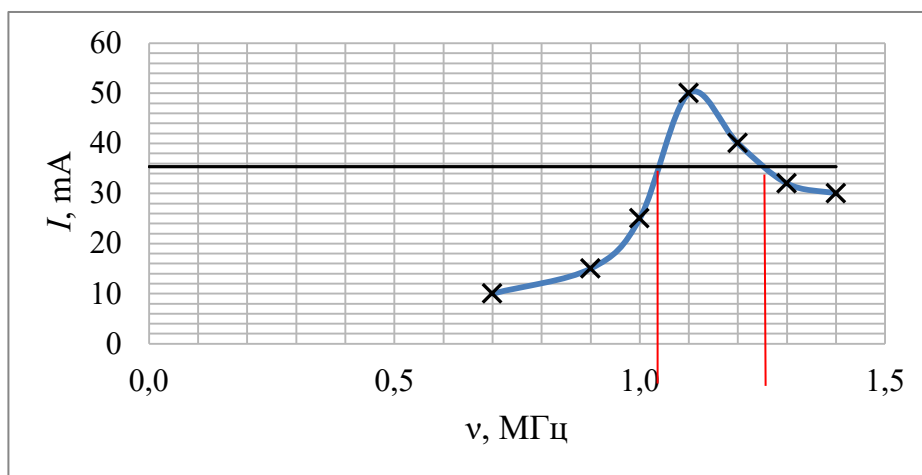
$C$ , пФ	$\nu(\text{рез})$ , МГц	$\nu$ , МГц	$I$ , мА

Таблиця 16.2

Розрахунки шуканих величин

$\nu(1)$ , МГц	$\nu(2)$ , МГц	$\Delta\omega$ , рад/с	$\omega_0$ , рад/с	$Q$

Приклад графіка 16.1



### Контрольні запитання

1. З чого складається електричний коливальний контур?
2. Поясніть виникнення електромагнітних коливань у електромагнітному коливальному контурі.
3. Поясніть роботу лампового генератора незгасаючих коливань.
4. Яка система називається автоколивальною?
5. Опишіть перетворення енергії в електромагнітному коливальному контурі.
6. У чому полягає явище резонансу?
7. Виведіть диференціальне рівняння вимушених коливань в електричному коливальному контурі.
8. Як залежить напруга на конденсаторі коливального контуру і сила струму в ньому від частоти зовнішньої ЕРС?
9. Чому дорівнює резонансна частота для сили струму в контурі і напруги на конденсаторі?
10. Що таке добротність коливального контуру?
11. Як залежить смуга пропускання коливального контуру від величини його опору?

## ***ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ В ПОВІТРІ МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ***

---

### **Мета роботи:**

- вивчити процеси поширення коливань у суцільному середовищі;
  - дослідити умови виникнення стоячих хвиль;
  - визначити швидкість звуку в повітрі.
- 

### **Список обладнання:**

- установка;
  - лінійка;
  - термометр;
  - джерело живлення.
- 

### **Долабораторна підготовка**

*Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал:* механічні хвилі; поперечні та поздовжні хвилі; швидкість поширення пружних хвиль; довжина хвилі; стоячі хвилі; швидкість птштрєння звукових хвиль в різних середвищах.

*Хвилею (хвильовим процесом) називають процес поширення коливань у просторі. Процес поширення у просторі коливань частинок суцільного пружного середовища, неперервно розподіленого у просторі, називають механічною (пружною) хвилею.*

Деформація, що виникає у деякому місці, спричинює початкове відхилення частинок середовища від положення рівноваги, а наявність між частинками середовища сил пружності зумовлює процес передачі коливального стану від одних частинок до інших. При поширенні хвилі частинки середовища не рухаються разом із хвилею, а лише коливаються навколо своїх положень рівноваги. Разом із хвилею від частинки до частинки середовища передається лише стан коливального руху і його енергія.

*Основною властивістю усіх хвиль є перенесення енергії без перенесення речовини.*

Розрізняють поздовжні та поперечні механічні хвилі. У *поздовжніх хвилях* частинки середовища коливаються вздовж напрямку поширення хвилі, вони виникають внаслідок деформацій стиску і розтягу, тобто у твердих тілах, рідинах і газах. У *поперечних хвилях* частинки середовища коливаються перпендикулярно до напрямку поширення хвилі, утворюються такі хвилі внаслідок деформації зсуву, що можливо лише у твердих тілах.

*Звуком* називають пружні хвилі малої амплітуди, частоти яких лежать у межах від 16 до 20000 Гц. Хвилі з частотою, меншою за 16 Гц, називають *інфразвуком*, з частотою, більшою за 20000 Гц – *ультразвуком*.

Хвилі, що переносять у просторі енергію, називають *біжучими*. Рівняння плоскої біжучої пружної хвилі (прямої) має вигляд:

$$\xi_1 = A \cos(\omega t - kx), \quad (17.1)$$

де  $\xi_1$  – зміщення,  $A$  – амплітуда хвилі,  $\omega = 2\pi\nu$  – циклічна частота,  $k = 2\pi/\lambda$  – хвильове число,  $x$  – відстань від джерела звуку;  $\lambda$  – довжина хвилі.

Рівняння хвилі, що відбивається від деякої перешкоди та розповсюджується назустріч (відбитої), має вигляд:

$$\xi_2 = A \cos(\omega t + kx). \quad (17.2)$$

Унаслідок суперпозиції (накладання) прямої та відбитої хвилі виникає *стояча хвиля*, рівняння якої має вигляд:

$$\xi_1 + \xi_2 = 2A \cos kx \cos \omega t, \quad (17.3)$$

де вираз

$$2A \cos kx \quad (17.4)$$

є амплітудою стоячої хвилі, яка визначається координатою  $x$ .

З виразу 17.3 видно, що в деяких точках простору амплітуда коливань дорівнює нулю. Ці точки називають *вузлами стоячої хвилі*. Точки, в яких амплітуда стоячої хвилі досягає максимального значення, називають *пучностями*. З виразу для амплітуди стоячої хвилі (17.4) можна отримати координати вузлів та пучностей стоячої хвилі:

$$x_{\text{в}} = (2m + 1) \frac{\lambda}{4} \quad \text{та} \quad x_{\text{п}} = m \frac{\lambda}{2}, \quad (17.5)$$

де  $m = 0, 1, 2, \dots$

**Лабораторна робота 17. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ В ПОВІТРІ МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ**

Картину стоячої хвилі у повітряному стовпі труби різної довжини зображено на рис. 17.1. Як видно з формул 17.5, відстань між сусідніми вузлами або пучностями становить (рис. 17.1, б):

$$\Delta x = \frac{\lambda}{2}. \quad (17.6)$$

Відмінність між стоячою хвилею та біжучою хвилею полягає в тому, що в стоячій хвилі зовсім *немає перенесення енергії*.

Як видно з рисунка 17.1, в усіх випадках, коли утворюється стояча хвиля, біля поршня П знаходиться вузол, а біля відкритого кінця – пучність (рис. 17.1, а). Слід зауважити, що внаслідок накладання прямої та відбитої хвилі не завжди утворюється стояча хвиля. Для труби, закритої з одного боку, повинна виконуватись умова: відстань між поршнем та джерелом звуку (рис. 17.1, а) має бути кратною  $\lambda/4$ .

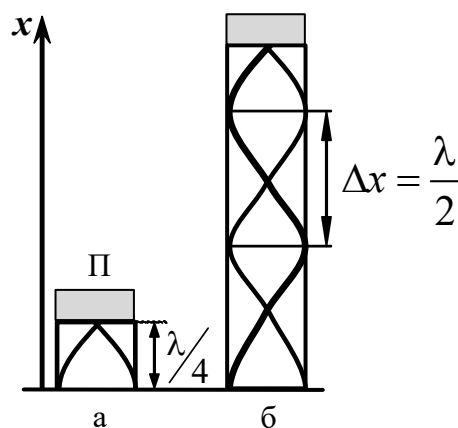


Рис. 17.1

Для всіх біжучих хвиль справедливим є співвідношення:

$$v = \lambda \nu, \quad (17.7)$$

де  $v$  – швидкість поширення хвилі,  $\lambda$  – довжина хвилі,  $\nu$  – частота коливань.

Отже, визначення швидкості звуку зводиться до визначення довжини хвилі  $\lambda$ . Як видно з формули 17.6 та рис. 17.1, довжина хвилі дорівнює подвоєній відстані між сусідніми пучностями хвилі:

$$\lambda = 2\Delta x. \quad (17.8)$$

Швидкість поширення звуку залежить від пружних, інертних властивостей середовища та від температури середовища. Для повітря:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}, \quad (17.9)$$

де  $\gamma = C_p / C_V$  – показник адіабати;  $R$  – універсальна газова стала 8,31 Дж/(моль·К);  $T$  – абсолютна температура;  $\mu$  – молярна маса.

Для повітря:  $\gamma = 1,4$ ;  $\mu = 0,029$  кг/моль.

## Лабораторна робота 17. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ В ПОВІТРІ МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ

За температури  $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$  згідно з формулою (17.9), швидкість повітря  $v = 330\text{ м/с}$ , а за кімнатної температури  $t = 17\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $v = 340\text{ м/с}$ .

### Обладнання

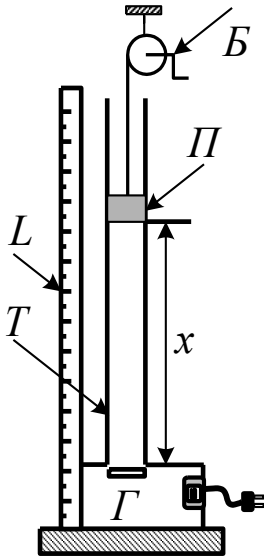


Рис. 17.2

Лабораторна установка (рис. 17.2) складається з циліндричної трубки  $T$ , закритої з одного боку поршнем  $\Pi$ , з'єднаним з рухомим блоком  $B$ .

Знизу біля відкритого кінця трубки знаходиться джерело звуку  $\Gamma$  – мембрана генератора звукових коливань (значення частоти  $\nu$  вказано на установці).

Генератор звукових коливань  $\Gamma$  підключається до мережі змінного струму (220 В).

Координати точок пучностей  $x$  вимірюються за допомогою лінійки  $L$ .

### Експериментальна процедура

До початку виконання дослідів підготувати таблицю 17.1 та 17.2 у програмі Excel.

1. Ознайомитись з установкою.
2. Визначити частоту звукової хвилі.
3. Ввімкнути живлення генератора звукових коливань  $\Gamma$ .
4. Обертаючи ручку блока  $B$  повільно піднімати поршень, при цьому гучність звуку буде періодично змінюватись.
5. Виміряти декілька положень поршня  $x_i$ , коли гучність досягає максимального значення.
6. Виміряти термометром дійсну температуру в приміщенні в момент проведення дослідів
7. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 17.1.

### Розрахунки

Всі розрахунки виконувати у програмі Excel в таблиці 17.2.

1. Розрахувати відстань  $\Delta x = x_{i+1} - x_i$  між двома сусідніми положеннями поршня, у яких гучність досягає максимального значення.

**Лабораторна робота 17. ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ ЗВУКУ В ПОВІТРІ МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ХВИЛЬ**

2. Розрахувати середнє значення  $\Delta x_{\text{сер}}$ .
3. За формулою (17.8) знайти довжину звукової хвилі  $\lambda$ .
4. За формулою (17.7) знайти швидкість звуку в повітрі  $v_{\text{екс}}$ .
5. Розрахувати температуру в приміщенні в момент проведення досліду за формулою (17.9).
6. Усі розрахунки виконати в програмі Excel та записати до таблиці 17.2.

---

**Лабораторний звіт**

Таблиця 17.1

Задані та виміряні величини

$x_i$ , м	$t_{\text{екс}}$ °С	$\gamma$	$R$ , Дж/(моль·К)	$\mu$ , кг/моль	$\nu$ , Гц

Таблиця 17.2

Розрахунки шуканих величин

$\Delta x$ , м	$\Delta x_{\text{сер}}$ , м	$\lambda$ , м	$v_{\text{екс}}$ , м/с	$T_{\text{екс}}$ , К	$T_{\text{теор}}$ , К

---

**Контрольні запитання**

1. Дайте означення хвильового процесу.
2. Які хвилі називають пружними?
3. Дайте означення поздовжніх і поперечних хвиль.
4. Виведіть рівняння плоскої монохроматичної синусоїдальної біжучої хвилі.
5. Що називають довжиною хвилі? Запишіть формулу зв'язку між довжиною і частотою хвилі.
6. Від яких параметрів залежить швидкість звуку в газах?
7. Що таке стояча хвиля? Запишіть її рівняння.
8. Що таке вузол та пучність стоячої хвилі? Визначте їхнє взаємне розміщення.
9. Що таке звук, інфра- та ультразвук? Наведіть приклади застосування ультразвуку.

***ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ  
СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ  
ДИФРАКЦІЙНИХ ГРАТ***

---

**Мета роботи:**

- вивчити явище дифракції;
  - вивчити явище інтерференції;
  - визначити за допомогою дифракційних ґрат довжину світлової хвилі;
  - визначити товщину людської волосини за дифракційною картиною.
- 

**Список обладнання:**

- оптичний квантовий генератор ОКГ (лазер);
  - дифракційні ґрати;
  - екран;
  - лінійка;
  - волосина.
- 

**Долабораторна підготовка**

*Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал:* явище інтерференції; дифракція хвиль; дифракція в паралельних променях; дифракційні ґрати та їхні характеристики.

**Теоретичні основи**

*Дифракцією* називають явища, пов'язані з огинанням хвилями перешкод, які трапляються на їхньому шляху, або, в більш широкому розумінні, явища, пов'язані з будь-яким відхиленням від законів геометричної оптики в процесі поширення світла. Для пояснення явища дифракції *Гюйгенс* сформулював *принцип*, згідно з яким кожна точка простору, до якої доходить хвильовий фронт, стає центром вторинних когерентних хвиль, а огинаюча цих хвиль дає положення хвильового фронту в наступний момент часу.

**Лабораторна робота 18. ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИФРАКЦІЙНИХ ГРАТ**

Френель доповнив принцип Гюйгенса ідеєю інтерференції вторинних хвиль. Він запропонував поділити сферичний хвильовий фронт на зони так, щоб відстань від країв зон (когерентних джерел хвиль) до точки спостереження  $M$  (рис. 18.1) відрізнялась на  $\lambda/2$ . Тоді залежно від кількості зон  $m$  в точці  $M$  може спостерігатись посилення або послаблення інтенсивності хвиль в разі їхнього накладання.

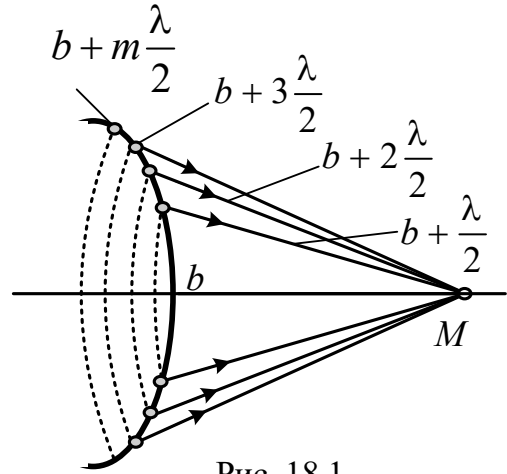


Рис. 18.1

Якщо ширина перешкоди (наприклад, щілина) дорівнює  $b$ , відстань від неї до точки спостереження –  $l$ , а довжина хвилі –  $\lambda$ , то параметр  $b^2 / (l \cdot \lambda)$  визначає число зон Френеля  $m$ , які відкриває ця перешкода. Отже, дифракцію можна спостерігати лише тоді, коли  $m \ll 1$  (дифракція Фраунгофера), або за  $m \sim 1$  (дифракція Френеля). Якщо  $m \gg 1$ , то справджуються закони геометричної оптики.

Найбільше практичне значення має дифракція, яку спостерігають в паралельних променях (дифракція Фраунгофера) під час проходження світла через одномірні дифракційні ґрати (рис. 18.2).

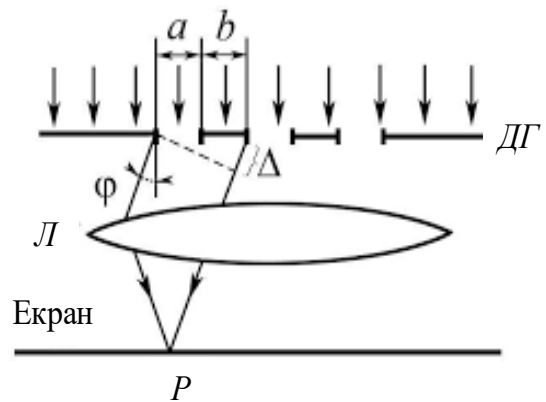


Рис. 18.2

Дифракційні ґрати (ДГ) – це система паралельних щілин однакової ширини, які лежать в одній площині і розділені

однаковими за шириною непрозорими проміжками. Якщо  $a$  – ширина прозорої частини, а  $b$  – ширина непрозорої щілини, то сума  $d = a + b$  має назву сталої (періоду) дифракційних ґрат.

Якщо кількість прозорих щілин ґрат на одиниці довжини  $l$  буде  $N$  (число штрихів), то сталу дифракційних ґрат знаходять за співвідношенням:

$$d = \frac{l}{N}. \quad (18.1)$$

### Лабораторна робота 18. ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИФРАКЦІЙНИХ ГРАТ

Нехай на дифракційні ґрати падає плоска світлова хвиля (рис. 18.2). Згідно з принципом Гюйгенса – Френеля кожна точка цього фронту є джерелом вторинних сферичних когерентних хвиль. Внаслідок цього усі точки кожної щілини випромінюють сферичні хвилі. Візьмемо, наприклад, точки, що лежать біля країв усіх щілин і розглянемо промені, які виходять під кутом  $\varphi$  до напрямку поширення плоскої хвилі (кути дифракції  $\varphi$  будемо вважати малими). Освітленість у точці  $P$  на екрані буде результатом інтерференції усіх променів. З рисунку 18.2 видно, що між променями 1 та 2 виникає різниця ходу:

$$\Delta = (a + b) \cdot \sin \varphi = d \cdot \sin \varphi .$$

Якщо на цій різниці ходу вкладається ціле число довжини хвиль, виникає інтерференційний максимум. Таким чином, умовою основних дифракційних максимумів є:

$$d \cdot \sin \varphi = m\lambda , \quad (18.2)$$

де  $d$  – стала ґрат;  $\varphi$  – кут дифракції;  $m$  – порядок дифракційного максимуму;  $\lambda$  – довжина світлової хвилі.

