

53(075)

Г 32

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький державний технічний університет

П.В.Гель, Т.І. Бабюк, О.В. Хрущак

# ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ

частина 1

(механіка, електрика, електромагнетизм)

Вінниця ВДТУ 2001

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький державний технічний університет

П.В.Гель, Т.І.Бабюк, О.В.Хрущак

# ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ

## Частина 1

(механіка, електрика, електромагнетизм)

Затверджено Ученою радою Вінницького державного технічного університету як навчальний посібник для студентів і магістрантів технічних спеціальностей. Протокол №6 від 24 лютого 1999р.

НТБ ВНТУ



403717

53(075) Г 32 2001

Гель П.В. Фізичний практикум

Вінниця ВДТУ 2001

УДК 531.7  
Г 32

Рецензенти:

*П.М. Зузяк*, доктор фізико-математичних наук  
*О.Г. Бунтар*, доктор фізико-математичних наук  
*Ю.А. Карпов*, доктор технічних наук

Рекомендовано до видання Ученою радою Вінницького державного технічного університету Міністерства освіти і науки України

403717

**Гель П.В., Бабюк Т.І., Хрущак О.В.**

**Г 32 Фізичний практикум, частина І**(механіка, електрика, електромагнетизм). Навчальний посібник. - Вінниця: ВДТУ, 2001.-121 с.

Навчальний посібник призначений для студентів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів заочної форми навчання і складений відповідно до діючої програми з курсу фізики технічних вузів.

УДК 531.7

© П. Гель, Т. Бабюк, О. Хрущак, 2001



## ЗМІСТ

Вимірювання фізичних величин та математична обробка отриманих результатів.....	5	
Робоча програма.....	12	
Загально-теоретичні відомості. Основні визначення і формули.....	16	
Фізичні основи механіки.....	16	
Електрика.....	32	
Електромагнетизм.....	44	
Лабораторна робота №1.1	Дослідження прямолінійного руху тіл в полі тяжіння за допомогою машини Атвуда.....	57
Лабораторна робота №1.3	Вивчення центрального удару кулі.....	61
Лабораторна робота №1.5	Вивчення абсолютно пружного центрального удару куль за допомогою хронометра.....	67
Лабораторна робота №1.6	Визначення моментів інерції твердих тіл за допомогою трифілярного підвісу.....	70
Лабораторна робота №1.7	Визначення моменту інерції маятника Обербека.....	76
Лабораторна робота №1.10	Визначення моментів інерції тіл на основі закону збереження енергії.....	81
Лабораторна робота №2.4	Дослідження температурної залежності властивостей сегнетоелектриків та визначення точки Кюрі.....	86

Лабораторна робота №2.5	Визначення електрорушійної сили джерела струму.....	90
Лабораторна робота №2.6	Вимірювання електричних опорів і вивчення залежності опору металу від температури.....	95
Лабораторна робота №2.7	Вивчення законів постійного струму.....	100
Лабораторна робота №3.1	Вивчення індукції магнітного поля за допомогою балістичного гальванометра.....	103
Лабораторна робота №3.3	Визначення питомого заряду електрона методом магнітного фокусування.....	107
Лабораторна робота №3.4	Вивчення напруженості магнітного поля на осі соленоїда.....	112
Лабораторна робота №3.6	Вивчення явища взаємної індукції...	116
Література.....		121

# **ВИМІРЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН ТА МАТЕМАТИЧНА ОБРОБКА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ**

---

---

## **1. ПОНЯТТЯ ПРО ВИМІРЮВАННЯ ТА ПОХИБКИ**

Під вимірюванням фізичної величини розуміють порівняння її з іншою величиною прийнятою за одиницю вимірювання. Результат вимірювання записують у вигляді абстрактного числа, яке називається числовим значенням фізичної величини і одиниці вимірювання цієї величини.

Розрізняють два типи вимірювань фізичних величин: прямі і непрямі (посередні).

При прямих вимірюваннях досліджувана фізична величина порівнюється з одиницею вимірювання безпосередньо або з допомогою вимірювального приладу, проградуйованого у певних одиницях. До таких вимірювань відноситься вимірювання :

- лінійних розмірів тіла мікрометром або лінійкою;
- маси на вагах за допомогою набору різноважків;
- проміжків часу за допомогою годинника або секундоміра;
- температури термометром;
- сили електричного струму амперметром і т.д.

Значення вимірювальної величини відраховується при цьому за шкалою приладу або підраховується число і значення мір, різноважків і т.д.

При прямих вимірюваннях досліджувана величина знаходиться на підставі результатів прямих вимірювань інших величин, які зв'язані з шуканою величиною певною функціональною залежністю.

Прикладами непрямих (посередніх) вимірювань можуть служити: вимірювання швидкості рівномірного (або рівноприскореного) рухів на підставі прямих вимірювань довжини пройденого шляху і проміжків часу; вимірювання густини тіла за результатами прямих вимірювань маси і об'єму тіла тощо.