#### Частина 1

Якщо кути дифракції малі (рис. 5.2.3), то  $\sin \varphi \approx \operatorname{tg} \varphi$ , тобто

$$\operatorname{tg} \varphi \approx \frac{l_m}{L} . \quad (18.3)$$

З виразів (18.2) та (18.3) випливає, що довжина хвилі

$$\lambda = \frac{d \cdot l_m}{m \cdot L} , \quad (18.4)$$

де  $l_m$  – відстань від центрального максимуму до дифракційного максимуму  $m$ -го порядку;  $L$  – відстань від ґрат до екрана.

---

#### Обладнання

Схему лабораторної установки зображено на рисунку 18.3. Джерелом світла є оптичний квантовий генератор ОКГ (лазер). Випромінювання лазера (ОКГ) проходить крізь дифракційні ґрати  $ДГ$  і створює на екрані  $E$  картину дифракції. Відстань від ґратки до екрана  $L$  та відстань від центрального максимуму до дифракційного максимуму  $m$ -го порядку вимрюється лінійкою.

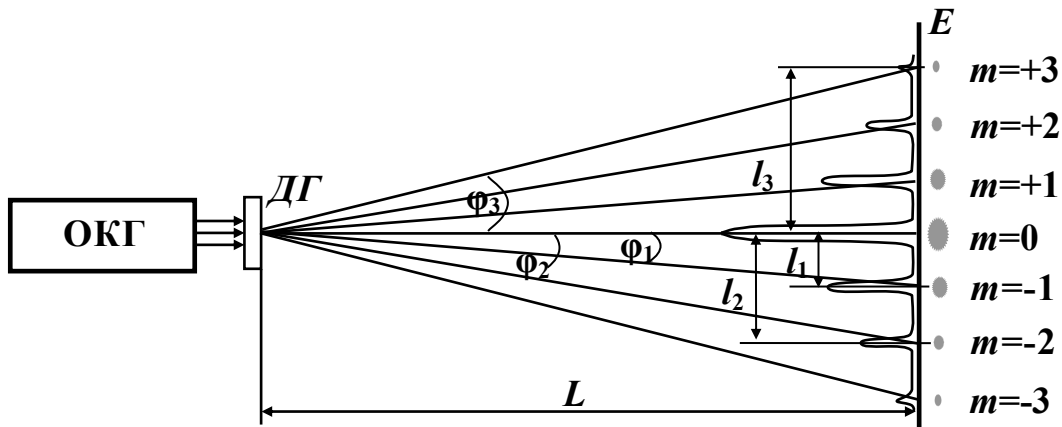


Рис.18.3

### Експериментальна процедура

До початку виконання дослідів підготувати таблицю 18.1 та 18.2 у програмі Excel.

1. Згідно з інструкцією ввімкнути лазер.
2. Встановити на шляху лазерного променя дифракційні ґрати з відомою кількістю штрихів  $N$ .
3. Визначити кількість штрихів  $N$  та ширину дифракційної ґрати  $l$ .
4. Спостерігаючи на екрані картину дифракції, виміряти відстані  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$  від центрального максимуму ( $m = 0$ ) до максимумів першого, другого і третього порядку ( $m = 1, 2, 3$ ).
5. Виміряти відстань  $L$  від ґрат до екрана.
6. Виконати операції пп. 2–3 для різних дифракційних ґрат (задається викладачем).
7. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 18.1.

### Розрахунки

Всі розрахунки виконувати у програмі Excel.

1. Розрахувати сталу  $d$  дифракційних ґрат за формулою (18.1).
2. Обчислити довжину світлової хвилі за формулою (18.4) для кожного вимірювання  $l_m$  для всіх типів ґрат.
3. Обчислити середнє значення довжини хвилі  $\lambda_{\text{сер}}$  для всіх типів ґрат.
4. Обчислити середнє значення довжини хвилі  $\lambda_{\text{сер}}$ .
5. Усі розрахунки виконати в програмі Excel та записати до таблиці 18.2

**Лабораторна робота 18. ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИФРАКЦІЙНИХ ГРАТ**

**Лабораторний звіт**

Таблиця 18.1

Задані та виміряні величини

$N_1$	$l, \text{ м}$	$L, \text{ м}$	$l_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$l_3, \text{ м}$
$N_2$			$l_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$l_3, \text{ м}$
$N_3$			$l_1, \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$l_3, \text{ м}$

Таблиця 18.2

Розрахунки шуканих величин

$d_1, \text{ м}$	$\lambda, \text{ м}$	$\lambda_{\text{сер}1}, \text{ м}$	$\lambda_{\text{сер}}, \text{ м}$
$d_2, \text{ м}$	$\lambda, \text{ м}$	$\lambda_{\text{сер}2}, \text{ м}$	
$d_3, \text{ м}$	$\lambda, \text{ м}$	$\lambda_{\text{сер}3}, \text{ м}$	

**Частина 2**

В основі другої частини лабораторної роботи є явище дифракції, яке виникає внаслідок внесення в паралельний пучок лазерних променів тонкої перешкоди (наприклад, волосини людини) завтовшки  $b$ . Хід променів у цьому випадку показаний на рис. 18.4.

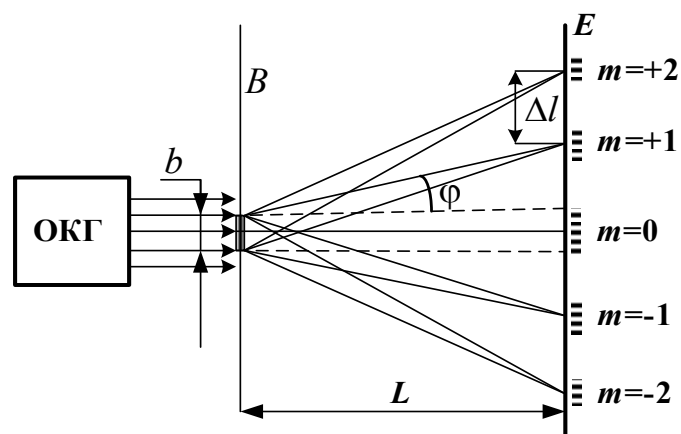


Рис. 18.4

**Лабораторна робота 18. ВИЗНАЧЕННЯ ДОВЖИНИ СВІТЛОВОЇ ХВИЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ ДИФРАКЦІЙНИХ ГРАТ**

Випромінювання лазера проходить крізь волосину  $B$  й утворює на екрані  $E$  картину дифракції. Формула (5.2.2) для випадку дифракції на одній перешкоді завширшки  $b$  (товщина волосини) матиме вигляд:

$$b \sin \varphi = m\lambda. \quad (18.5)$$

З виразів (18.2) і (18.3) випливає, що

$$b \cdot \frac{l_m}{L} = m\lambda, \quad (18.6)$$

де  $l_m$  – відстань від центрального максимуму до дифракційного максимуму  $m$ -го порядку.

Записавши вираз (18.6) для двох сусідніх максимумів та віднявши одне рівняння від іншого, отримуємо формулу для обчислення товщини волосини:

$$b = \frac{\lambda \cdot L}{\Delta l}, \quad (18.7)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання лазера, значення якої беруть із результатів обчислень, проведених у першій частині роботи;  $L$  – відстань від волосини до екрана;  $\Delta l$  – відстань між двома сусідніми максимумами або мінімумами дифракційної картини  $\Delta l = l_{m+1} - l_m$ .

---

### Експериментальна процедура

1. Волосину закріпити перпендикулярно до пучка променів лазера.
2. Три рази виміряти на екрані величину  $\Delta l$  між сусідніми максимумами різних порядків  $m$ .
3. Виміряти відстань  $L$  від ґрат до екрана.
4. Визначити довжину хвилі випромінювання ОКГ.
5. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 18.3.

---

### Розрахунки

Всі розрахунки виконувати у програмі Excel.

1. Для кожного виміру  $\Delta l_m$  обчислити значення  $b$  за формулою (18.7).
2. Знайти середнє значення товщини волосини  $b_{\text{сер}}$  в мікрометрах.
3. Усі розрахунки виконати в програмі Excel та записати до таблиці 18.4

---

**Лабораторний звіт**

Таблиця 18.3

Задані та виміряні величини

Відстань між максимумами $\Delta l_m$ , м			$L$ , м	$\lambda$ , м
$\Delta l_1$ , м	$\Delta l_2$ , м	$\Delta l_3$ , м		

Таблиця 18.2

Розрахунки шуканих величин

$b_1$ , м	$b_2$ , м	$b_3$ , м	$b_{\text{сер}}$ , м

---

**Контрольні запитання**

1. Що таке дифракція?
2. Сформулюйте принцип Гюйгенса – Френеля.
3. Що таке когерентність, почасова та просторова когерентність?
4. Які хвилі називають монохроматичними?
5. Чим відрізняється дифракція Фраунгофера від дифракції Френеля?
6. Що таке дифракційні ґрати? Назвіть характеристики дифракційних ґрат.
7. Що таке геометрична й оптична різниця ходу променів? Побудуйте хід променів за дифракції Фраунгофера і покажіть різницю ходу променів.
8. Запишіть умови дифракційних максимумів та мінімумів. Поясніть виникнення дифракційного спектра в білому світлі.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОЛЯРИЗОВАНОГО СВІТЛА

### Мета роботи:

- вивчити явище поляризації світла і методи одержання поляризованих променів;
- перевірити закон Малюса;
- встановити ступінь поляризованості лазерного випромінювання.

### Список обладнання:

- оптичний квантовий генератор ОКГ (лазер);
- аналізатор;
- фотоприймач;
- гальванометр;

### Долабораторна підготовка

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: поляризація світла; поляризація світла під час відбивання та заломлення на межі двох діелектриків; подвійне променезаломлення у кристалах; закон Малюса; поляризаційні прилади.

### Теоретичні основи

Дія світла на середовище зумовлена переважно вектором напруженості електричного поля електромагнітної хвилі, тому в оптиці цей вектор називають *світловим*. Якщо світловий вектор в кожному цузі хвиль має переважний напрямок коливань, то світло називають поляризованим, на відміну від неполяризованого, або природного, світла, для якого будь-який напрямок коливань світлового вектора трапляється з однаковою ймовірністю.

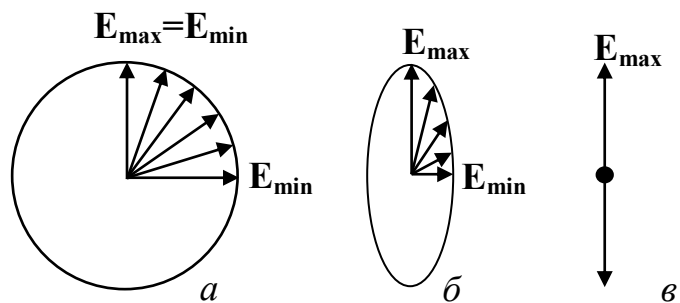


Рис. 19.1

У разі поширення світлового променя перпендикулярно до площини сторінки, основні випадки можливої орієнтації світлового вектора схематично показано на рис. 19.1. На рис. 19.1(а) показано природне світло, на рис. 19.1(б) зображено частково поляризоване світло (світловий вектор коливається переважно у вертикальній площині), а рис. 19.1 (в) відповідає лінійно-поляризованому світлу (світловий вектор коливається тільки в одній, жорстко зафіксованій у просторі площині).

Оптичний прилад, під час проходження через який неполяризоване світло стає поляризованим, називається *поляризатором*. Площина поляризатора – це площина, у якій коливається світловий вектор пучка на виході з поляризатора. Поляризатор використовують також для аналізу стану поляризації світла. У цьому випадку його називають *аналізатором*.

Якщо площини поляризатора й аналізатора утворюють кут  $\alpha$ , то в разі падіння на аналізатор світла інтенсивністю  $I_0$  з нього вийде світловий пучок інтенсивністю (закон Малюса):

$$I = I_0 \cos^2 \alpha. \quad (19.1)$$

Нехай на аналізатор падає частково (еліптично) поляризоване світло. Тоді під час обертання аналізатора за законом Малюса інтенсивність світла на виході буде змінюватись від  $I_{\max}$  (площина поляризації світла паралельна до площини аналізатора) до  $I_{\min}$  (площина аналізатора перпендикулярна до площини поляризації світла).

Стан поляризації світла характеризують ступенем поляризації:

$$k = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \times 100\%. \quad (19.2)$$

Для лінійно поляризованого світла  $k = 1$ , для природного світла  $k = 0$ , а в разі частково поляризованого світла  $0 < k < 1$ .

Найбільш поширеними є поляризатори, принцип дії яких базується на явищі анізотропії та оптичного дихроїзму. Як відомо, в анізотропних кристалах можуть поширюватись лише лінійно поляризовані у взаємно перпендикулярних площинах звичайний і незвичайний промені. В оптично-дихроїчних кристалах коефіцієнт поглинання одного з променів такий великий, що цей промінь практично повністю поглинається на шляху порядку десяти мікрон і з кристала виходить фактично лінійно поляризоване світло. *Полярійд* – це два скла, між якими розміщено

тонкий шар оптично-дихроїчних мікрочисталів, орієнтованих в одному напрямі.

---

### Обладнання

Вимірювання для дослідження закону Малюса виконують на установці, схему якої наведено на рис. 19.2. Джерелом світла є лазер, одним з елементів якого є поляризатор, встановлений під кутом Брюстера, який на виході утворює лінійно поляризоване світло. Лазерний промінь проходить крізь аналізатор (поляроїд) А і потрапляє на фотоелемент Ф. Під дією світла у фотоелементі генерується фото-ЕРС, що призводить у колі до виникнення електричного струму. Для вимірювання струму використовується гальванометр Г. Значення струму є пропорційним інтенсивності світла.

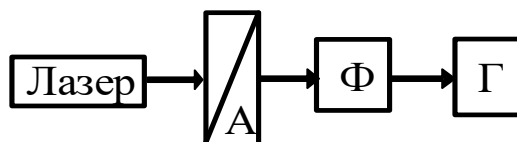


Рис. 19.2

---

### Експериментальна процедура

1. Згідно з інструкцією увімкнути лазер.
2. Встановити аналізатор у початкове положення ( $0^0$ )
3. Повертаючи аналізатор щоразу на деякий кут (задається викладачем), визначати силу струму у діапазоні кутів  $0...360^0$ .
4. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 19.1
5. Вимкнути лазер.

---

### Розрахунки

*Всі розрахунки виконувати у програмі Excel.*

1. За отриманими даними побудувати графік залежності  $I = f(\alpha)$ .
2. Користуючись графіком, визначити значення струму  $I_{\max}$  і  $I_{\min}$ .
3. Визначити ступінь поляризації  $k$  за формулою (19.2).
4. Усі розрахунки виконати в програмі Excel та записати до таблиці 19.2

---

**Лабораторний звіт**

Таблиця 19.1

Задані та виміряні величини

$\alpha^\circ$													
$I, \mu\text{A}$													

Таблиця 19.2

Розрахунки шуканих величин

$I_{\max}, \mu\text{A}$	$I_{\min}, \mu\text{A}$	$k$

---

**Контрольні запитання**

1. Що таке світло?
2. Що називають поляризацією світла?
3. Дайте означення неполяризованого, плоскополяризованого, частково поляризованого та поляризованого по колу світла.
4. Назвіть способи отримання плоскополяризованого світла. Які поляризаційні пристрої працюють на їхній основі?
5. Запишіть закон Брюстера. Що називають кутом Брюстера?
6. Що являють собою поляризатор та аналізатор?
7. Що таке ступінь поляризації частково поляризованого світла?
8. Запишіть закон Малюса та поясніть його.
9. Наведіть приклади застосування явища поляризації.

**ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ ВИХОДУ  
ЕЛЕКТРОНА З МЕТАЛУ МЕТОДОМ  
ГАЛЬМУВАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ**

---

**Мета роботи:**

- вивчити основні закономірності зовнішнього фотоефекту;
  - визначити роботу виходу та максимальну швидкість фотоелектронів;
  - розрахувати сталу Планка.
- 

**Список обладнання:**

- фотоелемент;
  - джерело світла;
  - змінні світлофільтри;
  - вимірювальний пристрій;
  - джерело живлення.
- 

**Долабораторна підготовка**

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: зовнішній фотоефект та його закони; гіпотеза Планка; рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту; фотоелементи та їхнє застосування.

**Теоретичні основи**

Процес взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, в результаті якого енергія фотонів передається електронам речовини, називається *фотоелектричним ефектом* (фотоефектом). Розрізняють зовнішній та внутрішній фотоефект. *Зовнішній фотоефект* – це процес, під час якого електрон під дією випромінювання виходить за межі поверхні речовини, а внутрішній призводить тільки до збільшення числа вільних електронів всередині речовини.

Уперше на це явище звернув увагу Рентген, дослідив та встановив відповідні закони Столетов, а теоретично обґрунтував зовнішній фотоефект Ейнштейн на основі квантової теорії світла (*гіпотези Планка*), згідно з якою світло випромінюється і поглинається речовиною окремими порціями – квантами (або фотонами).

Енергія фотона, який відповідає світловій хвилі з частотою  $\nu$  (довжиною хвилі  $\lambda$ ), визначається за формулою:

$$\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda},$$

**Лабораторна робота 20. ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНА З МЕТАЛУ МЕТОДОМ ГАЛЬМУВАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ**

де  $h$  – стала Планка;  $c$  – швидкість світла у вакуумі;  $\lambda$  – довжина хвилі світла.

Унаслідок падіння пучка фотонів на поверхню металу виникає взаємодія фотона з електроном, в результаті якої фотон віддає електрону всю свою енергію. Якщо ця енергія перевищує роботу виходу електрона з металу ( $A_{\text{вих}}$ ), то електрон виходить за межі матеріалу та має певну кінетичну енергію. Кінетична енергія буде максимальною у тому випадку, коли електрон, виходячи з металу, не витрачав енергію на зіткнення з кристалічною ґраткою та іншими електронами.

Тоді, відповідно до закону збереження енергії, *формула Ейнштейна для зовнішнього фотоелектричного ефекту* матиме такий вигляд:

$$h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{m\nu_{\text{max}}^2}{2}, \quad (20.1)$$

тобто енергія фотона внаслідок взаємодії з електроном повністю витрачається на «виривання» електрона з поверхні речовини та надання йому кінетичної енергії.

Рівняння (20.1) називається рівнянням Ейнштейна для зовнішнього фотоелектричного ефекту і пояснює всі основні його закони (*закони Столетова*):

- *перший*: сила фотоструму насичення не залежить від частоти світла, яке падає на речовину, а визначається тільки його інтенсивністю;
- *другий*: максимальна швидкість фотоелектронів залежить від частоти світла і не залежить від його інтенсивності;
- *третій*: існує червона межа фотоелектричного ефекту, тобто така максимальна довжина хвилі (або мінімальна частота), за якої фотоелектричний ефект ще можливий.

Підтвердженням цих законів є вимірювання сили струму та напруги на установці, що має складатись з фотоелемента, джерела світла та вимірювальних приладів. За одержаними результатами можна побудувати типові *вольт-амперні характеристики* (ВАХ) фотоелектричного ефекту (рис. 20.1), тобто залежність фотоструму від напруги між катодом та анодом за сталої освітленості катода  $\Phi_1$  та  $\Phi_2$ , причому  $\Phi_1 > \Phi_2$ .

З графіка  $I=f(U)$  видно, що за деякої напруги  $U_H > 0$  фотострум досягає максимального значення і далі залишається незмінним. Цей струм, який називають *струмом насичення*  $I_{\text{нас}}$ , відповідає стану, коли всі фотоелектрони, котрі вириваються світлом за одиницю часу з катода, досягають анода, що й підтверджує перший закон Столетова.

З ВАХ (рис. 20.1) можна побачити, що за відсутності напруги між катодом й анодом

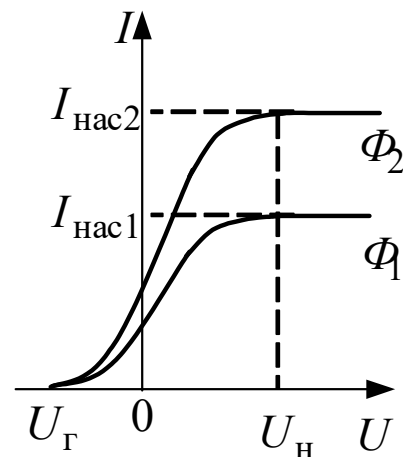


Рис. 20.1

**Лабораторна робота 20. ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНА З МЕТАЛУ МЕТОДОМ ГАЛЬМУВАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ**

сила фотоструму відмінна від нуля. Це пояснюється тим, що деякі електрони, які вириваються з катода під дією світла, мають кінетичну енергію, достатню для того, щоб досягти анода незалежно від дії зовнішнього електричного поля. Ці електрони утворюють фотострум за нульової напруги (рис. 20.1).

Для того щоб зовсім припинити цей струм, між катодом й анодом потрібно створити поле з напругою  $U_{\Gamma}$ , що повністю гальмує електрони.

Тоді, як відомо, робота електричного поля внаслідок гальмування електронів дорівнюватиме зміні їхньої кінетичної енергії:

$$eU_{\Gamma} = \frac{m\nu_{\max}^2}{2}, \quad (20.2)$$

де  $e$  – заряд електрона;  $\nu_{\max}$  – максимальне значення швидкості фотоелектронів;  $m$  – маса електрона;  $U_{\Gamma}$  – гальмівна напруга.

Запишемо рівняння (20.1) у вигляді

$$eU_{\Gamma} = h\nu - A_{\text{вих}},$$

звідки:

$$U_{\Gamma} = \frac{h}{e}\nu - \frac{A_{\text{вих}}}{e}. \quad (20.3)$$

Вимірявши залежність гальмівної напруги для частоти падаючого світла можна побудувати графік залежності  $U_{\Gamma} = f(\nu)$ . Ця залежність буде лінійною і її графіком буде пряма лінія виду  $y = k \cdot x - b$ . З графіка залежності  $U_{\Gamma} = f(\nu)$  (див. рис. 20.2) можна визначити червону межу фотоефекту  $\nu_{\min}$  та обчислити роботу виходу  $A_{\text{вих}}$  електронів з речовини.

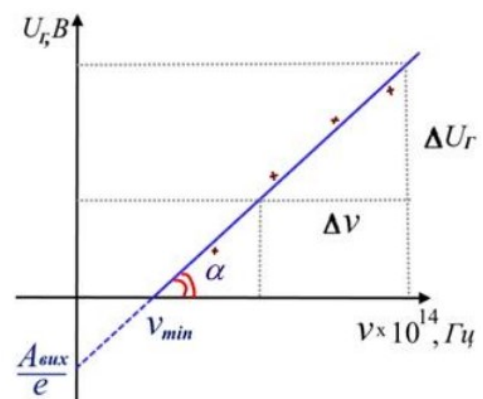


Рис. 20.2

Графіком буде пряма лінія, з градієнту якої можна визначити значення сталої Планка  $h$ . Кутовий коефіцієнт прямої дорівнює тангенсу кута нахилу графіка до осі абсцис  $k = \text{tg}\alpha$ , звідки можна оцінити величину сталої Планка:

$$h = e \cdot \text{tg}\alpha = e \cdot \frac{\Delta U_{\Gamma}}{\Delta \nu}. \quad (20.4)$$

Обчислити роботу виходу  $A_{\text{вих}}$  електронів з речовини можна з формулою:

$$A_{\text{вих}} = h\nu_{\min} \quad (20.5)$$

### Обладнання

У роботі викрисується експериментальна установка ФПК-10 (рис. 20.3), яка складається з об'єкту дослідження та вимірювального

**Лабораторна робота 20. ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНА З МЕТАЛУ  
МЕТОДОМ ГАЛЬМУВАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ**

пристрою. Конструкція об'єкту дослідження виконана у вигляді збірного корпусу, в якому встановлені освітлювач **1** (спектральна ртутна лампа) з джерелом живлення, блок **2** інтерференційних світлофільтрів із відомими довжинами хвиль («1» – 407 нм, «2» – 435 нм, «3» – 546 нм, «4» – 578 нм) та пристрій регулювання освітленості **3**. Зміна освітленості фотоелемента плавно коригується за допомогою двох поляризаційних світлофільтрів.

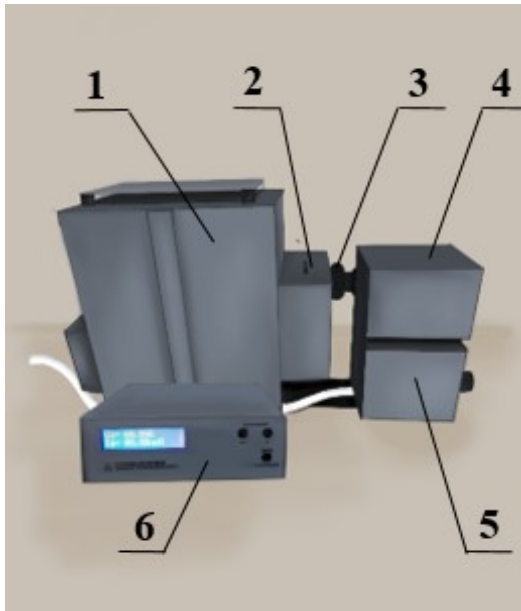


Рис. 20.3

Змінні фотоприймачі **4** з фотоелементами Ф-8 і Ф-13 встановлюються на верхню кришку підсилювача фотоструму **5**, який прикріплено до корпусу об'єкту дослідження за допомогою кронштейна. При встановленні фотоприймачів їхній приймальний отвір суміщається з вихідним вікном освітлювача та закривається за допомогою бленди **3**.

Вимірювальний пристрій **6** дає змогу проводити вимірювання сили струму фотоелемента, встановлювати та

вимірювати напругу на фотоелементі, а також здійснювати функції керування режимами прямого або зворотного вимірювань. Прилад живиться від мережі напругою 220 В і вмикається за допомогою вимикача на задній панелі приладу.

### Експериментальна процедура

*До початку виконання досліду підготувати таблицю 20.1 та 20.2 у програмі Excel.*

1. Встановити на об'єкт дослідження фотоприймач **4** з фотоелементом так, щоб бленда освітлювача **3** сумістилася з отвором вікна фотоелемента.
2. Увімкнути вимірювальний пристрій вимикачем на його задній панелі. При цьому на передній панелі пристрою мають загорітися індикатори « $U_a$  В», « $I_f$  мкА», які мають значення «0».
3. Після 5-хвилинного прогріву ручками «УСТАНОВКА "0"» на об'єкті дослідження встановіть нульове значення « $I_f$  мкА» за допомогою регулятора балансу підсилювача «ГРУБО» і «ТОЧНО» (блок світлофільтрів **2** має бути в положенні «5», коли лампа перекрита).

**Лабораторна робота 20. ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНА З МЕТАЛУ  
МЕТОДОМ ГАЛЬМУВАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ**

4. Увімкніть об'єкт дослідження вимикачем на його боковій панелі та протягом 15 хвилин дайте прогрітися ртутній лампі освітлювача 1.
5. Виберіть за допомогою кнопки «ОБНУЛЕННЯ – НАПРЯМ» необхідний режим вимірювання, утримуючи кнопку протягом 1 с. **Увага!** Сила фотоструму не повинна перевищувати 20 мкА! У режимі прямого струму напруга не повинна перевищувати 40 В, а у режимі зворотного струму – не повинна перевищувати -2 В!
6. Виберіть світлофільтр «4», встановивши диск блоку світлофільтрів в положення «4».
7. Змінюючи значення напруги  $U_a$  за допомогою кнопок «+» або «-», змінюйте покази фотоструму  $I_\phi$  до нульового значення ( $I_\phi=0$ ) для визначення гальмівної напруги  $U_\Gamma$  – такого значення запірної напруги при якому електричне поле між катодом і анодом буде гальмувати електрони, що вилітають з катода під дією світла, щоб вони не досягали анода.  
**Увага!** При визначенні гальмівної напруги фотоелемента необхідно нульове значення струму зчитувати при зменшенні напруги від нульового значення до значення гальмівної напруги, а не навпаки. Не рекомендується також встановлювати значення напруги нижче гальмівної.
8. Виконайте пп. 4-7 для інших світлофільтрів, встановлюючи диск блоку світлофільтрів в положення «5» та перевіряючи установку нуля фотоструму  $I_\phi$  при нульовому значенні напруги  $U_a$ .
9. Після закінчення роботи вимкніть живлення установки мережевими вимикачами (на задній панелі вимірювального пристрою і на боковій панелі об'єкта дослідження) та відключіть вимірювальний пристрій та об'єкт дослідження від електричної мережі.  
**Увага!** Режим роботи установки переривчастий: через кожні 45 хвилин роботи необхідно робити перерву на 15-20 хвилин.
10. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 20.1.

### **Розрахунки**

*Всі розрахунки виконувати у програмі Excel.*

1. Розрахувати у програмі Excel та записати до таблиці 20.2 значення довжини хвилі  $\lambda$  для кожного з світлофільтрів.
2. Розрахувати максимальну швидкість фотоелектронів  $v_{\max}$  для кожного з випадків (окремих світлофільтрів), застосувавши формулу (20.2) у програмі Excel.
3. Побудувати графік залежності  $U_\Gamma = f(v)$  у програмі Excel із зазначенням рівняння прямої.
4. З рівняння прямої визначити роботу виходу електрона з даного металу у електрон-вольтах (eВ).
5. Розрахувати  $A_{\text{вих}}$  у джоулях, враховуючи, що  $1 \text{ eВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .

**Лабораторна робота 20. ВИЗНАЧЕННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНА З МЕТАЛУ МЕТОДОМ ГАЛЬМУВАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ**

- З рівняння прямої визначити градієнт та розрахувати значення сталої Планка  $h$  (формула 20.4).
- Використати метод екстраполяції, тобто апроксимувати значення червоної межі фотоефекту  $\nu_{\min}$  за графіком та розрахувати у програмі Excel червону межу досліджуваного світлочутливого шару фотоелемента  $\lambda_{\text{чер}(1)}$  за формулою:

$$\lambda_{\text{чер}} = \frac{c}{\nu_{\min}}, \quad \text{де } c=3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

- Обчислити червону межу досліджуваного світлочутливого шару фотоелемента  $\lambda_{\text{чер}2}$ .
- Розрахувати середнє значення  $\lambda_{\text{черсер}}$ .
- Усі розрахунки виконати в програмі Excel у таблиці 20.2.

**Лабораторний звіт**

*Таблиця 20.1*

*Задані та виміряні величини*

Колір світла	$\lambda$ , м	$U_G$ , В	$c$ , м/с	$e$ , Кл	$m_e$ , кг

*Таблиця 20.2*

*Розрахунки шуканих величин*

Колір світла	$\nu$ , Гц	$\nu_{\max}$ , м/с	$A_{\text{вих}}$ , еВ	$A_{\text{вих}}$ , Дж	$tg\alpha$ , (Дж·с)/Кл	$h$ , Дж·с	$\nu_{\min}$ , Гц	$\lambda_{\text{чер}(1)}$ , м	$\lambda_{\text{чер}(2)}$ , м	$\lambda_{\text{черсер}}$ , м

**Контрольні запитання**

- Що називають фотоелектричним ефектом? У чому різниця між внутрішнім та зовнішнім фотоефектом?
- Наведіть схему експериментальної установки для дослідження зовнішнього фотоефекту.
- Побудуйте типову вольт-амперну характеристику. Що називають фотострумом насичення і гальмівною різницею потенціалів?
- Сформулюйте закони Столетова для зовнішнього фотоефекту.
- Що називають червоною межею фотоефекту?
- Запишіть і поясніть рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту.
- Що таке квант світла (фотон)?
- Що таке робота виходу електрона з металу?
- Як пояснити закони фотоефекту на підставі рівняння Ейнштейна?
- Охарактеризуйте фотоелементи та їхнє застосування

## **ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ НАПІВПРОВІДНИКА**

---

### **Мета роботи:**

- вивчити елементи зонної теорії твердих тіл;
  - визначити ширину забороненої зони напівпровідника.
- 

### **Список обладнання:**

- напівпровідниковий терморезистор;
  - термометр;
  - масляна баня;
  - нагрівник;
  - омметр;
  - джерело живлення;
- 

### **Долабораторна підготовка**

*Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал:* розщеплення енергетичних рівнів та виникнення енергетичних зон у кристалах; принцип Паулі; розподіл електронів за енергетичними станами; поділ твердих тіл на провідники, напівпровідники та діелектрики відповідно до зонної теорії.

### **Теоретичні основи**

Для розгляду поведінки електрона в твердому тілі можна застосувати рівняння Шредінгера і знайти допустимі стани й значення його енергії. Такий підхід приводить до створення *зонної теорії твердого тіла*, в основі якої лежить адіабатичне наближення. Оскільки маси та швидкості ядер та електронів суттєво відрізняються, можна вважати, що ядра у вузлах кристалічної ґратки нерухомі, а рух електронів розглядається в постійному періодичному полі ядер. Застосовується також наближення самоузгодженого поля. Взаємодія певного електрона з рештою електронів замінюється дією на нього *стаціонарного періодичного електричного поля*, яке утворюється усередненим в просторі зарядом решти електронів і ядер. Таким чином,

## Лабораторна робота 21. ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ НАПІВПРОВІДНИКА

в зонній теорії багатоелектронна задача зводиться до задачі про рух одного електрона в зовнішньому періодичному полі – усередненому і самоузгодженому полі всіх ядер й електронів.

Розглянемо уявно процес утворення твердого тіла з ізольованих атомів. Поки атоми ізольовані, тобто знаходяться на макроскопічних відстанях один від одного, їхні схеми енергетичних рівнів збігаються (рис. 21.1). Уразі "стискання" моделі до кристалічної ґратки, тобто коли

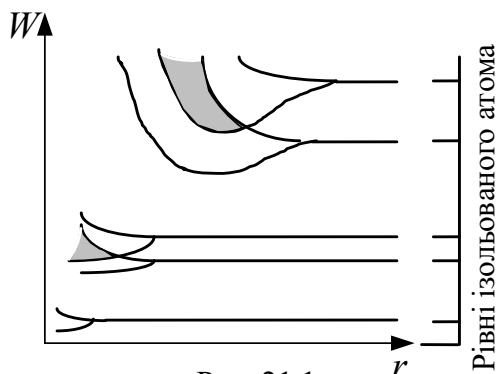


Рис. 21.1

відстані між атомами стануть однаковими з міжатомними відстанями у твердих тілах, взаємодія між атомами призведе до того, що енергетичні рівні атомів змістяться, розщепляться та розширяться в зони, утворюючи так званий *зонний енергетичний спектр*.

Із рис. 21.1, на якому зображено розщеплення рівнів як функції відстані між атомами, видно, що суттєво розщеплюються лише рівні зовнішніх, валентних електронів, які найслабше пов'язані з ядром і мають найбільшу енергію, а також більш високі рівні, які в основному стані атома взагалі не зайняті електронами. Рівні внутрішніх електронів або зовсім не розщеплюються, або розщеплюються слабо.

Утворення зонного енергетичного спектра в кристалі є квантово-механічним ефектом і впливає із співвідношення невизначеностей Гейзенберга та принципу Паулі. В кристалі валентні електрони атомів можуть переходити від атома до атома крізь потенціальні бар'єри, що розділяють атоми, тобто переміщуватися без зміни повної енергії (тунельний ефект). Це призводить до того, що середній час життя валентного електрона в цьому атомі порівняно з ізольованим атомом суттєво зменшується і становить приблизно  $10^{-15}$  с (для ізольованого атома – приблизно  $10^{-8}$  с). Час життя електрона в будь-якому стані пов'язаний з невизначеністю його енергії (ширина рівня) співвідношенням невизначеностей  $\Delta W \cdot \tau \geq \hbar$ . Отже, якщо природна ширина спектральної лінії становить приблизно  $10^{-7}$  еВ, то в кристалах вона сягає 1...10 еВ, тобто енергетичні рівні валентних електронів розширюються в зону дозволених значень енергії.

## Лабораторна робота 21. ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ НАПІВПРОВІДНИКА

Енергія зовнішніх електронів може набувати значення в межах зафарбованих на рис. 21.1 ділянок, які називаються дозволеними енергетичними зонами. Кожна дозволена зона «вміщує» стільки близько розміщених дискретних рівнів, скільки атомів містить кристал. Відстань між сусідніми рівнями в зоні становить приблизно  $10^{-22}$  еВ. Оскільки це дуже мале значення, зони можна вважати практично неперервними, але факт кінцевого числа рівнів у зоні відіграє важливу роль у розподілі електронів за енергетичними станами.

Дозволені енергетичні зони розділені зонами заборонених значень енергії, які називаються забороненими енергетичними зонами. В заборонених зонах електрони перебувати не можуть. Ширина зон (дозволених і заборонених) не залежить від розмірів кристалу. Дозволені зони тим ширші, чим слабший зв'язок електрона з ядром.

Зонна теорія твердих тіл дає змогу з єдиної позиції розглянути існування металів, діелектриків і напівпровідників, пояснюючи відмінності їхніх електричних властивостей, по-перше, *неоднаковим заповненням електронами дозволених зон і, по-друге, шириною заборонених зон.*

Ступінь заповнення електронами енергетичних рівнів в зоні визначається заповненням відповідного атомного рівня. Якщо, наприклад, якійсь рівень атома повністю заповнений електронами відповідно до принципу Паулі, то утворена з нього зона також повністю заповнена. Загалом можна говорити про *валентну зону*, яка повністю заповнена електронами й *утворена з енергетичних рівнів внутрішніх електронів вільних атомів*, і про *зону провідності* (вільна зона), яка або частково заповнена електронами, або вільна й *утворена з енергетичних рівнів зовнішніх «колективізованих» електронів ізолюваних атомів.* Зона, яка заповнена електронами частково або вільна (за  $T = 0$  К), називається зоною провідності. Верхня зона, яка повністю заповнена електронами (за  $T = 0$  К), називається валентною зоною.