При вимірюванні будь-якої фізичної величини доводиться виконувати три послідовні операції:

1. Перевірку та установку приладів.
2. Спостереження за їх показами та відлік.
3. Обчислення шуканої величини на основі результатів вимірювання і оцінки похибки.

В силу об'єктивних причин при вимірюванні всіх фізичних величин ми ніколи не отримуємо істинного або справжнього значення цієї величини.

Розвиток вимірювальної техніки привів до появи різноманітних приладів, які відрізняються між собою точністю. Точність приладу - це властивість вимірювального приладу, яка характеризує ступінь наближення показів даного вимірювального приладу до справжніх значень вимірюваної величини.

Точність приладу або задається класом точності і вказується на його шкалі, або записана в паспорті, що додається до приладу. Похибка приладу, якщо немає спеціальних вказівок у паспорті, як правило, дорівнює  $\pm 0,5$  ціни найменшої поділки його шкали.

У залежності від вибору методу вимірювань значення деяких фізичних величин можна знайти шляхом, як прямих, так і непрямих вимірювань. Наприклад, опір провідника можна виміряти за допомогою омметра, а також можна опосередковано за вимірною напругою і струмом з допомогою вольтметра і амперметра високої точності.

Вимірювальними приладами називаються технічні засоби, за допомогою яких можна безпосередньо отримати відрахунок значення вимірюваних величин. Мірами називаються засоби вимірювання фізичних величин заданих розмірів.

Прикладами мір є нормальні елементи, зразкові опори (магазини опорів) і котушки індуктивності, магазини ємностей, індуктивностей, різні міри довжин, місткості, набори різноважків, тощо.

Різниця між результатами вимірювання та істинним значенням вимірюваної величини називається похибкою вимірювань.

Розрізняють три типи похибок вимірювань: грубі похибки, або промахи; систематичні та випадкові похибки.

Грубі похибки або промахи, здебільшого пов'язані з несправністю вимірювальних приладів або з недосконалістю умов вимірювання. Результати таких вимірювань слід відкинути і провести нові вимірювання.



Систематичними похибками вимірювання називаються похибки, які залишаються сталими, або змінюються за певним законом при багатократному вимірюванні. Сюди входять похибки методичного характеру вимірювань та інструментальні похибки вимірювань. Систематичні похибки можна зменшити шляхом удосконалення методу вимірювань, а також внесенням уточнень в розрахункову формулу.

Інструментальні похибки зумовлені недосконалістю конструкції та неточністю вимірювальних приладів. Зменшення інструментальної похибки досягається застосуванням більш досконалих і точних приладів.

Випадковими похибками вимірювань називаються похибки, абсолютна величина і знак яких змінюється при багатократних вимірюваннях однієї і тієї ж величини. Випадкові похибки зумовлюються багатьма причинами, дії яких неможливо врахувати.

Повністю позбутися випадкових похибок неможливо, але їх можна зменшити шляхом багаторазового повторення вимірювань. Розрахунок випадкових похибок виконується методами теорії імовірностей і математичної статистики.

## **2. ОЦІНКА ПОХИБКИ ПРЯМИХ І НЕПРЯМИХ ВИМІРЮВАНЬ**

В основі теорії похибок лежать два висновки, підтверджені досвідом:

а) при великому числі вимірювань випадкові похибки однакової величини, але різних знаків зустрічаються однаково часто;

б) великі за абсолютною величиною похибки зустрічаються рідше, ніж малі, тобто імовірність появи похибки зменшується з ростом величини похибки.

Нехай, в результаті прямого вимірювання деякої фізичної величини  $X$  отримано ряд значень:  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . Найбільш близьким до істинного значення цієї величини є середнє-арифметичне результатів вимірювання:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i.$$

Модуль різниці середнього значення  $\bar{X}$  і результатів окремих вимірювань називається абсолютною похибкою відповідних вимірів:

$$\Delta X_1 = |\bar{X} - X_1|, \Delta X_2 = |\bar{X} - X_2|, \dots, \Delta X_n = |\bar{X} - X_n|.$$

Величина  $\Delta X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\bar{X} - X_i|$ , називається середньою похибкою

вимірювань.

Кінцевий результат вимірювання записують :

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

Цей запис означає, що істинне значення вимірної величини знаходиться в інтервалі :

$$[\bar{X} - \Delta X; \bar{X} + \Delta X].$$

Абсолютна похибка характеризує точність вимірювання фізичної величини: чим менше  $\Delta X$ , тим вона вища.