Залежно від міри заповнення зон електронами та ширини забороненої зони можливі чотири випадки, зображені на рис. 21.2.

На рис. 21.2, *a* верхня зона, яка містить електрони, заповнена лише частково, тобто в ній є вакантні рівні. У цьому випадку електрон, отримавши будь-яку незначну енергію (наприклад, завдяки тепловому збудженню або електричному полю), зможе перейти на більш високий

## Лабораторна робота 21. ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ НАПІВПРОВІДНИКА

енергетичний рівень тієї ж зони, тобто стати вільним і брати участь в процесі провідності. Таким чином, якщо в твердому тілі є зона, яка частково заповнена електронами, то таке тіло завжди буде провідником електричного струму. Саме цю властивість мають *метали*.

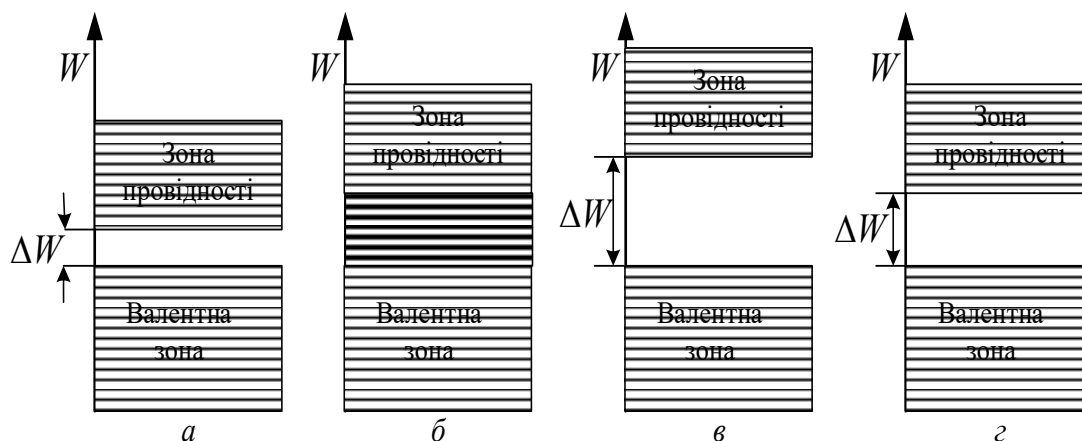


Рис. 21.2

Тверде тіло буде провідником електричного струму також в тому випадку, якщо валентна зона перекривається вільною зоною, що призводить до частково заповненої зони (рис. 21.2, б). В такому випадку утворюється так звана «гібридна» зона, яка заповнюється валентними електронами лише частково. Це є характерним для лужноземельних елементів (Be, Mg, Ca, Zn та інших). Отже, *тверде тіло буде провідником, якщо зона провідності заповнена електронами частково*.

Крім розглянутого вище перекриття зон, можливим є також перерозподіл електронів між зонами, які утворилися з рівнів різних атомів, в результаті чого замість двох частково заповнених зон в кристалі буде одна повністю заповнена (валентна) зона та одна вільна зона (зона провідності). Тверді тіла, у яких енергетичний спектр електронних станів складається з валентної зони та вільної зони провідності, будуть діелектриками або напівпровідниками залежно від ширини забороненої зони  $\Delta W$ .

Якщо ширина забороненої зони кристала  $\Delta W$  становить кілька електрон-вольт, то енергії теплового руху не вистачає для переходу електронів з валентної зони в зону провідності і кристал буде *діелектриком*, залишаючись ним за всіх реальних температур (рис. 21.2, в). Якщо ширина забороненої зони  $\Delta W$  невелика (порядку 1 eV), то перехід електрона з валентної зони в зону провідності може відбуватись порівняно легко або шляхом теплового збудження, або

**Лабораторна робота 21. ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ НАПІВПРОВІДНИКА**

завдяки зовнішньому джерелу, яке здатне надати електронам енергію не меншу, ніж ширина забороненої зони, і кристал буде *напівпровідником* (рис. 21.2, з).

Різниця між металами та діелектриками з погляду зонної теорії полягає в тому, що за  $T = 0$  К в зоні провідності металів є електрони, а в зоні провідності діелектриків їх немає. Різниця між діелектриками та напівпровідниками визначається шириною забороненої зони: для діелектриків вона становить кілька електрон-вольт, для напівпровідників – порядку 1 еВ. За температур близьких до 0 К, напівпровідники поведуться як діелектрики. З підвищенням температури в напівпровідниках зростає кількість електронів, які внаслідок теплового збудження переходять в зону провідності, отже, електрична провідність напівпровідників в такому випадку зростає.

У природі напівпровідники існують у вигляді елементів IV, V та VI груп періодичної системи елементів, а саме Si, Ge, As, Se, Te, а також хімічних сполук, наприклад оксидів, сульфідів, селенідів та сплавів елементів різних груп.

Розрізняють *власні та домішкові напівпровідники*. Прикладом власних напівпровідників можуть бути хімічно чисті речовини Ge, Se, а також багато хімічних сполук: InSb, GaAs, CdS тощо. За 0 К власні напівпровідники поведуть себе як діелектрики, оскільки в зоні провідності відсутні електрони.

За підвищення температури електрони з верхніх рівнів валентної зони можуть бути перекинуті на нижні рівні зони провідності, що призведе до появи вільних електронів й створить можливість існування електричного струму.

У фізиці твердого тіла доведено, що питома електрична провідність  $\gamma$  бездомішкового напівпровідника залежить від температури за експоненціальним законом:

$$\gamma = A \cdot \exp\left(-\frac{\Delta W}{2kT}\right).$$

Зважаючи на обернену залежність між питомим опором і питомою провідністю ( $\gamma = 1/\rho$ ) та на лінійну залежність між опором і питомим опором, можна визначити опір напівпровідника за формулою:

$$R = A \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{2kT}\right) \quad (21.1)$$

де  $\Delta W$  – ширина забороненої зони;  $k$  – стала Больцмана;  $T$  – абсолютна температура.

Коефіцієнт  $A$  також залежить від температури, але порівняно з експонентою ця залежність незначна, тому у досить вузькому інтервалі температур його можна вважати сталим.

Прологарифмуємо формулу (21.1):

$$\ln R = \ln A + \frac{\Delta W}{2k} \left(\frac{1}{T}\right). \quad (21.2)$$

Графік залежності  $\ln R = f(1/T)$  буде прямою лінією, градієнт якої дорівнюватиме:

$$\text{grad} = \frac{\Delta W}{2k} \quad (21.3).$$

### Обладнання

На рисунку 21.3 наведено схему експериментальної установки. На схемі застосовано такі позначення: 1 – термометр; 2 – масляна баня; 3 – терморезистор; 4 – нагрівник; 5 – омметр.

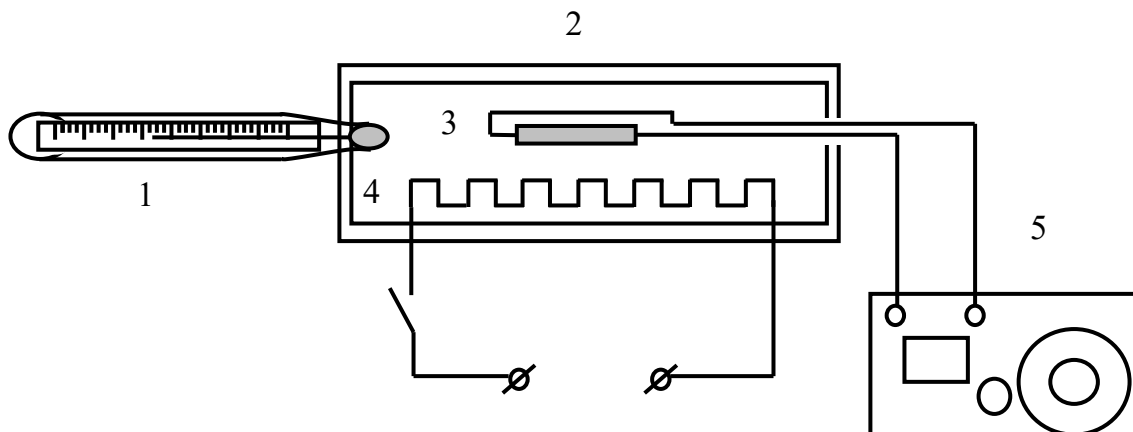


Рис. 21.3

В даній роботі використовують омметр компенсаційного типу (рис. 21.4). Для отримання значення опору затискємо кнопку 1 та поворотом лімба 2 виставляємо стрілку 3 омметра на значення “0”. Записуємо число, що вказано на лімбі 1 та помножаємо його на степінь, що вказаний на поворотній ручці 4.

**Лабораторна робота 21. ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ НАПІВПРОВІДНИКА**

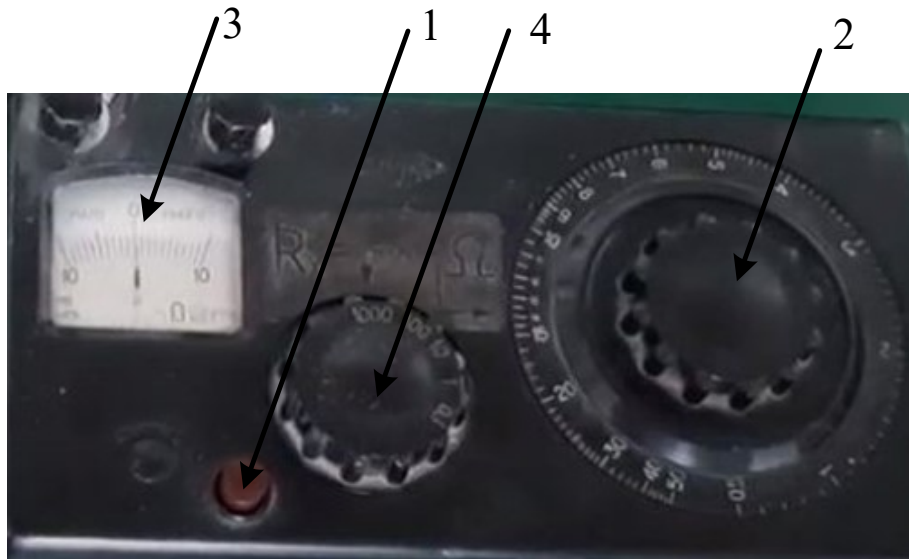


Рис. 21.4

---

**Експериментальна процедура**

До початку виконання досліді підготувати таблицю 21.1 та 21.2 у програмі Excel.

1. За допомогою омметра визначити опір терморезистора  $R$  за кімнатної температури  $t$  °С.
2. Увімкнути нагрівник і через кожні 5...10 °С за допомогою омметра виміряти опір напівпровідника.
3. Температура, яку вимірюють термометром, не повинна перевищувати 80 °С.
4. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 21.1.

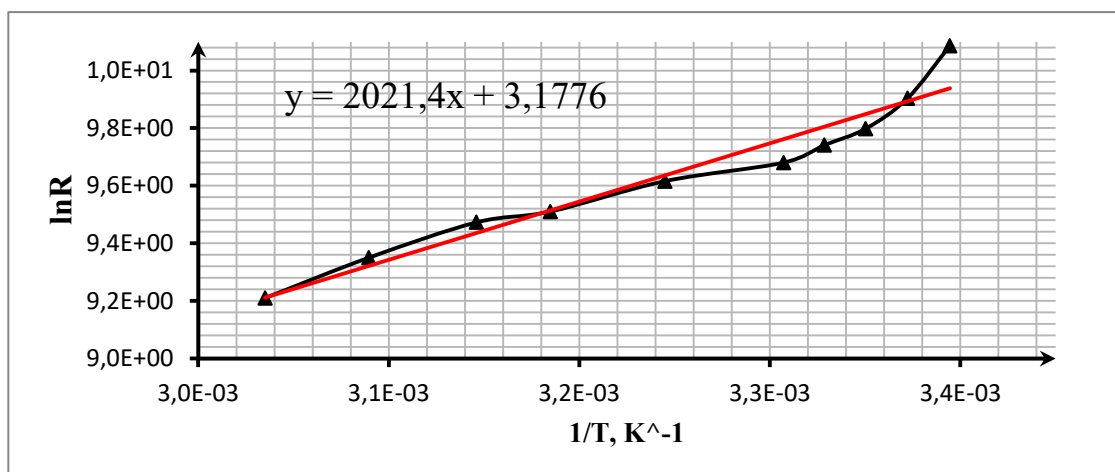
---

**Розрахунки**

Всі розрахунки виконувати у програмі Excel.

1. Розрахувати температуру у кельвінах ( $T = 273 + t$  °С).
2. Розрахувати значення  $\ln R$  та  $1/T$ .
3. Побудувати графік залежності  $\ln R = f(1/T)$  із зазначенням рівняння прямої (приклад 6.1).
4. З рівняння визначити градієнт та розрахувати ширину забороненої зони у джоулях із співвідношення (21.3).
5. Виразити значення ширини забороненої зони в електрон-вольтах, зважаючи на те, що  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ .
6. Усі розрахунки виконати в програмі Excel у таблиці 21.2

**Лабораторна робота 21. ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ШИРИНИ ЗАБОРОНЕНОЇ ЗОНИ НАПІВПРОВІДНИКА**



Приклад графіка 21.1

**Лабораторний звіт**

Таблиця 21.1

Задані та виміряні величини

$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$	$k, \text{Дж/К}$

Таблиця 21.2

Розрахунки шуканих величин

$T, \text{К}$	$\ln R$	$\frac{1}{T}, \text{К}^{-1}$	$grad, \text{К}$	$\Delta W, \text{Дж}$	$\Delta W, \text{eV}$

**Контрольні запитання**

1. Поясніть причину розщеплення енергетичних рівнів та виникнення енергетичних зон у кристалах з погляду зонної теорії твердого тіла.
2. Сформулюйте принцип Паулі.
3. Чим, з погляду зонної теорії твердого тіла, відрізняються провідники, напівпровідники та діелектрики?
4. Що називають валентною зоною? Що називають зоною провідності?
5. Поясніть, що таке заборонена зона? Що таке рівень Фермі?
6. Згідно з яким принципом заповнюються зони в кристали?
7. Елементи якої групи таблиці Менделєєва належать переважно до напівпровідників?
8. Як залежить опір напівпровідників від температури? Поясніть причину такої залежності.
9. Чи можна діелектрик зробити провідником? У який спосіб?

### **ВИМІРЮВАННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА**

---

#### **Мета роботи:**

- вивчити властивості  $p$ - $n$  переходу та його випрямну дію;
  - виміряти вольт-амперну характеристику напівпровідникового діода.
- 

#### **Список обладнання:**

- установка ФПК-06;
  - набір діодів.
- 

#### **Долабораторна підготовка**

Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал: власна та домішкова провідність напівпровідників; електронний та дірковий напівпровідники; контактна різниця потенціалів; контакт електронного та діркового напівпровідників ( $p$ - $n$  перехід).

#### **Теоретичні основи**

Перед виконанням роботи необхідно ознайомитись з теоретичними основами лабораторної роботи №21.

Основним елементом напівпровідникових випрямлячів є напівпровідникові (кристалічні) діоди, які мають ряд переваг порівняно з вакуумними діодами. Варто відмітити малі габарити, велику механічну міцність, довговічність та інші позитивні особливості напівпровідникових діодів.

В основі роботи напівпровідникових діодів лежить випрямна дія  $p$ - $n$  переходу (електронно-діркового переходу).  $P$ - $n$  перехід – це тонкий шар на межі між двома ділянками напівпровідника, які відрізняються типом провідності. Відомо, що в напівпровідниках можливі два різних процеси електропровідності – електронний і дірковий.

Для утворення домішкового напівпровідника з електронним типом провідності (напівпровідника  $n$ -типу) в кристал германію або кремнію (4-х валентної речовини) додають атоми домішок з більшою

валентністю, наприклад, 5-ти валентного миш'яку. Для утворення ковалентних зв'язків з атомами основної речовини миш'яку достатньо 4-х електронів. П'ятий електрон, не зв'язаний з атомами кристалічної ґратки, після надання йому незначної енергії  $\Delta W_1$  (рис. 22.1, а) стає вільним – електроном провідності. Атом домішки (миш'яку) перетворюється на додатний іон, який не може переміщуватись у кристалі. Домішки, які постачають електрони провідності, називають *донорами*.

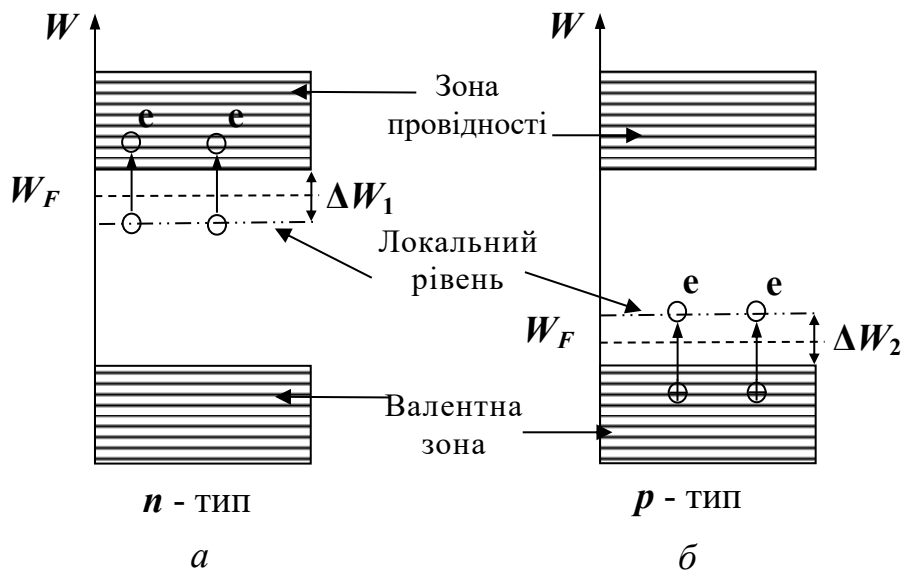


Рис. 22.1

Домішки викривлюють електричне поле ґратки, що призводить до появи локальних енергетичних рівнів, розміщених в забороненій зоні енергетичних зон кристала (рис. 22.1, а). Рівень Фермі в напівпровіднику *n*-типу лежить між донорним рівнем та дном зони провідності (рис. 22.1, а).

Для утворення домішкового напівпровідника з дірковою провідністю (напівпровідника *p*-типу) в кристал германію або кремнію додають атоми домішок з меншою валентністю, наприклад, бору, який має три валентні електрони. Трьох валентних електронів атома бору не вистачає для утворення подвійного ковалентного зв'язку з чотирма сусідніми атомами основної речовини. Тому атом бору захоплює один з валентних електронів германію (або кремнію) і перетворюється у негативно заряджений іон. На місці захопленого електрона залишається дірка – квазічастинка, яка має додатний заряд, який за величиною

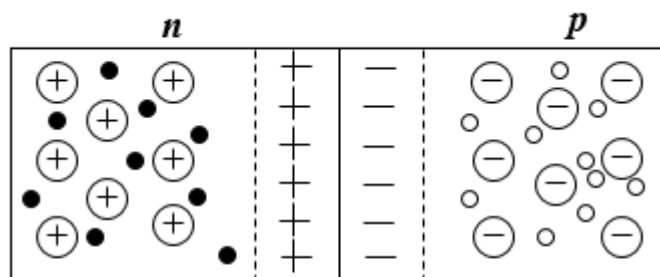
дорівнює заряду електрона. Після надання дірці незначної кількості енергії  $\Delta W_2$  (рис. 22.1, б) вона стає вільним носієм заряду.

Домішкові атоми, які можуть захоплювати електрони з валентної зони, називаються *акцепторами*. Акцепторні рівні енергії розміщені трохи вище від верхнього краю валентної зони основного кристала (див. рис. 22.1, б). Рівень Фермі в напівпровідниках *p*-типу лежить між верхнім рівнем валентної зони та акцепторним рівнем (див. рис. 22.1, б).

Отже, якщо концентрація вільних електронів у напівпровіднику більша за концентрацію дірок, то такий напівпровідник має електронну провідність і називається *напівпровідником n-типу*. Якщо перевищує концентрація дірок, то напівпровідник має діркову провідність і носить назву *напівпровідник p-типу*.

Розглянемо процеси на межі двох напівпровідників з різним типом провідності (рис. 22.2). Оскільки концентрація вільних електронів в *n*-області є більшою, ніж в

*p*-області, то електрони дифундують через контакт в бік *p*-області. У зворотному напрямку дифундують дірки. Потрапляючи в ділянки з протилежною провідністю, електрони рекомбінують з дірками,



- – електрон
- – дірка
- ⊕ – донорний іон
- ⊖ – акцепторний іон

Рис. 22.2

і поблизу контакту спостерігається зменшення концентрації вільних електронів і дірок. Оскільки атомні залишки в *n*-області заряджені позитивно, а в *p*-області – негативно, то в *n*-області біля межі накопичується позитивний заряд, а в *p*-області – негативний. Утворюється так званий *p-n* перехід. Це призводить до виникнення між напівпровідниками *p*- і *n*-типу контактної різниці потенціалів (потенціального бар'єру), що перешкоджає подальшому переміщенню через межу основних носіїв струму – електронів з *n*-області і дірок з *p*-області.

У той же час електричне поле, що утворюється на межі, стимулює рух через *p-n* перехід неосновних носіїв струму. За відсутності зовнішнього електричного поля повний струм через *p-n* перехід

дорівнює нулю завдяки динамічній рівновазі, що встановлюється на межі, коли середня кількість зарядів, які рухаються проти поля, врівноважується зарядами, що проходять межу в протилежному напрямку.

Дослідним шляхом з'ясовано, що в деяких випадках контакт двох напівпровідників має властивість проводити електричний струм переважно в одному напрямку.

Під'єднаємо розглянуту систему напівпровідників до електричного поля так, щоб зовнішня різниця потенціалів зменшувала контактну (прямий напрямок рис. 22.3, а). У такому випадку зменшується висота потенціального бар'єра для основних носіїв струму. Зовнішнє електричне поле «притискує» основні носії струму до межі,

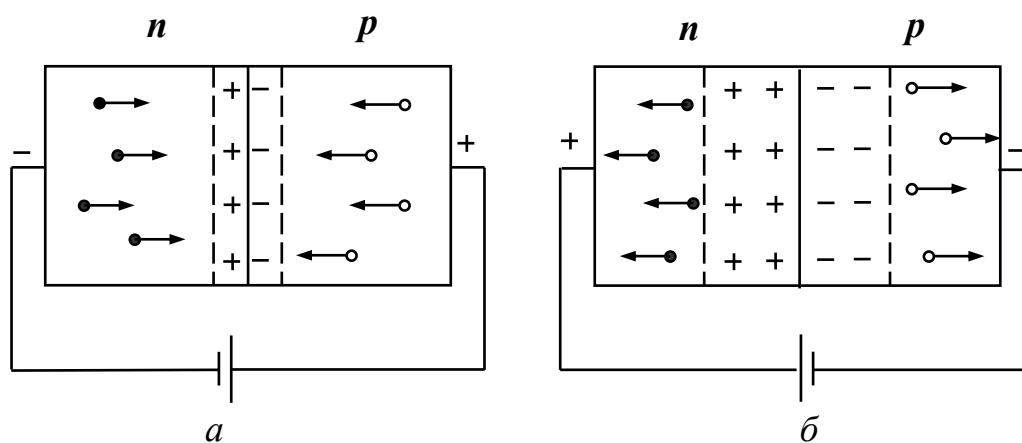


Рис. 22.3

через що ширина  $p$ - $n$  переходу зменшується. Відповідно зменшується опір  $p$ - $n$  переходу – тим більше, чим більша зовнішня напруга. Через  $p$ - $n$  перехід іде струм, зумовлений рухом основних носіїв струму, сила якого зі збільшенням напруги зростає за експоненціальним законом.

Зміна полярності зовнішньої батареї (обернений напрямок) призводить до збільшення висоти потенціального бар'єра для основних носіїв струму (рис. 22.3, б). Зовнішнє електричне поле «відтягує» основні носії струму від межі, внаслідок чого ширина  $p$ - $n$  переходу і його опір збільшуються. Основні носії не можуть подолати потенціального бар'єра. Тим часом потік неосновних носіїв струму не змінюється (для них бар'єра немає). Через  $p$ - $n$  перехід проходить невеликий струм  $I_n$  (струм насичення), сила якого майже не залежить від напруги.

**Лабораторна робота 22. ВИМІРЮВАННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА**

Таким чином, *p-n* перехід має властивість односторонньої провідності, тому може бути використаний для випрямлення змінного струму.

Залежність сили струму через *p-n* перехід від прикладеної напруги  $I = f(U)$  як в прямому, так і в оберненому напрямках має назву вольт-амперної характеристики напівпровідникового випрямляча ВАХ (рис. 22.4).

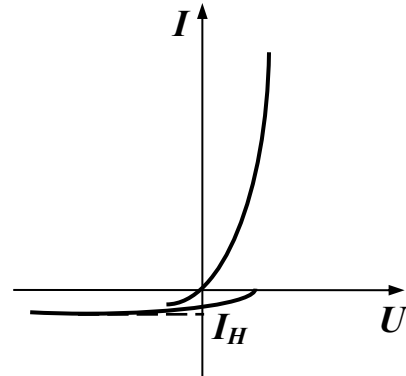


Рис. 22.4

**Зауваження.** При включенні діода з полярністю, що відповідає рис. 22.3, б, провідність запірного прошарку стає близькою до провідності діелектриків. Тоді *p-n*-перехід можна розглядати як еквівалентний конденсатор, що має певну електроємність *C*. Наявність електроємності важлива при роботі діода у високочастотних схемах.

Установка ФПК-06 дозволяє вимірювати цю електроємність. Тому додатково до ВАХ у досліджуваних діодів вимірюється залежність ємності *C* діода від напруги *U*, тобто його вольт-фарадна характеристика ВФХ  $C = f(U)$

**Обладнання**

Робота установки ФПК-06 базується на однокристальному процесорі з відповідними додатковими пристроями, які дозволяють: а) встановлювати необхідні значення величини і полярності напруги, яка подається на *p-n*-перехід досліджуваного діода; б) вимірювати ємності *p-n*-переходу і струму через нього в залежності від прикладеної напруги; в)



Рис. 22.1

здійснювати функції управління установкою (регулювання напруги, установка режимів роботи при знятті ВАХ прямої, ВАХ оберненої або ВФХ, перемикання діодів).

Загальний вигляд установки показано на рис. 22.5. На передній панелі установки розміщені: рідкокристалічний індикатор 1, гніздо-тримач для підключення досліджуваного зовнішнього діода 2 та елементи управління і регулювання 3...6.

На задній панелі установки розташовані мережевий шнур з вишкою, вимикач «МЕРЕЖА», клема заземлення та утримувачі запобіжників. За допомогою мережевого шнура установка підключається до мережі електроживлення (220 В, 50 Гц).

В установці передбачено три вмонтованих діоди різних типів, які видно у віконці над гніздом-тримачем 2. Їм присвоєні постійні номери VD2, VD3, VD4. Їхні характеристики використовують для порівняння з характеристиками досліджуваних діодів, що не входять до складу пристрою. Таким діодам автоматично присвоюється номер VD1. Якраз для них і передбачено гніздо-тримач 2, куди їх встановлюють, дотримуючись при цьому полярності діода. Вибір діода, характеристики якого будуть вимірюватись, здійснюється за допомогою органів управління.

При первинному вмиканні установки ФПК-06 в мережу живлення до схеми вимірювань завжди підключається зовнішній досліджуваний діод VD1. Послідовним натисканням кнопки 5 «ДІОД / ОБНУЛЕННЯ» можна здійснити перемикання схеми на будь-який з діодів VD1, VD2, VD3, VD4.

Звертаємо увагу, що кнопка 5 є багатофункціональною. Її одноразове натискання в режимі вимірювань приводить до обнулення напруги, тобто повернення в режим « $U = 0,00$  В», « $I = 0,00$  мА». В цьому режимі подальше натискання кнопки 5 знову змінюватиме підключений діод.

Вибір вимірюваної характеристики здійснюють за допомогою кнопки 6 «ВАХ / ВФХ». Режим вимірювання – зняття прямої або оберненої ВАХ – змінюють за допомогою кнопки 4 «ПРЯМА / ОБЕРНЕНА». Групою кнопок 3 «НАПРУГА +», «НАПРУГА –» змінюють величину напруги на  $p-n$ -переході.

Всі дії з регуляторами (ручками) управління будуть відображені на екрані рідкокристалічного дисплея 1. В першу чергу – номер досліджуваного діода (VD1...VD4), вимірювана характеристика (ВАХ чи ВФХ), режим роботи при зніманні ВАХ (ПРЯМА чи ОБЕРНЕНА). Крім того, на дисплеї 1 відображаються величини напруги  $U$ , струму  $I$  чи ємності  $C$ , а також одиниці їх вимірювання.

---

### **Експериментальна процедура**

*До початку виконання досліду підготувати таблицю 22.1 та 22.2 у програмі Excel.*

**Увага!** Перед виконанням лабораторної роботи студент отримує від викладача зразок досліджуваного діода (VD1) та вказівку, з яким із вмонтованих діодів (VDx) слід порівняти отримані результати.

1. Встановити досліджуваний діод в гніздо-тримач 2, дотримуючись відповідної полярності. Після цього підключити шнур живлення установки до мережі, натиснути на задній панелі на вимикач «МЕРЕЖА» та дати установці прогрітись протягом 5 хвилин.
2. Користуючись дисплеєм 1 та кнопкою 5, встановити номер діода, який буде досліджуватись першим. Рекомендується завжди першим обирати зовнішній досліджуваний діод VD1, так як він підключається автоматично при під'єднанні установки до мережі живлення. Якщо це не так, то за допомогою кнопки 5 встановити відповідний діод.
3. **Вимірювання прямої гілки ВАХ.** Користуючись дисплеєм та кнопками 4 і 6 отримати на екрані підтвердження режиму вимірювання: VD1, «ВАХ / ПРЯМА». В нижньому рядку дисплея при цьому будуть відображені початкові значення напруги « $U = 0,00$  В» та струму « $I = 0,00$  мА». Цей стан вимірювальної установки називається висхідним при вимірюванні будь-якої залежності. А початкові значення напруги та струму записати до таблиці 22.1. Далі, за допомогою кнопок 3 збільшити напругу  $U$  на  $p$ - $n$ -переході. Рекомендований інтервал приросту напруги між сусідніми вимірюваннями 0,1 В. Через кожні 0,1 В напругу і силу струму записати до таблиці 22.1. Кількість вимірювань – до 10. Кожного разу при закінченні вимірювань один раз натиснути кнопку

5 «ДІОД / ОБНУЛЕННЯ», повертаючи вимірювальну установку у вихідний стан.

**Примітка:** при досягненні струмом значення 10 мА (він є максимальним для установки) джерело живлення діода переходить в режим обмеження струму. Тоді вимірювання припиняються.

4. **Вимірювання оберненої гілки ВАХ.** За допомогою кнопки 4 отримати на екрані підтвердження зміни режиму вимірювання: VD1, «ВАХ / ОБЕРНЕНА». В нижньому рядку дисплея при цьому будуть відображені початкові значення напруги « $U = 0,00$  В» та струму « $I = 0,00$  мА». Ці значення занести до таблиці 22.1. Далі, за допомогою кнопок 3 збільшити величину напруги  $U$  на  $p$ - $n$ -переході. Для оберненої гілки ВАХ рекомендований інтервал приросту напруги між сусідніми вимірюваннями значно більший – орієнтовно 3 В. Через кожні 3 В напругу і силу струму записати до таблиці 22.1. Кількість вимірювань – не менше 10. Кожен раз із закінченням вимірювання один раз натиснути кнопку 5 «ДІОД / ОБНУЛЕННЯ», повертаючи вимірювальну установку у вихідний стан.
5. Щоб розпочати вимірювання характеристик вмонтованого в установку діода із заданим викладачем номером VD $x$ , послідовним натисканням кнопки 5 встановити на дисплеї цей номер діода. А далі повністю повторити всі процедури та вимірювання, які описані в пп 3–5.
6. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 22.2.
7. Після завершення вимірювань вимкнути живлення установки вимикачем «МЕРЕЖА» на задній панелі пристрою, відключити мережевий шнур установки від електромережі, від'єднати зовнішній досліджуваний діод від установки і здати його на зберігання.

---

### **Розрахунки**

*Всі розрахунки виконувати у програмі Excel.*

1. Побудувати графіки  $I = f(U)$  залежності величини струму  $I$  від прикладеної напруги  $U$  для двох діодів, аналогічні графіку на рисунку 22.4.
2. Допускається побудова двох окремих графіків для прямого та оберненого режиму в зв'язку зі значною різницею масштабів величин.
3. Провести порівняльний аналіз.

**Лабораторна робота 22. ВИМІРЮВАННЯ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА**

4. Обчислити динамічні опори  $R_{di}$  для двох порівнюваних діодів при роботі в режимах прямого та оберненого протікання струму. На відміну від статичного опору, який визначається законом Ома для однорідної ділянки кола, динамічний опір визначається на окремих ділянках ВАХ так:

$$R_{di} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_{i+1} - U_i}{I_{i+1} - I_i},$$

де  $i$  – порядковий номер експерименту.

5. Усі розрахунки виконати в програмі Excel у таблиці 22.3

**Лабораторний звіт**

*Задані та виміряні величини*

*Таблиця 22.1*

*Результати вимірювань діода VD1*

№ пор.	Режим прямого струму		Режим оберненого струму	
	$U, В$	$I \cdot 10^{-3}, А$	$U, В$	$I \cdot 10^{-6}, А$
1	0	0	0	0
2				
...				
10				

*Таблиця 22.2*

*Результати вимірювань діода VDx*

№ пор.	Режим прямого струму		Режим оберненого струму	
	$U, В$	$I \cdot 10^{-3}, А$	$U, В$	$I \cdot 10^{-6}, А$
1	0	0	0	0
2				
...				
10				

*Таблиця 22.3*

*Розрахунки шуканих величин*

№ пор.	Режим прямого струму			Режим оберненого струму		
	$\Delta U, В$	$\Delta I \cdot 10^{-3}, А$	$R_{д}, Ом$	$\Delta U, В$	$\Delta I \cdot 10^{-6}, А$	$R_{д}, Ом$

### Контрольні запитання

1. Що називають домішковою провідністю?
2. Що таке напівпровідник  $n$ -типу? Які носії струму є основними в напівпровіднику  $n$ -типу?
3. Накресліть зонну діаграму напівпровідника  $n$ -типу. Де розміщений рівень Фермі в домішковому напівпровіднику  $n$ -типу?
4. Що таке напівпровідник  $p$ -типу? Які носії струму є основними в напівпровіднику  $p$ -типу?
5. Накресліть зонну діаграму напівпровідника  $p$ -типу. Де розміщений рівень Фермі у домішковому напівпровіднику  $p$ -типу?
6. Що називають  $n$ - $p$  переходом і як технічно його отримують?
7. Як виникає контактне електричне поле та потенціальний бар'єр для носіїв струму в  $n$ - $p$  переході?
8. Чому заперний прошарок  $n$ - $p$  переходу має великий опір?
9. Накресліть ВАХ для  $n$ - $p$  переходу, поясніть вигляд її окремих ділянок.
10. Які переваги мають кристалічні діоди перед ламповими?

## **ВИМІРЮВАННЯ СВІТЛОВОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЕЛЕМЕНТА**

---

### **Мета роботи:**

- дослідити явище виникнення фото-ЕРС в фотоелементах із запірним прошарком;
  - визначити світлову характеристику вентильного фотоелемента та його інтегральну чутливість.
- 

### **Список обладнання:**

- фотоелемент;
  - мікроамперметр;
  - лінійка;
  - джерело світла;
  - джерело живлення.
- 

### **Долабораторна підготовка**

*Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал:* власна та домішкова провідність напівпровідників; напівпровідники  $p$ - та  $n$ - типу; контакт електронного та діркового напівпровідників ( $p$ - $n$  перехід); контакти  $M$ - та  $M$ - $p$ ; контактна різниця потенціалів; фотоелектричні явища у напівпровідниках та їхнє практичне застосування.

Перед виконанням роботи ознайомитись з вказівками до робіт № 21, 22.

### **Теоретичні основи**

Вентильні фотоелементи на основі кремнію, германію, сірчаного срібла тощо широко застосовують в науці і техніці для безпосереднього перетворення енергії світла в енергію електричного струму, а також для реєстрації і вимірювання світлових потоків. Кремнієві і деякі інші вентильні фотоелементи використовують для виготовлення «сонячних» батарей, наприклад, для живлення радіоапаратури штучних супутників

**Лабораторна робота 23. ВИМІРЮВАННЯ СІТЛОВОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЕЛЕМЕНТА**

Землі. Їхній ККД сягає 10 – 11 %. У цій роботі визначається світлова характеристика фотоелемента ФЕСС-У-10 (рис. 23.1).



Рис. 23.1

Вентильний фотоелемент є металевою пластинкою 1, поверхню якої дифузійним методом покрито кристалічним напівпровідником *n*-типу 2 (рис. 23.2) з напівпрозорим захисним шаром 3 з того ж металу. Між шаром металу 1 та напівпровідником *n*-типу 2 утворюється контакт *M-n* (метал-напівпровідник) із запірним прошарком. Такий самий запірний прошарок виникає і на контакті напівпровідника *n*-типу 2 з металевим покриттям 3. При цьому контактні різниці потенціалів однакові і включені у коло назустріч. Еквівалентну схему вентильного фотоелемента зображено на рис. 23.3.