Але абсолютної похибки недостатньо для зіставлення якісного вимірювання декількох фізичних величин. Для цього використовують відносну похибку, яка являє собою відношення середньої абсолютної похибки  $\overline{\Delta X}$  до середнього значення вимірювальних величин  $\bar{X}$ :

$$\varepsilon = \frac{\overline{\Delta X}}{\bar{X}} \cdot 100\%.$$

Якщо в результаті вимірювань значення співпадають, або знайдена похибка менша похибки вимірювання, то береться похибка приладу, рівна половині ціни найменшої поділки приладу. Це ж правило використовують в тому випадку, коли за умовами експерименту можна виконати тільки одне вимірювання.

За абсолютну похибку вимірювання різниці температур і проміжків часу прийнято рахувати ціну поділки термометра і секундоміра. Якщо для обчислення результатів експерименту використовують постійні чи табличні величини, їх абсолютна похибка рівна половині одиниці останнього розряду.

Наприклад для числа  $\pi=3,14$  абсолютна похибка рівна  $\Delta\pi=0,005$ , для густини сталі  $\rho=7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$   $\Delta\rho = \pm 0,05 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Для знаходження абсолютних і відносних похибок можна використати наступну таблицю, в якій наведені похибки та їх функціональні залежності, які найбільш часто зустрічаються в лабораторній практиці.

Таблиця

№ пп	Методична операція	Абсолютна похибка	Відносна похибка
1	2	3	4
1.	$x+y$	$\Delta x + \Delta y$	$\frac{\Delta x + \Delta y}{x + y}$
2.	$x-y$	$\Delta x + \Delta y$	$\frac{\Delta x + \Delta y}{x - y}$
3.	$xy$	$x\Delta y + y\Delta x$	$\frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$
4.	$xyz$	$yz\Delta x + xy\Delta z + xz\Delta y$	$\frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} + \frac{\Delta z}{z}$
5.	$\frac{x}{y}$	$\frac{y\Delta x + x\Delta y}{y^2}$	$\frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}$
6.	$x^n$	$nx^{n-1}\Delta x$	$n \frac{\Delta x}{x}$
7.	$\sqrt[n]{x}$	$\frac{1}{n}x^{\frac{1}{n}-1}\Delta x$	$\frac{1}{n} \frac{\Delta x}{x}$
8.	$\frac{x}{1 \pm x}$	$\frac{\Delta x}{(1 \pm x)^2}$	$\frac{\Delta x}{x(1 \pm x)}$
9.	$e^x$	$e^x \Delta x$	$\Delta x$
10.	$\ln x$	$\frac{\Delta x}{x}$	$\frac{\Delta x}{x \ln x}$
11.	$\sin x$	$\cos x \cdot \Delta x$	$\operatorname{ctg} x \cdot \Delta x$
12.	$\cos x$	$\sin x \cdot \Delta x$	$\operatorname{tg} x \cdot \Delta x$
13.	$\operatorname{tg} x$	$\frac{\Delta x}{\cos^2 x}$	$\frac{2\Delta x}{\sin 2x}$
14.	$\operatorname{ctg} x$	$\frac{\Delta x}{\sin^2 x}$	$\frac{2\Delta x}{\sin 2x}$

# **РОБОЧА ПРОГРАМА**

## **РОЗДІЛ 1 - ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МЕХАНІКИ**

1. Предмет фізики. Простір і час. Методи фізичного дослідження: досвід, гіпотеза, експеримент, теорія.
2. Прямолінійний рух. Шлях, переміщення, швидкість, прискорення.
3. Криволінійний рух. Тангенціальне і нормальне прискорення.
4. Рух точки по колу. Кутова швидкість і кутове прискорення, їх зв'язок з лінійними швидкостями і прискореннями.
5. Інерційні системи відліку. Перший закон Ньютона.
6. Маса, сила, імпульс. Другий закон Ньютона. Сила як похідна імпульсу. Третій закон Ньютона.
7. Закон збереження імпульсу. Реактивний рух. Формула Мещерського. Рівняння Ціолковського.
8. Основне рівняння динаміки обертального руху. Момент сили.
9. Момент інерції. Теорема Штейнера. Кінетична енергія тіла, що обертається.
10. Момент імпульсу. Закон збереження моменту імпульсу. Гіроскопи.
11. Енергія, робота, потужність.
12. Кінетична і потенціальна енергії.
13. Закон збереження енергії в механіці. Консервативні і дисипативні сили.
14. Релятивістський вираз для кінетичної енергії. Взаємозв'язок маси та енергії.
15. Перетворення Галілея. Інваріанти перетворень. Принцип відносності Галілея.
16. Постулати спеціальної теорії відносності. Перетворення Лоренца.

17. Поняття одночасності. Відносність довжин і проміжків часу.
18. Релятивістський закон складання швидкостей.
19. Рівняння динаміки в неінерціальних системах відліку (НСВ).
20. Сила інерції та коріолісова сила інерції.

## **РОЗДІЛ 2 - ЕЛЕКТРИКА**

1. Електричний заряд. Закон збереження заряду. Закон Кулона.
2. Електричне поле та його напруженість. Напруженість поля точкового заряду. Принцип суперпозиції.
3. Потенціал поля точкового заряду і системи зарядів. Зв'язок потенціалу з напруженістю.
4. Поле всередині провідника та на його поверхні. Розподіл зарядів в провіднику.
5. Потік вектора напруженості поля. Теорема Остроградського-Гауса.
6. Застосування теореми Остроградського-Гауса для розрахунку полів рівномірно зарядженої площини та нитки.
7. Потенціал в найпростіших електричних полях: кульовий, плоский та циліндричний конденсатори.
8. Електроємність. Конденсатори. Ємність конденсаторів різної форми.
9. Енергія зарядженого конденсатора. Енергія електричного поля. Об'ємна густина енергії.
10. Діелектрики. Діелектрики в електричному полі.
11. Поляризація діелектриків. Вектор поляризації.
12. Сегнетоелектрики. П'єзоелектрики. Залежність діелектричної проникності від температури.

13. Постійний електричний струм, його характеристика і умови існування. Різниця потенціалів, ЕРС, напруга.
14. Електричний опір провідників. Питомий опір, явище надпровідності.
15. Закон Ома в інтегральній формі.
16. Виведення закону Ома в диференціальній формі із електронних уявлень.
17. Розгалужені електричні кола. Правила Кірхгофа та їх застосування.
18. Робота і потужність постійного струму.
19. Теплова дія електричного струму. Закон Джоуля-Ленца.
20. Електричний струм у вакуумі. Явище термоелектронної емісії та його закони.
21. Електронні лампи та їх застосування.
22. Електричний струм в газах. Процеси іонізації і рекомбінації.
23. Поняття про плазму. Властивості плазми та її застосування.

### **РОЗДІЛ 3 - ЕЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ**

1. Магнітне поле. Закон Ампера. Магнітна індукція. Магнітний потік.
2. Закон Біо-Савара-Лапласа для елемента струму і його застосування до розрахунку магнітного поля. Принцип суперпозиції.
3. Магнітне поле рухомого заряду.
4. Магнітне поле прямолінійного провідника з струмом.
5. Магнітне поле колового струму.
6. Дія магнітного поля на рухомий заряд. Сила Лоренца. МГД-генератор.
7. Рух заряджених частинок в магнітному полі. Ефект Холла.
8. Досліди Фарадея. Закон електромагнітної індукції. Правило Ленца.

9. Явище самоіндукції. ЕРС самоіндукції. Індуктивність соленоїда.
10. Струми при замиканні та розмиканні.
11. Енергія магнітного поля струму. Густина енергії магнітного поля.
12. Циркуляція вектора індукції магнітного поля. Вихровий характер магнітного поля.
13. Робота по переміщенню провідника з струмом в магнітному полі.
14. Магнетики і їх намагнічування. Вектор намагніченості.
15. Магнітне поле в магнетиках. Вектор магнітної індукції. Магнітна сприйнятливість і проникність магнетиків.
16. Феромагнетики та їх властивості. Магнітний гістерезис. Точка Кюрі.
17. Основи теорії Максвелла для електромагнітного поля. Струм зміщення. Закон повного струму.
18. Рівняння Максвелла в інтегральній формі.



# ЗАГАЛЬНО - ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.

## ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ І ФОРМУЛИ

### 1. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МЕХАНІКИ

**Фізика** - це наука, яка вивчає основні і найбільш загальні властивості матерії та форми її руху.

Рух являє собою неосяжну властивість матерії, спосіб існування матерії.

Рух - це різна зміна в матеріальному світі, різний процес, який відбувається у природі. У світі не може бути матерії без руху, як і руху без матерії.

#### 1.1. ПРЯМОЛІНІЙНИЙ РУХ

Рух матеріальної точки вважається визначеним, якщо відомий закон її руху, або закон, за яким змінюються положення точки в просторі зі зміною часу. Закон руху точки можна виразити у вигляді одного векторного рівняння.

$$\vec{r} = \vec{r}(t). \quad (1.1)$$

Або трьох рівнянь:

$$x=x(t); y=y(t); z=z(t). \quad (1.2)$$

Нехай за проміжок часу  $t_2-t_1=\Delta t$  точка переміститься з положення 1, що визначається радіусом-вектором  $\vec{r}_1$  в положення 2, що визначається радіусом-вектором  $\vec{r}_2$ . Вектор  $\Delta\vec{r}=\vec{r}_2-\vec{r}_1$  називається переміщенням точки.

Довжина  $\Delta S$  ділянки кривої, по якій рухається точка, називається шляхом точки.