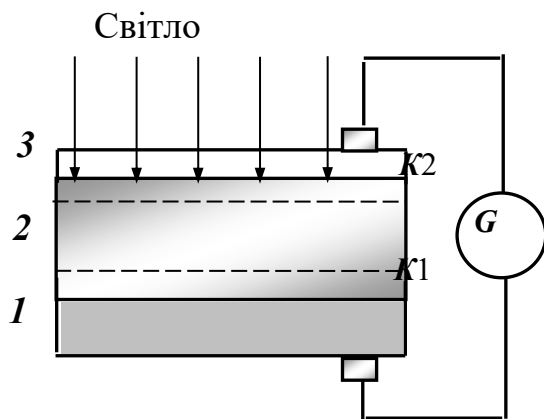


Рис. 23.2

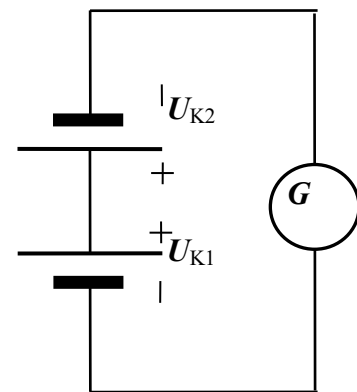


Рис. 23.3

Виникнення ЕРС на фотоелементі зумовлене явищем внутрішнього фотоефекту в запірному прошарку *K2* внаслідок попадання на нього світла через прозоре металеве покриття 3.

За відсутності опромінювання контактні різниці потенціалів  $U_{K1}$  та  $U_{K2}$  однакові за величиною. Оскільки у колі (див. рис. 23.3) вони включені назустріч, різниця потенціалів

$$\varepsilon = U_{K1} - U_{K2} \quad (23.1)$$

дорівнює нулю і струм через гальванометр не проходить.

За наявності світлового потоку в запірному прошарку *K2* з'являються додаткові носії заряду (фотоелектрони та фотодірки), які знижують контактну різницю потенціалів  $U_{K2}$  так, що фото-ЕРС відповідно до (23.1) стає відмінною від нуля. Це зниження відбувається

**Лабораторна робота 23. ВИМІРЮВАННЯ СІТЛОВОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕНТИЛЬНОГО ФОТОЕЛЕМЕНТА**

на контактi  $K_2$ , енергетична зонна структура якого зображена на рис. 23.3.

Запірний прошарок  $\Delta x$  (рис. 23.4) для контакту метал – напівпровідник  $n$ -типу утворюється тоді, коли робота виходу електрона з металу  $A_M$  є більшою за роботу виходу з напівпровідника  $n$ -типу  $A_n$ . При цьому виникає рівноважна зовнішня контактна різниця потенціалів  $U_{K2}$ :

$$U_{K2} = \frac{A_M - A_n}{e}.$$

Тобто метал має надлишковий негативний заряд, а напівпровідник  $n$ -типу – позитивний, виникає контактне електричне поле, вектор напруженості  $E_K$  якого показано на рис. 23.3.

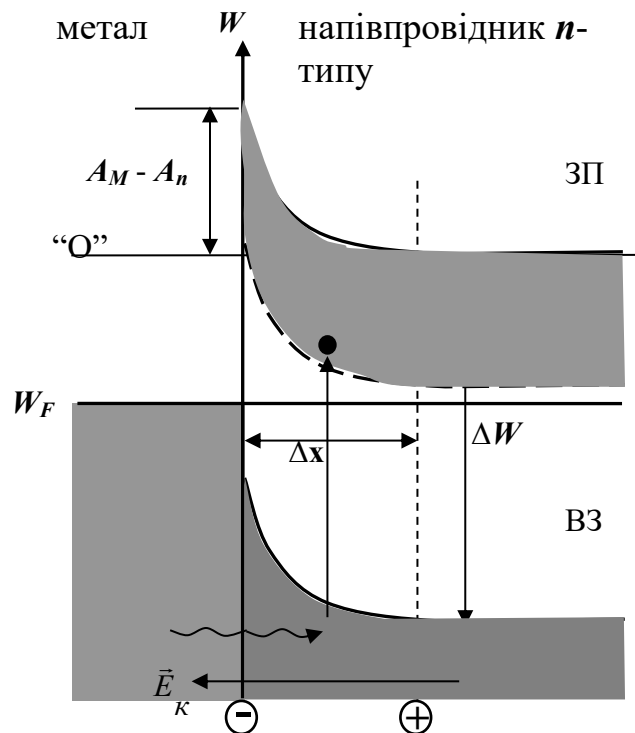


Рис. 23.4

Квант світла (зображений хвилястою лінією зі стрілкою на рисунку 23.4) попадає в запірний прошарок через напівпрозорий метал і викликає внутрішній фотоефект, тобто переводить електрон із валентної зони (ВЗ) у зону провідності (ЗП). Внаслідок цього виникають два додаткових носії заряду – дірка у ВЗ та електрон у ЗП.

Під дією електричного поля електрон переміщується в ділянку напівпровідника, а дірка, відповідно, у ділянку металу. Це викликає

компенсацію надлишкових зарядів, що виникли під час утворення контакту метал – напівпровідник, а з ним і контактної різниці потенціалів  $U_{к2}$ .

Неперервний потік таких квантів зумовлює постійне зниження цієї контактної різниці потенціалів так, що фото-ЕРС (23.1) буде відмінною від нуля, а отже, й відмінним від нуля буде струм у колі.

Світловою характеристикою фотоелемента називається залежність фотоструму  $I$  від променевого потоку, що падає на нього  $I = f(\Phi)$ .

Потік випромінювання  $\Phi$ , що падає на поверхню фотоелемента розраховується за відомим співвідношенням:

$$\Phi = j \frac{S \cos \alpha}{r^2}, \quad (23.2)$$

де  $j$  – сила світла лампи, залишається незмінною;  $S$  – площа поверхні фотоелемента;  $\alpha$  – кут, який утворює нормаль до поверхні фотоелемента з напрямком світлового потоку;  $r$  – відстань від фотоелемента до джерела світла.

Однією з характеристик фотоелемента є інтегральна чутливість  $q_i$ . Вона чисельно дорівнює приросту фотоструму в разі зростання на одиницю потоку випромінювання:

$$q_i = \frac{dI}{d\Phi}. \quad (23.3)$$

---

## Обладнання

Схему установки зображено на рисунку 23.4, яка складається з джерела світла 1 (лампи), фотоелемента 2, мікроамперметра 3, захисного корпусу 4, лінійки 5 та джерела живлення 6.

Зміна величини променевого потоку  $\Phi$ , що падає на поверхню фотоелемента 2, досягається зміною відстані  $r$  від фотоелемента до джерела світла 1.

Значення сили світла лампи  $j$  та площі поверхні фотоелемента  $S$  вказані на установці. Кут падіння променів  $\alpha$  можна змінювати за допомогою повороту фотоелемента. Відстань від лампочки до фотоелемента вимірюється лінійкою.

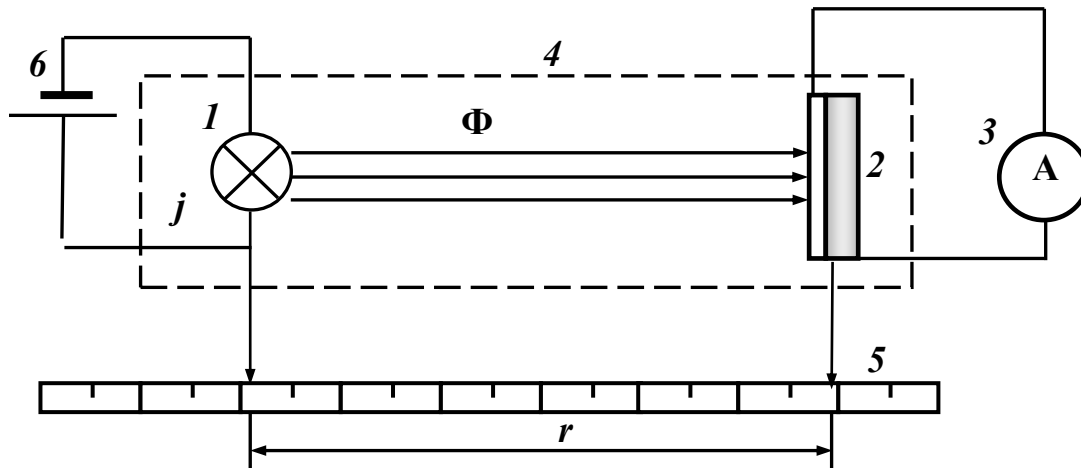


Рис. 23.4

### Експериментальна процедура

До початку виконання досліду підготувати таблицю 6.3.1 та 6.3.2 у програмі Excel.

1. Ознайомитись з лабораторною установкою.
2. Визначити начення сили світла джерела  $j$  та площі фотоелемента  $S$ .
3. Встановити фотоелемент так, щоб кут падіння променів дорівнював  $\alpha = 0^\circ$ .
4. Ввімкнути джерело світла. Змінюючи відстань  $r$  від джерела світла до фотоелемента, записати показники мікроамперметра  $I$ .
5. Повторити операції п.2 для кута  $\alpha = 60^\circ$ .
6. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 23.1.

### Розрахунки

Всі розрахунки та побудову графіків виконувати у програмі Excel.

1. Обчислити за формулою 23.3 світловий потік  $\Phi$  для кожного значення  $r$ .
2. Побудувати світлову характеристику фотоелемента  $I = f(\Phi)$ .
3. Визначити інтегральну чутливість  $q_i$  фотоелемента. Для цього провести пряму на лінійній ділянці графіка  $I = f(\Phi)$ , задати рівняння цієї прямої та визначити з нього приріст променевого потоку  $d\Phi$  та відповідний йому приріст фотоструму  $dI$ , тобто градієнт прямої (див. Приклад графіку 23.1).
4. Усі розрахунки виконати в програмі Excel у таблиці 23.2

Лабораторний звіт

Таблиця 23.1

Задані та виміряні величини

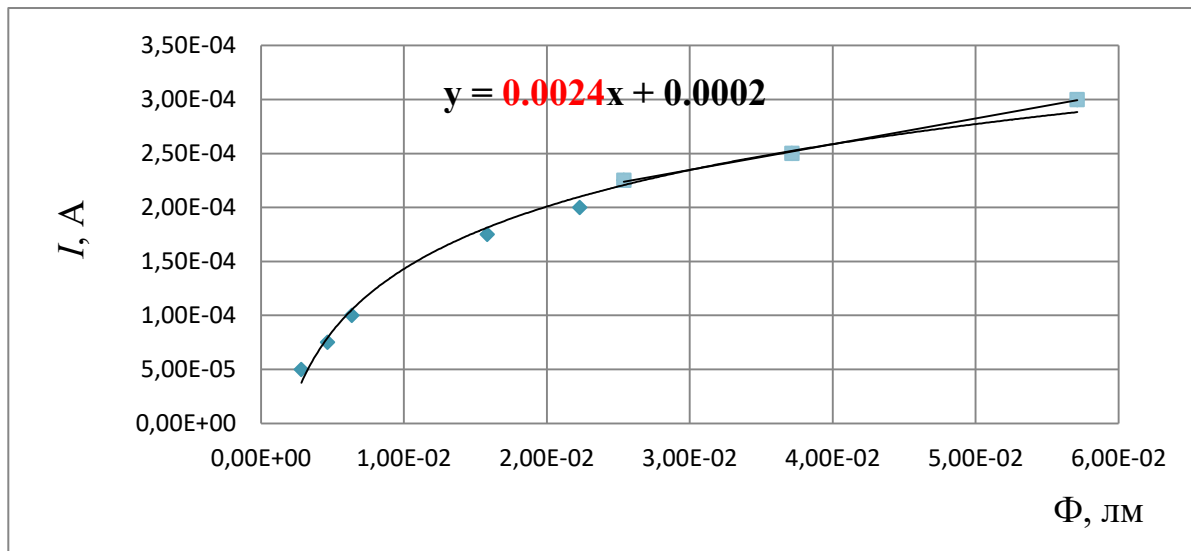
№ пор.	$r$ , м	$I$ , А	$j$ , кД	$S$ , м <sup>2</sup>

Таблиця 23.2

Розрахунки шуканих величин

№ пор.	$\Phi$ , лм	$q_i$ , А/лм

Приклад графіку 23.1



Контрольні запитання

1. Що називають власною та домішковою провідністю напівпровідників?
2. У чому полягає внутрішній фотоефект?
3. Що називають «червоною межею» внутрішнього фотоефекту?
4. Покажіть схематично будову вентиляного фотоелемента та поясніть принцип його роботи.
5. Як у вентиляному фотоелементі відбувається пряме перетворення світлової енергії в електричну?
6. Що таке спектральна чутливість фотоелемента?
7. Наведіть приклади використання фотоелементів.
8. Які причини зумовлюють низький ККД фотоелементів?

## **ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОСТІ РАДІОАКТИВНОГО ПРЕПАРАТУ**

---

### **Мета роботи:**

- вивчити закон радіоактивного розпаду та його характеристики;
  - ознайомитись з різними видами радіоактивного випромінювання та способами їхньої реєстрації;
  - визначити активність радіоактивного джерела за допомогою лічильника Гейгера-Мюллера
- 

### **Список обладнання:**

- установка ФПК-03;
  - джерело радіоактивних випромінювань.
- 

### **Долабораторна підготовка**

*Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал:* будова атомного ядра; масове число та заряд ядра; види радіоактивного випромінювання; закон радіоактивного розпаду; правила зміщень; методи спостереження та реєстрації радіоактивних випромінювань.

### **Теоретичні основи**

*Атомне ядро* – це центральна частина атома, в якій зосереджено позитивний заряд та майже вся його маса. Воно складається з нуклонів (позитивно заряджених протонів  ${}^1_1p$  і нейтральних нейтронів  ${}^1_0n$ ), які утримуються разом ядерними силами. Кількість протонів у ядрі називається зарядовим числом  $Z$ , яке дорівнює порядковому номеру елемента у таблиці Менделєєва. Кількість нейтронів у ядрі називається ізотонічним числом  $N$ . Сума чисел  $Z+N$  показує загальну кількість нуклонів ядра  $A$  і приблизно середню масу атома. Ядро позначають як  ${}^A_ZX$ . Ядра з однаковим числом  $Z$  та різними  $N$  називають *ізотопами*, з однаковим числом  $N$  та різними  $Z$  – *ізотонами*, з однаковим  $A$ , проте різними  $Z$  та  $N$  – *ізобарами*.

Відомо, що нестабільні ядра, а також всі ядра у збудженому стані перетворюються спонтанно, що призводить до зміни складу ядра і його внутрішньої енергії. Такі спонтанні процеси ядерних перетворень називаються *радіоактивністю*.

Закон, за яким відбувається радіоактивний розпад ядер, пов'язує початкову кількість ядер  $N_0$ , які розпадаються, із кількістю ядер  $N$ , що не розпалися за певний проміжок часу  $t$ :

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (24.1)$$

де  $\lambda$  – стала розпаду, яку можна виразити через період напіврозпаду  $T_{1/2}$ , тобто час, за який розпадеться половина початкових ядер:

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2}.$$

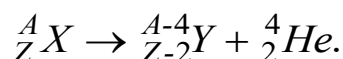
Проте такий закон справедливий лише для випадку, коли дочірні ядра є стабільними. У решті випадків буде спостерігатися подальший розпад утворених ядер, для яких стала розпаду є іншою. Таку послідовність розпаду описують системами диференціальних рівнянь:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1, \quad \frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1.$$

Якщо  $T_{1/2}$  материнського ядра  $\gg T_{1/2}$  дочірнього ізотопу, то  $\lambda_1 N_1 \approx \lambda_2 N_2$ .

До основних типів радіоактивних перетворень належать  $\alpha$ -,  $\beta^+$ -,  $\beta^-$ -розпади,  $\gamma$ -випромінювання,  $e^-$  ( $K^-$ ) поглинання, спонтанний поділ ядер, протонна радіоактивність тощо. Розглянемо деякі основні типи радіоактивних перетворень.

*Випромінювання  $\alpha$ -частинки.* Це перетворення ядер, яке супроводжується вильотом ядра атома  ${}^4_2\text{He}$  ( $\alpha$ -частинок). Схема розпаду, яка визначає правило зміщення у періодичній системі елементів, для альфа-розпаду виглядає так:



Для того щоб відбувся альфа-розпад потрібно, щоб енергія зв'язку дочірнього ядра та  $\alpha$ -частинки окремо була більшою за енергію зв'язку материнського ядра, а це означає, що в цьому процесі виділяється енергія.  $\alpha$ -частинка має заряд, тому для того щоб вона покинула ядро, їй треба подолати кулонівський бар'єр. Це відбувається як квантово-

механічний процес тунелювання  $\alpha$ -частинки через потенціальний бар'єр.

*Випромінювання  $\beta$ -частинки.* Ядро випромінює електрон/позитрон. Процес відбувається лише всередині ядра, коли один з нейтронів (протонів) розпадається, утворюючи протон та електрон (нейтрон та позитрон).



де  $\tilde{\nu}_e, \nu_e$  – електронне антинейтрино та нейтрино, які випромінюються під час процесу  $\beta$ -розпаду. Існування цих частинок було передбачене теоретично для обґрунтування спектра енергій  $\beta$ -частинок. Нейтрино/антинейтрино має нульові заряд та масу спокою і спіні  $\hbar/2$ .

Вільний нейтрон може розпадатися ( $T_{1/2} \approx 11-15$  хв) поза межами ядра, а в ядрі може залишатися стабільним. Протон, навпаки, вважається стабільною частинкою ( $T_{1/2} \approx 10^{29}$  років) як в ядрі, так і поза межами ядра.

*$\gamma$ -випромінювання* – це високочастотні електромагнітні хвилі з високою проникністю, які не відхиляються ані в електричному, ані в магнітному полях. Здебільшого  $\gamma$ -випромінювання супроводжує  $\alpha$ -,  $\beta$ -розпади; виникає в ядерних реакціях, в процесах гальмування заряджених частинок.  $\gamma$ -спектр має лінійчасту структуру. Цей вид радіоактивного випромінювання не супроводжується зміщенням ізотопів ядер в таблиці Менделєєва, оскільки  $A$  та  $Z$  ядра залишаються незмінними в цих процесах.

Важливою характеристикою радіоактивного джерела є його активність  $A$ , яка показує, скільки ядер  $dN$  відповідного ізотопу розпадається за одиницю часу:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N. \quad (24.2)$$

Одиниця вимірювання радіоактивності:

$$[1\text{Ки}] = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ розпадів/с.}$$

Будь-яке ядерне перетворення завжди супроводжується випромінюванням  $\gamma$ -квантів, тому активність препарату можна оцінити за кількістю  $\gamma$ -квантів, які випромінює джерело за одиницю часу і які реєструє лічильник.