Відношення переміщення  $\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$  до проміжку часу  $\Delta t = t_2 - t_1$ , за який це переміщення було здійснено, називається середньою швидкістю переміщення  $\vec{V}_{\text{cp}}$  :

$$\vec{V}_{\text{cp}} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{\vec{r}_2 - \vec{r}_1}{t_2 - t_1}. \quad (1.3)$$

Середня швидкість переміщення також є вектором. Для нескінченно малого переміщення  $|\mathrm{d}\vec{r}| = \mathrm{d}s$ , тому числове значення миттєвої швидкості дорівнює першій похідній від довжини шляху за часом:

$$V = \frac{\mathrm{d}S}{\mathrm{d}t}. \quad (1.4)$$

Відношення зміни швидкості  $\Delta \vec{V}$  до проміжку часу  $\Delta t$ , за який ця зміна відбувається, називається середнім прискоренням:

$$\vec{a}_{\text{cp}} = \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t}. \quad (1.5)$$

Вектор миттєвого прискорення:

$$\vec{a} = \frac{\mathrm{d}\vec{V}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}^2 \vec{r}}{\mathrm{d}t^2}.$$

Модуль миттєвого прискорення:

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

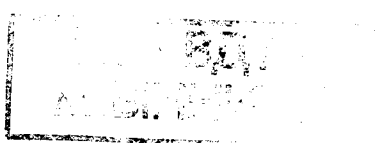
Рівняння рівнозмінного руху :

$$S = S_0 X = V_0 t \pm \frac{at^2}{2}. \quad (1.6)$$

Швидкість рівнозмінного руху :

$$V = V_0 \pm at. \quad (1.7)$$

403717



Середня швидкість рівнозмінного руху :

$$V_{\text{cp}} = \frac{V_0 + V}{2}. \quad (1.8)$$

Якщо прискорення  $a > 0$ , то рух рівноприскорений, якщо  $a < 0$ , то рух рівносповільнений.

Вільне падіння тіл і рух тіла кинутого вертикально вгору описується рівняннями рівнозмінного руху (1.6) - (1.8).

Рівняння рівномірного руху :

$$x = x_0 + Vt; \quad (1.9)$$

$$x_0 = 0; x = Vt. \quad (1.10)$$

При рівномірному русі

$$(\text{швидкість}) V = \text{const}; \quad (1.11)$$

$$(\text{прискорення}) a = 0. \quad (1.12)$$

## 1.2. КРИВОЛІНІЙНИЙ РУХ

Криволінійним називається рух, траєкторія якого являє собою криву лінію (рис. 1).

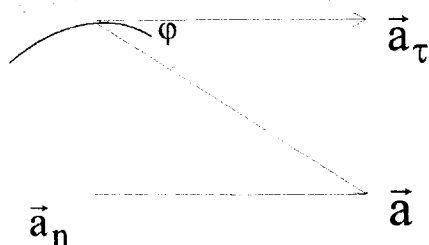


Рис.1

Складова  $\vec{a}$  називається тангенціальним (дотичним) прискоренням  $\vec{a}_\tau$ , збігається за напрямом з дотичною до траєкторії в цій точці і виражається формулою:

$$a_\tau = \frac{|dV|}{dt} = \frac{d^2S}{dt^2}. \quad (1.13)$$

Тангенціальне прискорення характеризує зміну модуля швидкості за одиницю часу.

Складова  $\vec{a}_n$  називається нормальним прискоренням  $\vec{a}_n$ . Вектор  $\vec{a}_n$  напрямлений вздовж радіуса до центру кривизни траєкторії. Тому його часто називають доцентровим прискоренням. Нормальне прискорення характеризує зміну вектора швидкості тільки за напрямком за одиницю часу. Воно виражається формулою:

$$|\vec{a}_n| = \frac{V^2}{R}. \quad (1.14)$$

Повне прискорення  $\vec{a}$  матеріальної точки дорівнює векторній сумі її нормального і тангенціального прискорення (рис. 1):

$$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau,$$

причому

$$|\vec{a}| = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2} = \sqrt{\left(\frac{V^2}{R}\right)^2 + \left(\frac{dV}{dt}\right)^2}. \quad (1.15)$$

Напрямок повного прискорення визначається кутом  $\varphi$  між векторами  $\vec{a}$  і  $\vec{a}_\tau$ . З рис.1 видно, що

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{a_n}{a_\tau}. \quad (1.16)$$

### 1.3. ОБЕРТАЛЬНИЙ РУХ

Обертальним рухом називається рух, при якому всі точки тіла рухаються по колах, центри яких лежать на одній осі, яку називають віссю обертання.

Кутовою швидкістю називається вектор  $\vec{\omega}$  чисельно рівний першій похідній від кута повороту за часом і напрямлений вздовж осі обертання за правилом буравчика:

$$\vec{\omega} = \frac{d\varphi}{dt} \quad (1.17)$$

Кутова швидкість  $\vec{\omega}$  пов'язана з лінійною швидкістю  $\vec{V}$  співвідношенням :

$$\vec{V} = [\vec{\omega} \cdot \vec{r}], \text{ або } V = \omega r. \quad (1.18)$$

Кутовим прискоренням називається вектор  $\vec{\varepsilon}$ , рівний першій похідній від вектора кутової швидкості за часом :

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} \quad (1.19)$$

Вектор  $\vec{\varepsilon}$  направлений вздовж осі обертання в той же бік, що і вектор кутової швидкості  $\vec{\omega}$  при прискореному русі, і в протилежний бік при сповільненому русі.

Кутове прискорення  $\vec{\varepsilon}$  зв'язане з тангенціальним прискоренням відношенням :

$$\vec{a}_\tau = [\vec{\varepsilon} \cdot \vec{r}], \text{ або } a_\tau = \varepsilon \cdot r. \quad (1.20)$$

Нижче приведені формули кінематики поступального і обертального рухів, а також формули переходу між ними.

Таблиця

Поступальний рух	Обертальний рух	Формули переходу
1	2	3
шлях - s	кут - $\varphi$	$s = r \varphi$
швидкість - V	кутова швидкість - $\omega$	$V = \omega r$
прискорення - a	кутове прискорення - $\varepsilon$	$a_\tau = \varepsilon r$ $a_n = \omega^2 r$
$s = Vt$	$\varphi = \omega t$	
$V = V_0 \pm at$	$\omega = \omega_0 \pm \varepsilon t$	

1	2	3
$s = V_0 t \pm \frac{a \cdot t^2}{2}$	$\varphi = \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon \cdot t^2}{2}$	
$V^2 - V_0^2 = 2as$	$\omega^2 - \omega_0^2 = 2\varphi\varepsilon$	
$V = \frac{ds}{dt}$	$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$	
$a_\tau = \frac{dV}{dt}$	$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$	

## 2. ДИНАМІКА МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ

### 2.1. ПЕРШИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА (закон інерції)

Тіло зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху доти, поки на нього не діє сила або дія сил компенсується  $\left( \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0 \right)$ .

Системи відліку, відносно яких виконується I закон Ньютона, називаються інерціальними системами відліку.

### 2.2. СИЛА

Для опису механічної дії тіл одне на друге вводять поняття сили. Силою називається векторна величина, що є мірою механічної дії на тіло з боку інших тіл. Сила характеризується чисельним значенням, напрямком і точкою прикладання і підкоряється законам дії з векторами.

Якщо до матеріальної точки прикладено декілька сил  $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$  то їх дію можна замінити дією однієї сили  $\vec{F}$ , яка називається рівнодійною і являє собою векторну суму даних сил

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i. \quad (2.1)$$

### 2.3. ДРУГИЙ ЗАКОН НЬЮТОНА. ІМПУЛЬС

Другий закон Ньютона встановлює зв'язок між взаємодією тіл і зміною їх поступального руху. Тому він є основним законом динаміки поступального руху. Формулюється він так: прискорення руху матеріальної точки прямо пропорціональне діючій силі і обернено пропорціональне масі  $m$  тіла:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad \text{або} \quad \Rightarrow \vec{F} = m\vec{a}. \quad (2.2)$$

Другий закон механіки Ньютон сформулював так: зміна імпульсу пропорціональна прикладеній силі і відбувається в тому напрямі, в якому діє сила:

$$\frac{d(m\vec{V})}{dt} = \vec{F}. \quad (2.4)$$

Тут  $m\vec{V} = \vec{p}$  - імпульс, отже, сила дорівнює швидкості зміни імпульсу.

Вираз (2.4) можна записати в такому вигляді:

$$d(m\vec{V}) = \vec{F}dt, \quad (2.5)$$

де зміна імпульсу дорівнює імпульсу сили і відбувається в тому напрямі, в якому діє сила.

Для задач, де маса тіла незмінна, другий закон механіки можна записати так:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}, \quad (2.6)$$

або

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F}. \quad (2.7)$$

Імпульс виражається формулою :

$$\vec{P} = m\vec{V}. \quad (2.8)$$

Імпульсом системи тіл, називається геометрична сума імпульсів усіх тіл, які входять в систему :

$$\vec{P} = m_1 \vec{V}_1 + m_2 \vec{V}_2 + \dots + m_n \vec{V}_n = \sum_{i=1}^n m_i \vec{V}_i. \quad (2.9)$$

## 2.4. ТРЕТІЙ ЗАКОН НЬЮТОНА. ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ ІМПУЛЬСУ

Характер взаємодії між матеріальними точками (тілами) визначається третім законом Ньютона: різні дії матеріальних точок (тіл) одне на одне завжди рівні за модулем, протилежні за напрямком, діють вздовж прямої, яка з'єднує ці точки :

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2. \quad (2.10)$$

З другого і третього законів Ньютона випливає закон збереження імпульсу замкнутої системи, який є одним з основних законів природи і має велике значення в механіці.