## Лабораторна робота 24. ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОСТІ РАДІОАКТИВНОГО ПРЕПАРАТУ

Найпоширенішим способом реєстрації  $\gamma$ -випромінювань є лічильник Гейгера-Мюллера, який використовується в установці ФПК-03.

В даній лабораторній роботі визначення активності радіоактивного препарату ґрунтується на здатності лічильника Гейгера-Мюллера зареєструвати певну кількість  $\gamma$ -квантів  $n$ , які попадають на лічильник за час  $t$ . Тобто ми можемо визначитись, яка кількість  $\gamma$ -квантів реєструється лічильником з усіх тих, що падають на його поверхню за одиницю часу:  $I = n/t$ . Враховуючи ізотропію процесів вильоту випромінювань з точкового радіоактивного джерела та ефективність лічильника  $\eta$  (доля  $\gamma$ -квантів, які в середньому реєструє лічильник), можна визначити активність  $A$  радіоактивного препарату через  $I$ :

$$A = \frac{4\pi R^2}{S\eta} I, \quad (24.3)$$

де  $S$  – площа перерізу вхідного вікна лічильника,  $R$  – відстань від джерела випромінювань до поверхні лічильника,  $S/(4\pi R^2)$  – тілесний кут, в який попадає випромінювання, що проходить крізь лічильник. Співвідношення (24.3) представимо так:

$$I = A\eta \frac{S}{4\pi R^2}. \quad (24.4)$$

Дана вимірювальна установка дозволяє визначати величину  $I$  при різних відстанях  $R$  від джерела випромінювання до лічильника з ефективною поверхнею реєстрації  $S$ . Це дає змогу експериментально отримати графік залежності  $I$  від  $1/R^2$  (яка повинна бути прямою лінією) і отримати тангенс кута нахилу цієї прямої до осі  $1/R^2$ :

$$\operatorname{tg}\alpha = A\eta \frac{S}{4\pi}. \quad (24.5)$$

В формулі (24.5) величину ефективності лічильника  $\eta \sim 0,6$  будемо вважати наперед відомою. Тоді визначившись з нахилом прямої, вимірявши переріз вхідного вікна лічильника  $S$  та використавши значення  $\eta = 0,6$ , за формулою (24.5) визначають активність препарату  $A$ .

Додатково можна визначити і масу  $m$  радіоактивного препарату, якщо буде відомо, на основі якого ізотопу виготовлене джерело радіоактивних випромінювань. Цю інформацію перед виконанням роботи надає викладач. Враховуючи (24.2)  $A = \lambda N = \lambda(m/\mu)N_A$ , знаходимо масу радіоактивного препарату:

$$m = \frac{A \cdot \mu}{N_A \cdot \lambda}, \quad (24.6)$$

де  $\mu$  – молярна маса речовини,  $N_A$  – стала Авогадро,  $\lambda$  – стала розпаду.

**Зауваження.** Завжди слід мати на увазі, що визначена з дослідів швидкість відліку радіоактивності  $I$  є збільшеною на величину швидкості відліку  $I_{\Phi}$ , зумовлену наявністю природного фону. Тому значення  $I$  у формулі (7.1.4) треба розраховувати як різницю значень  $I_R$  та  $I_{\Phi}$ , тобто  $I = I_R - I_{\Phi}$ .

### Обладнання

Загальний вигляд експериментальної установки ФПК-03 показано на рисунку 24.1. Основними складовими елементами установки є:  $A$  – блок управління та реєстрації, з'єднаний кабелем живлення з високовольтним блоком  $B$  живлення лічильника Гейгера – Мюллера  $C$ ; пересувного тримача радіоактивних джерел випромінювання  $D$ , розміщеного на вимірювальній лаві  $E$ , яка обладнана лінійкою з сантиметровими поділками.

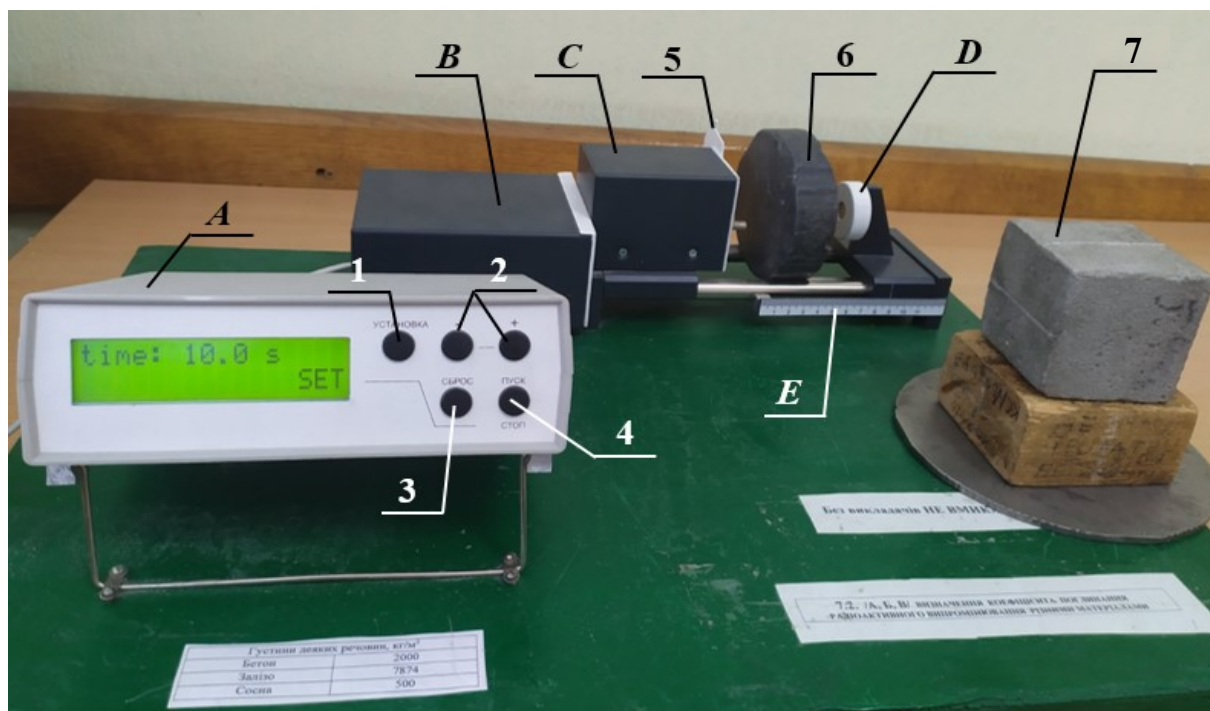


Рис. 24.1

Додаткові об'єкти, які використовуються при виконанні різних робіт, розміщують на вимірювальній лаві (позиція 6) в просторі між

## Лабораторна робота 24. ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОСТІ РАДІОАКТИВНОГО ПРЕПАРАТУ

джерелом радіоактивного випромінювання  $D$  та вхідним вікном лічильника Гейгера-Мюллера  $C$ .

На передній панелі блока управління та реєстрації  $A$  розташований екран індикації результатів та кнопки управління 1-4. Кнопка 1 («УСТАНОВКА») керує режимом визначення та установки часового інтервалу. Натискання її виводить на екран інформацію про виставлений час «time: 17.0 s» та вказівку на можливість її установки «set». Змінити установку часу можна за допомогою кнопок 2: «+» – збільшення інтервалу та «-» – зменшення інтервалу. Причому короткочасні натискання змінюють час в розряді одиниць секунд, а довготривалі натискання змінюють час в розряді десятків секунд.

Кнопка 3 («ОБНУЛЕННЯ») завжди призупиняє вимірювання та встановлює висхідний стан вимірювання: «time: 0.0 s», «n: 0». Кнопка 4 («ПУСК/ЗУПИНКА») використовується для зупинки вимірювання без встановлення висхідного стану та для початку вимірювання після зупинки.

На задній панелі блока  $A$  розташовані вимикач «МЕРЕЖА», клеми заземлення та шнур живлення для підключення до мережі 220 В, 50 Гц.

Найбільш динамічною частиною установки є вимірювальна лава. На ній цифрою 5 позначено захисну шторку вікна лічильника, цифрою 6 – позицію, де розміщуються змінні поглинаючі об'єкти, та літерою  $D$  – пересувне та змінне джерело радіоактивних випромінювань.

При закритій шторці 5 пристрій реєструє лише  $\gamma$ -випромінювання, при відкритій – реагує на будь-які радіоактивні випромінювання, які здійснюють іонізацію.

Об'єктами дослідження можуть бути будь-які матеріали 7. Проте завжди одним з таких матеріалів виступає товстий прошарок свинцю (він показаний на позиції 6), який закриває джерело випромінювання при вимірюванні природного фону.

На даній установці виконуються лабораторні роботи 24 та 25. При використанні установки в різних лабораторних роботах потрібно чітко розрізняти, що є об'єктом дослідження. Зокрема в лабораторній роботі 24 об'єктом дослідження виступає саме джерело радіоактивних випромінювань, в роботі 25 об'єктом дослідження є поглинаючі властивості різних матеріалів.

Але в обох випадках принцип роботи вимірювальної установки зводиться до підрахунку та реєстрації кількості радіоактивних частинок (переважно  $\gamma$ -квантів) за допомогою лічильника Гейгера-Мюллера за строго відміряні часові інтервали. А змінюватись можуть:

- відстані між джерелом випромінювання та лічильником;
- склад та товщина матеріалів-поглиначів;
- потужність джерел радіоактивного випромінювання;
- часові інтервали для реєстрації випромінювання.

---

### Експериментальна процедура

До початку виконання досліду підготувати таблицю 24.1 та 24.2 у програмі Excel.

1. Приєднати шнур живлення до мережі, вимикачем «МЕРЕЖА» увімкнути пристрій (індикатор при цьому має показувати значення «time 10.0 s» та режим встановлення часу set). Дати пристрою прогрітись протягом 5 хвилин.
2. Встановити за допомогою кнопок 1 та 2 заданий викладачем часовий інтервал  $t$  окремого вимірювання. Встановити утримувач з джерелом випромінювання на мінімальну відстань  $R_1$  від лічильника. Відсунути захисну шторку лічильника 5 та відкрити всю його робочу поверхню. Натиснути кнопку 3 («ОБНУЛЕННЯ») та впевнитись, що на екрані висвічується висхідний стан установки для проведення вимірювань.
3. Перед проведенням серії вимірювань здійснити вимірювання та запис початкових даних. Виміряти величину поверхні  $S$  відкритої частини вікна лічильника, визначити відстань  $R_1$  між джерелом та лічильником та інтервал часу на одне вимірювання.
4. Провести малу серію з трьох вимірювань для даного значення  $R_1$ . Для цього натиснути кнопку 4 («ПУСК»), після чого на індикаторі повинні з'явитися та змінюватись значення кількості зареєстрованих частинок та секунд. Вимірювання автоматично зупиняються по закінченні встановленого часу, а на індикаторі з'являються значення часу вимірювання  $t$  та кількості зареєстрованих частинок (імпульсів)  $n$ . Натиснути кнопку 3 («ОБНУЛЕННЯ»). Одне вимірювання закінчилось. Повторити таке вимірювання тричі.

## Лабораторна робота 24. ВИЗНАЧЕННЯ АКТИВНОСТІ РАДІОАКТИВНОГО ПРЕПАРАТУ

5. Переставити джерело радіоактивних випромінювань на більшу відстань від лічильника  $R_2$ . Рекомендовано збільшувати відстань на 3...5 см. Для даного нового положення джерела випромінювань повністю повторити вимірювання за п. 4. Після їх виконання, повторити п. 5, перемістивши джерело радіоактивного випромінювання ще на 3...5 см. Таких серій вимірювань з різними положеннями джерела повинно бути не менше 5.
6. Визначити природний фон. Для цього джерело випромінювань переставити в найвіддаленіше положення та поставити (обов'язково!) між джерелом та лічильником товсту пластину-поглинач із свинцю. Після цього повторити вимірювання, аналогічні п. 4, не менше трьох разів.
7. Вимкнути прилад кнопкою «МЕРЕЖА» на задній панелі блока А, а також від'єднати шнур живлення від електромережі.
8. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 24.1

---

### Розрахунки

*Всі розрахунки виконувати у програмі Excel.*

1. Розрахувати середні значення кількості зареєстрованих частинок для всіх малих серій  $\langle n \rangle$  та при вимірюванні природного фону  $\langle n_\phi \rangle$ .
2. Обчислити величини  $1/R^2$  та величини швидкостей відліку  $I_R = \langle n \rangle / t$ .
3. Визначити величину швидкості відліку  $I_\phi = \langle n_\phi \rangle / t$  та розрахувати значення  $I = I_R - I_\phi$ .
4. Результати розрахунків виконати у табл. 24.2.
5. Побудувати залежність швидкостей відліку лічильника  $I$  від  $1/R^2$ .
6. Обчислити активність препарату, для чого:
  - а) екстраполювати побудований графік прямою та обчислити з її нахилу значення тангенса кута за формулою  $\text{tg} \alpha = \Delta I / \Delta (1/R^2)$ ;
  - б) використовуючи формулу (24.5), обчислити активність А препарату. Значення ефективності лічильника прийняти рівним  $\eta = 0,6$ .
7. Обчислити масу радіоактивного препарату за формулою (24.6). Вважайте, що радіоактивним препаратом в джерелі радіоактивного випромінювання є ізотоп урану  $^{238}\text{U}_{92}$ .
8. Усі розрахунки виконати в програмі Excel у таблиці 24.2

**Лабораторний звіт**

Таблиця 24.1

Задані та виміряні величини

№ пор.	$S, \text{м}^2$	$t, \text{с}$	$R, \text{м}$	$n, \text{імп.}$	$\langle n \rangle, \text{імп.}$	$n_{\phi}, \text{імп.}$	$\langle n_{\phi} \rangle, \text{імп.}$
1							
2							

Таблиця 24.2

Розрахунки шуканих величин

№ пор.	$1/R^2, 1/\text{м}^2$	$\langle n \rangle, \text{імп.}$	$I_R, \text{імп/с}$	$\langle n_{\phi} \rangle, \text{імп.}$	$I_{\phi}, \text{імп/с}$	$I_R - I_{\phi}, \text{імп/с}$	$A, \text{розп/с}$	$m, \text{кг}$
1								
2								
3								
4								
5								

**Контрольні запитання**

1. Дайте визначення радіоактивності.
2. Назвіть основні види радіоактивних перетворень та охарактеризуйте їх.
3. На прикладі ядра  ${}^7_3\text{Li}$  охарактеризуйте склад ядра будь-якого елемента.
4. Що називається ізотопами? Назвіть ізотопи атома водню.
5. Напишіть реакцію  $\alpha$ -розпаду ізотопу  ${}^{238}_{92}\text{U}$ .
6. Які основні методи реєстрації іонізуючих випромінювань вам відомі?
7. Опишіть будову лічильника Гейгера-Мюллера та пояснить принцип його роботи.
8. Сформулюйте закон радіоактивного розпаду.
9. Що називають періодом напіврозпаду радіоактивного препарату? Як він пов'язаний зі сталою розпаду?
10. Що таке активність радіоактивного препарату?
11. Виведіть формулу для обчислення маси радіоактивного препарату та його активності.
12. Що таке поглинута та експозиційна дози опромінення? Назвіть їх одиниці вимірювання.

***ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОГЛИНАННЯ  
РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ  
РІЗНИМИ МАТЕРІАЛАМИ***

---

**Мета роботи:**

- вивчити основні види взаємодії радіоактивного випромінювання з речовиною;
  - дослідити закономірності поглинання  $\gamma$ -випромінювання різними матеріалами та визначити коефіцієнт поглинання цих матеріалів.
- 

**Список обладнання:**

- установка ФПК-03;
  - набір досліджуваних матеріалів (зразки заліза, дерева, цегли);
  - поглинач із свинцю.
- 

**Долабораторна підготовка**

*Для виконання роботи потрібно засвоїти такий теоретичний матеріал:* радіоактивне випромінювання та його види; закономірності  $\alpha$ -,  $\beta$ - та  $\gamma$ -розпаду та їхні властивості; поглинута, експозиційна та біологічна дози опромінення, їхні одиниці вимірювання; потужність дози опромінення.

**Теоретичні основи**

Проникну здатність радіоактивного випромінювання визначають процеси його взаємодії з частинками речовини при проходженні крізь речовину. Найбільшу проникну здатність має  $\gamma$ -випромінювання, яке супроводжує  $\alpha$ - і  $\beta$ -розпади у процесі перетворення ядра. Під час проходження пучка  $\gamma$ -квантів крізь речовину інтенсивність  $\gamma$ -випромінювання зменшується в основному внаслідок трьох процесів – *фотоефекту, комптонівського розсіяння та народження пар*, кожен з яких переважає за певних енергій  $\gamma$ -випромінювання. Розглянемо окремо ці процеси.

*Фотоефект* – це процес поглинання  $\gamma$ -квантів речовиною, в якому їхня енергія витрачається на народження вільних електронів, які або залишають поверхню матеріалу (зовнішній фотоефект), або залишаються вільними носіями заряду всередині (внутрішній фотоефект). Цей процес є переважним серед трьох зазначених видів взаємодії за низьких енергій  $\gamma$ -квантів. Наприклад, фотоелектричне поглинання є найбільш суттєвим в алюмінії для енергій  $E_\gamma < 50$  кеВ, у свинці за  $E_\gamma < 0,5$  МеВ.

У міру збільшення енергії  $\gamma$ -квантів переважає процес *комптонівського розсіяння* – розсіяння  $\gamma$ -квантів на вільних або слабо зв'язаних електронах (енергія зв'язку електронів у атомі є набагато меншою за енергію  $\gamma$ -квантів). Внаслідок комптон-ефекту енергія розсіяного фотона зменшується, а електрон, на якому відбулося розсіяння, набуває кінетичної енергії. Цей процес переважає за енергій  $\gamma$ -квантів в алюмінії  $60$  кеВ  $< E_\gamma < 15$  МеВ, у свинці  $0,7$  МеВ  $< E_\gamma < 5,0$  МеВ.

*Утворення пар* домінує над цими двома процесами за великих енергій  $\gamma$ -квантів. Процес полягає у тому, що в кулонівському полі ядра або зарядженої частинки (яка отримує частку енергії фотона, що вступає у взаємодію) виникає електрон-позитронна пара. Поріг цієї реакції у полі важкого ядра становить приблизно  $2m_e c^2 \approx 1,022$  МеВ, а в полі електрона – приблизно  $4m_e c^2$ .