Система тіл (матеріальних точок) називається ізольованою або замкнутою, якщо для кожного тіла, що входить до цієї системи, всі сили, які діють на нього з боку зовнішніх відносно системи тіл, взаємно зрівноважуються.



Векторна сума імпульсів тіл, що утворюють замкнену систему, стала. Інакше кажучи, вектор імпульсу замкненої системи тіл з бігом часу не змінюється (закон збереження імпульсу):

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{V}_i = \text{const.} \quad (2.11)$$

Сили, які розглядають в механіці :

а) сили пружності

$$F = -kx, \quad (2.12)$$

де  $k$  - коефіцієнт пружності,  
 $x$  - абсолютна деформація;

б) сила тяжіння

$$P = mg; \quad (2.13)$$

в) сила гравітаційної взаємодії

$$F = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (2.14)$$

де  $\gamma$  - гравітаційна стала,  
 $m_1, m_2$  - маси взаємодійних тіл,  
 $r$  - відстань між тілами;

г) сила тертя

$$F = fN, \quad (2.15)$$

де  $f$  - коефіцієнт тертя,  
 $N$  - сила нормального тиску.

### 3. РОБОТА ТА ЕНЕРГІЯ

Єдина міра різних форм руху називається ЕНЕРГІЄЮ. Енергія системи тіл кількісно характеризує цю систему з погляду можливих у ній кількісних і якісних перетворень руху.

Рух є невід'ємною властивістю матерії. Тому всяке тіло має енергію або, як часто говорять, - запас енергії, що є мірою його руху.

Всяке досить мале (елементарне) переміщення матеріальної точки або тіла, яке рухається поступально, можна вважати прямолінійним. Тому елементарна робота  $\delta A$ , що виконується силою  $F$  при малому переміщенні  $dS$  точки її прикладання, дорівнює:

$$\delta A = F_{\tau} ds = F \cos \alpha ds. \quad (3.1)$$

Якщо  $\vec{r}$  - радіус-вектор, проведений у точку прикладання сили, то  $dS = |d\vec{r}|$ ,  $F \cos \alpha dS = (\vec{F}, d\vec{r})$  - скалярний добуток векторів сили  $\vec{F}$  і елементарного переміщення  $d\vec{r}$  точки її прикладання. Отже формулу (3.1) можна записати у вигляді:

$$\delta A = (\vec{F}, d\vec{r}). \quad (3.1')$$

Робота, що виконується силою  $F$  на скінченному шляху, визначається :

$$A = \int_0^S F \cos \alpha ds = \int_0^{S'} F_{\tau} ds. \quad (3.2)$$

Потужністю  $N$  сили  $\vec{F}$  називається фізична величина, яка чисельно дорівнює роботі, що виконується цією силою, за одиницю часу :

$$N = \frac{\delta A}{dt}. \quad (3.3)$$

Підставляючи в цю формулу вираз (3.1) для елементарної роботи, знайдемо:

$$N = F \cos \alpha \frac{ds}{dt} = F \cos \alpha V = F_{\tau} V = (\vec{F}, \vec{V}), \quad (3.4)$$

де  $\vec{V}$  - швидкість руху тіла.

Кінематичну енергію визначають за формулою:

$$W_k = \frac{mV^2}{2}, \quad (3.5)$$

де  $m$  - маса тіла,

$V$  - швидкість руху.

Кінетична енергія механічної системи дорівнює сумі кінетичних енергій всіх частин цієї системи. Наприклад, для системи із матеріальних точок.

$$W_k = \sum_{i=1}^n \frac{m_i V_i^2}{2}, \quad (3.6)$$

де  $m_i, V_i$  - відповідно маса і швидкість  $i$ -тої точки системи.

Потенціальною називають ту частину механічної енергії, що залежить від взаємного розміщення частинок системи і їх положення в зовнішньому полі.

Потенціальну енергію визначаємо за тією роботою, яка виконується над системою, щоб перевести її з деякого нульового положення в даний стан.

Потенціальну енергію тіла на висоті визначають:

$$\Pi = mgh, \text{ якщо } g = \text{const}. \quad (3.7)$$

Формула потенціальної енергії сили тяжіння :

$$\Pi = -\gamma \frac{mM}{r}. \quad (3.8)$$

Формула потенціальної енергії пружної деформації :

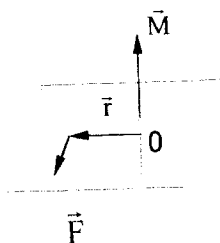
$$\Pi = \frac{kx^2}{2}. \quad (3.9)$$

Закон збереження енергії в механічних явищах: при всяких змінах в ізольованій консервативній системі її повна енергія залишається незмінною.