Зміна інтенсивності  $\gamma$ -випромінювання під час проходження крізь речовину описується законом Бугера:

$$I_x = I_0 e^{-\mu x}, \quad (25.1)$$

де  $I_x$  – інтенсивність  $\gamma$ -випромінювання після проходження шару речовини товщиною  $x$ ;  $I_0$  – початкова інтенсивність  $\gamma$ -випромінювання;  $\mu$  – повний лінійний коефіцієнт поглинання, який характеризує зменшення інтенсивності випромінювання під час проходження крізь речовину. Одиниця вимірювання лінійного коефіцієнта поглинання  $[\mu] = 1 \text{ м}^{-1}$ .

Повний лінійний коефіцієнт (лінійний коефіцієнт) поглинання визначає долю моноенергетичних  $\gamma$ -квантів, які вибувають із паралельного пучка на одиниці шляху випромінювання у речовині. Він залежить від густини та від енергії  $\gamma$ -квантів і містить три складові

$\mu = \tau + \varepsilon + \chi$ , де  $\tau$  – лінійний коефіцієнт поглинання у випадку фотоефекту,  $\varepsilon$  – лінійний коефіцієнт поглинання для комптон-ефекту,  $\chi$  – лінійний коефіцієнт поглинання для процесу утворення пар.

Основними характеристиками впливу  $\gamma$ -випромінювання, а також інших видів іонізуючого випромінювання на речовину, є поглинута, експозиційна та біологічна дози випромінювання і потужність цих доз.

*Поглинута доза* показує, яка кількість енергії випромінювання поглинається одиницею маси опромінюваного тіла. Одиницею вимірювання поглинутої дози у системі СІ є грей (Гр). Один грей – це доза, за якої речовині масою 1 кг передається енергія іонізуючого випромінювання в 1 Дж (або 1 Гр = 100 рад).

Для повітря кількість випромінювання, яке викликає іонізацію, названо *експозиційною дозою*. Вона виражає сумарний заряд всіх іонів одного знаку в елементарному об'ємі повітря відносно до маси даного об'єму. Поширена позасистемна одиниця вимірювання експозиційної дози – рентген (Р), а в системі СІ – Кл/кг.  $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ .

Важливим є вимірювання дози, поглинутої біологічною тканиною. Для оцінювання міри біологічної небезпеки, яка залежить від типу іонізуючого випромінювання, введено поняття *еквівалентної дози*. Одиниця вимірювання еквівалентної дози випромінювання – зіверт. Часто використовують долю цієї дози – бер (1 бер = 0,01 Зв). Один бер – це доза опромінення, аналогічна за своєю біологічною дією до дози опромінення рентгенівськими променями в один рентген.

Для прогнозування радіоактивного впливу введено поняття *потужності дози опромінення*, яке використовується як для експозиційної, так і для поглинутої та еквівалентної дози опромінення. В кожному випадку відповідна потужність визначає дозу, яку отримує речовина за одиницю часу.

Скориставшись формулою (25.1), можна отримати вираз для визначення лінійного коефіцієнту поглинання  $\gamma$ -випромінювання:

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{I_0}{I_x}. \quad (25.2)$$

Із формули (25.2) видно, що лінійний коефіцієнт поглинання  $\gamma$ -випромінювання різними матеріалами визначається шляхом вимірювання інтенсивності випромінювання  $I_x$ , яке проходить крізь різні

товщини  $x$  шару речовини, розміщеної між джерелом  $\gamma$ -випромінювання та лічильником, а також початкової інтенсивності  $I_0$   $\gamma$ -випромінювання.

Для одержання точніших значень інтенсивності  $\gamma$ -випромінювання необхідно від одержаних даних  $I_x$  та  $I_0$  відняти  $I_\phi$  – інтенсивність випромінювання природного фону, тобто випромінювання, яке фіксує лічильник, якщо джерело радіоактивного випромінювання закрито свинцевим блоком (див. хід роботи). Отже, робоча формула набуває вигляду

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{I_0 - I_\phi}{I_x - I_\phi}. \quad (25.3)$$

Якщо відома густина  $\rho$  досліджуваного матеріалу, можна визначити масовий коефіцієнт поглинання, який вимірюється в  $[\mu_m] = 1 \text{ м}^2/\text{кг}$ :

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}. \quad (25.4)$$

---

### Обладнання

Загальний вигляд експериментальної установки ФПК-03 показано на рисунку 24.1. Основними складовими елементами установки є:  $A$  – блок управління та реєстрації, з'єднаний кабелем живлення з високовольтним блоком  $B$  живлення лічильника Гейгера – Мюллера  $C$ ; пересувного тримача радіоактивних джерел випромінювання  $D$ , розміщеного на вимірювальній лаві  $E$ , яка обладнана лінійкою з сантиметровими поділками.

Додаткові об'єкти, які використовуються при виконанні різних робіт, розміщують на вимірювальній лаві (позиція 6) в просторі між джерелом радіоактивного випромінювання  $D$  та вхідним вікном лічильника Гейгера-Мюллера  $C$ .

На передній панелі блока управління та реєстрації  $A$  розташований екран індикації результатів та кнопки управління 1-4. Кнопка 1 («УСТАНОВКА») керує режимом визначення та установки часового інтервалу. Натискання її виводить на екран інформацію про виставлений час «time: 17.0 s» та вказівку на можливість її установки «set». Змінити установку часу можна за допомогою кнопок 2: «+» – збільшення інтервалу та «-» – зменшення інтервалу. Причому короткочасні

**Лабораторна робота 25. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ПОГЛИНАННЯ РАДІОАКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ РІЗНИМИ МАТЕРІАЛАМИ**

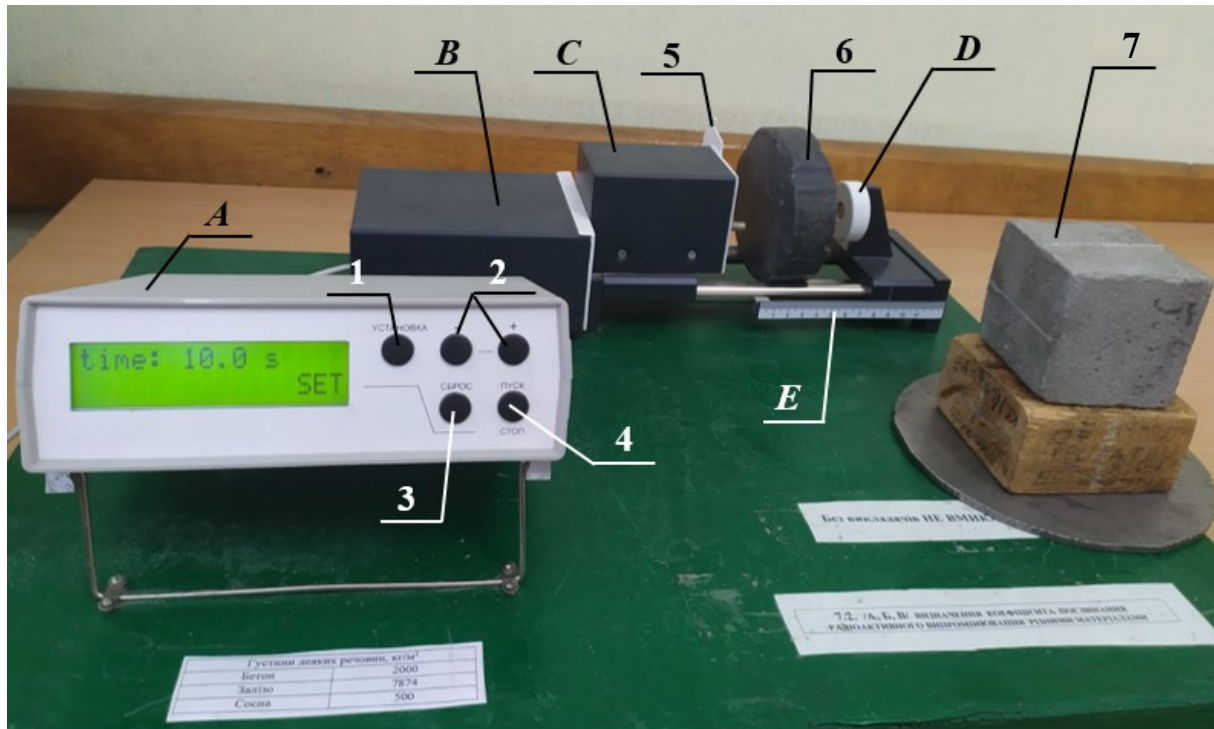


Рис. 25.2

натискання змінюють час в розряді одиниць секунд, а довготривалі натискання змінюють час в розряді десятків секунд.

Кнопка 3 («ОБНУЛЕННЯ») завжди призупиняє вимірювання та встановлює висхідний стан вимірювання: «time: 0.0 s», «n: 0». Кнопка 4 («ПУСК/ЗУПИНКА») використовується для зупинки вимірювання без встановлення висхідного стану та для початку вимірювання після зупинки.

На задній панелі блока А розташовані вимикач «МЕРЕЖА», клема заземлення та шнур живлення для підключення до мережі 220 В, 50 Гц.

Найбільш динамічною частиною установки є вимірювальна лава. На ній цифрою 5 позначено захисну шторку вікна лічильника, цифрою 6 – позицію, де розміщуються змінні поглинаючі об'єкти, та літерою D – пересувне та змінне джерело радіоактивних випромінювань.

При закритій шторці 5 пристрій реєструє лише  $\gamma$ -випромінювання, при відкритій – реагує на будь-які радіоактивні випромінювання, які здійснюють іонізацію.

Об'єктами дослідження можуть бути будь-які матеріали 7. Проте завжди одним з таких матеріалів виступає товстий прошарок свинцю (він показаний на позиції 6), який закриває джерело випромінювання при вимірюванні природного фону.

### **Експериментальна процедура**

*До початку виконання дослідів підготувати таблицю 25.1 та 25.2 у програмі Excel.*

1. Виміряти товщину всіх досліджених матеріалів та визначити їхню густину.
2. Приєднати шнур живлення до мережі та вимикачем «МЕРЕЖА» увімкнути пристрій (індикатор при цьому має показувати значення «time 10.0 s» та режим встановлення часу «set»).
3. Дати пристрою прогрітися протягом 5 хвилин. Натиснути кнопку 3 «ОБНУЛЕННЯ» (на індикаторі повинні з'явитися нулі).
4. Встановити обраний час вимірювань за допомогою кнопки 1 «УСТАНОВКА» та кнопок 2 «+» та «-».
5. Провести серію вимірювань інтенсивності джерела  $I_0$ . Для цього встановити утримувач джерела разом з джерелом випромінювання на максимальну відстань від лічильника. Між джерелом та лічильником (позиція б) не повинно бути жодних матеріалів чи перешкод. Ця серія в табл. 25.1 називається «без поглинача».
6. Закрити захисну шторку лічильника для усунення впливу  $\alpha$ - і  $\beta$ -випромінювання.
7. Натиснути кнопку 4 «ПУСК», після чого на індикаторі повинні з'явитися та змінюватись значення кількості зареєстрованих частинок та секунд. Вимірювання автоматично зупиняються по закінченні встановленого часу, а на індикаторі з'являються значення часу вимірювання  $t$  та кількості зареєстрованих частинок (імпульсів)  $N_1$ .
8. Натиснути кнопку 3 «ОБНУЛЕННЯ».
9. Дослід (пп. 7-9) повторіть тричі. Серію закінчено.
10. Для визначення природнього фону  $I_\phi$  встановити між джерелом та лічильником (позиція б) свинцеву пластину-поглинач та провсти серію вимірювань (серія «свинець») відповідно до пп.7-10.
11. Виберати зразок одного з досліджуваних матеріалів 7, наприклад, пластинку заліза. Досліджуваний матеріал розташувати між джерелом радіоактивного випромінювання та лічильником (позиція б) та виконати серію вимірювань (серія «залізо») відповідно до пп.7-10.
12. Повторити серії дослідів для інших матеріалів.

13. Вимкнути прилад кнопкою «МЕРЕЖА» на задній панелі.
14. Задані величини та результати вимірювань записати до таблиці 25.1.

### Розрахунки

*Всі розрахунки виконувати у програмі Excel.*

1. Розрахувати середні значення кількості зареєстрованих імпульсів  $\langle N \rangle$  для всіх серій.
2. Обчислити середні значення швидкостей відліку лічильника  $I_0$  (серія «без поглинача»),  $I_\phi$  (серія «свинець») та  $I_x$  (серії «залізо», «дерево», «цегла»).
3. Розрахувати поправки  $I_0 - I_\phi$  та  $I_x - I_\phi$  на природній фон.
4. Для кожного дослідженого матеріалу обчислити лінійний коефіцієнт поглинання  $\mu$  за формулою (25.3).
5. Розрахувати масові коефіцієнти поглинання  $\mu_m$  за формулою (25.4).
6. Розрахувати товщину  $x$  поглиначів, на якій інтенсивність зменшиться у деяку кількість разів (задається викладачем) за формулою (25.2).
7. Результати розрахунків виконати у табл. 25.2.

### Лабораторний звіт

*Таблиця 25.1*

*Задані та виміряні величини*

№ пор.	Поглинаюче середовище	$x$ , м	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$N_1$ , імп.	$N_2$ , імп.	$N_3$ , імп.	$t$ , с
1	без поглинача						
2	свинець						
3	залізо						
4	дерево						
5	цегла						

Таблиця 25.2

Розрахунки шуканих величин

№ пор.	Поглинаюче середовище	$\langle N \rangle$ , імп.	$\langle I \rangle$ , імп./с	$\langle I \rangle_x - I_\phi$ , імп./с	$I_0 - I_\phi$ , імп./с	$\mu$ , м <sup>-1</sup>	$\mu_m$ , м <sup>2</sup> /кг	x, м (товщина поглиначя, на якій інтенсивність зменшується у разів)
1	без поглиначя							
2	Свинець							
3	Залізо							
4	Дерево							
5	Цегла							

### Контрольні запитання

1. Розкажіть про склад ядра атома.
2. Що називається енергією зв'язку та дефектом маси ядра?
3. Що називається радіоактивністю?
4. Сформулюйте закон радіоактивного розпаду.
5. Назвіть основні види іонізуючих випромінювань та охарактеризуйте їхні властивості.
6. Запишіть правила зміщень для  $\alpha$ - і  $\beta$ -розпадів.
7. Які механізми взаємодії  $\gamma$ -випромінювання з речовиною вам відомі? За яких умов можливий кожен з цих механізмів взаємодії?
8. Що називається поглинутою, експозиційною, біологічною дозами випромінювання, потужністю дози опромінення?
9. Сформулюйте та поясніть закон Бугера.
10. Який фізичний зміст лінійного та масового коефіцієнтів поглинання?
11. Виведіть формулу, що дає змогу визначити зв'язок між лінійним коефіцієнтом поглинання і товщиною матеріалу.

## Література

### Підручники:

1. Чолпан П.П. Фізика: підручник. – Київ: Знання, 2015, – 663 с.

### Навчальні посібники:

1. Бурдейна Н.Б., Глива В.А., Петруньок Т.Б., Бірук Я.І. Азнаурян І.О. Протоколи лабораторних робіт з фізики №1. Фізичні основи механіки. Електрика та магнетизм / Навчально-методичний посібник – К.: КНУБА, 2023. – 84 с.
2. ФІЗИКА. Лабораторний практикум. Оновлений цикл: навч. посіб. / О.В. Панова, В.І. Клапченко та ін. – Київ: КНУБА, 2022. – 160 с.
3. Physics: Excel-Based Laboratory Manual. Panova O, Aznauryan I and others – Kyiv; KNUCA, 2020. – 108 p.
4. Фізика:практичний посібник до виконання лабораторних робіт із застосуванням пакета Excel/ уклад.: В.І. Клапченко та ін. – К.: КНУБА, 2018. – 100 с.
5. Фізика в будівництві: навчальний посібник/ В.І.Клапченко, І.О.Азнаурян, Н.Б.Бурдейна та ін.. – К.: КНУБА, 2012. – 252 с.
6. Фізика. Лабораторний практикум: Базовий цикл. Навчальний посібник. – 3-те вид., випр. і доп. /В.І. Клапченко, І.О. Азнаурян та ін. /За ред. В.І.Клапченка. – К.: КНУБА, 2012. – 228 с.
7. Фізика. Лабораторний практикум. Спецпрактикуми: навчальний посібник / В.І. Клапченко та ін.; за заг. ред. В.І. Клапченка. – К.: КНУБА, 2012. – 96 с.
8. Азнаурян І.О. Фізика та фізичні методи дослідження: Навчальний посібник. – К.: КНУБА, 2008. – 250 с.

## Основні фізичні сталі

Назва фізичної сталої	Позначення	Числове значення
Гравітаційна стала	$\gamma$	$6,673 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
Число Авогадро	$N_A$	$6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Універсальна газова стала	$R$	$8,315 \cdot \text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Молярний об'єм ідеального газу	$V_m$	$22,414 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$
Електрична стала	$\epsilon_0$	$8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$
Магнітна стала	$\mu_0$	$4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 12,566 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$
Стала Больцмана	$k$	$1,380 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Число Фарадея	$F$	$9,649 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$
Стала закону Стефана – Больцмана	$\sigma$	$5,669 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$
Стала закону зміщення Віна	$b$	$2,897 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$
Стала Планка	$h$	$6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Питомий заряд електрона	$e/m_e$	$1,759 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$
Заряд електрона	$e$	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Швидкість світла у вакуумі	$c$	$2,997 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Борівський радіус	$a_0$	$0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$
Маса спокою електрона	$m_e$	$9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,49 \cdot 10^{-4} \text{ а.о.м.}$
Маса спокою протона	$m_p$	$1,672 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00727 \text{ а.о.м.}$
Маса спокою нейтрона	$m_n$	$1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,00866 \text{ а.о.м.}$
Стала Рідберга (для атома водню)	$R$	$1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$
Комптонівська довжина хвилі електрона	$\lambda_c$	$2,426 \cdot 10^{-12} \text{ м}$
Магнетон Бора	$\mu_B$	$9,274 \cdot 10^{-24} \text{ А} \cdot \text{м}^2$
Енергія іонізації атома водню	$W_i$	$2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$

Навчальне видання

# ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРОГРАМИ EXCEL

**Азнаурян Ірина Олександрівна,  
Глива Валентин Анатолійович,  
Бірук Яна Ігорівна,  
Краснянський Григорій Юхимович,  
Бурдейна Наталія Борисівна**

Навчальний посібник

Редагування та коректура  
Комп'ютерний набір та правка *І.О. Азнаурян*  
Комп'ютерне верстання

Підписано до друку 15.11.2024. Формат 60 × 84<sub>1/16</sub>  
Ум. друк. арк. 10,93. Обл.-вид. акр. 11,75.  
Тираж 20 прим. Вид. № 27/І-24 Зам.№

Видавець і виготовлювач  
Київський національний університет будівництва і архітектури

Повітрофлотський проспект, 31, Київ, 03037

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів  
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002