## 4. ДИНАМІКА ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ

### 4.1. МОМЕНТ СИЛИ

Момент сили - це вектор, перпендикулярний до площини ( $\vec{F}\vec{r}$ ), (рис.2) і напрямлений в той бік, з якого обертання під дією сили спостерігається проти годинникової стрілки.



$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}],$$

або

$$M = rF \sin(\vec{r} \wedge \vec{F}). \quad (4.1)$$

Якщо  $\vec{r}$  і  $\vec{F}$  взаємно перпендикулярні, то  $r$  називається плечем і тоді (4.1) переписується:

$$M = r \times F. \quad (4.2)$$

### 4.2. МОМЕНТ ІМПУЛЬСУ ТІЛА

Векторний добуток радіуса-вектора  $\vec{r}$  матеріальної точки на її імпульс  $m_i \vec{V}_i$  називається моментом імпульсу  $\vec{L}$  цієї матеріальної точки відносно точки або осі обертання.

$$\vec{L}_i = [\vec{r}_i m_i \vec{V}_i]. \quad (4.3)$$

Вектор  $\vec{L}$  напрямлений перпендикулярно до площини, проведеної через вектори  $\vec{r}$  та  $m\vec{V}$  і утворює з ними праву трійку векторів. Момент імпульсу твердого тіла визначається:

$$\vec{L} = I\vec{\omega}. \quad (4.4)$$

### 4.3. МОМЕНТ ІНЕРЦІЇ ТВЕРДОГО ТІЛА. ОСНОВНЕ РІВНЯННЯ ДИНАМІКИ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ

Момент сили виражається:

$$\vec{M} = I\vec{\epsilon}, \quad (4.5)$$

де  $I$  – момент інерції твердого тіла,

$$\vec{\epsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} - \text{кутове прискорення.}$$

Тоді

$$\vec{M} = I \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \frac{d(I\vec{\omega})}{dt} = \frac{d\vec{L}}{dt}. \quad (4.6)$$

Рівняння (4.5) і (4.6) виражають основне рівняння динаміки для обертального руху.

### 4.4. МОМЕНТ ІНЕРЦІЇ. ТЕОРЕМА ШТЕЙНЕРА

Моментом інерції механічної системи, відносно нерухомої осі, називається фізична величина  $I$ , що дорівнює сумі добутку мас всіх матеріальних точок системи на квадрати їх відстаней до осі обертання:

$$I = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2. \quad (4.7)$$

Моменти інерції деяких тіл правильної геометричної форми відносно осі  $Z$ , яка проходить через центр мас:

а). Момент інерції стержня довжиною  $l$  відносно осі, яка перпендикулярна стержню і проходить через центр стержня:

$$I = \frac{1}{12} m l^2. \quad (4.8)$$

Якщо вісь проходить через кінець стержня, перпендикулярно до цього стержня, то

$$I = \frac{1}{3} m \ell^2. \quad (4.9)$$

б). Обруч (тонкостінний циліндр), який обертається відносно осі, перпендикулярній площині обруча (яка співпадає з віссю циліндра)

$$I = mR^2. \quad (4.10)$$

де  $R$  - радіус обруча (циліндра).

в). Диск - радіусом  $R$  відносно осі, перпендикулярній площині диска.

$$I = \frac{1}{2} mR^2. \quad (4.11)$$

г). Куля масою  $m$  і радіусом  $R$ . Вісь обертання проходить через центр кулі.

$$I = \frac{2}{5} mR^2.$$

д). Теорема Штейнера.

$$I = I_0 + md^2, \quad (4.12)$$

де  $I_0$  - момент інерції цього тіла відносно осі, яка проходить через центр маси тіла паралельно даній осі,

$d$  - відстань між осями,

$m$  - маса.

#### 4.5. ЗАКОН ЗБЕРЕЖЕННЯ МОМЕНТУ ІМПУЛЬСУ

Момент імпульсу замкнутої системи тіл не змінюється з бігом часу ні за величиною ні за напрямом.

$$\vec{L} = \sum_{i=1}^n I_i \ddot{\phi}_i = \text{const}. \quad (4.13)$$

#### 4.5. КІНЕТИЧНА ЕНЕРГІЯ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ

$$W_k = \frac{I\omega^2}{2} \quad (4.14)$$

Кінетична енергія тіл, які здійснюють одночасно поступальний і обертальний рух, рівна арифметичній сумі енергій обох рухів:

$$W_k = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2}. \quad (4.15)$$

Робота, яка виконується при обертанні тіла і зміна його кінетичної енергії зв'язані співвідношенням:

$$A = \frac{I\omega_2^2}{2} - \frac{I\omega_1^2}{2}. \quad (4.16)$$

Таблиця

Поступальний рух	Обертальний рух
1	2
<u>Основний закон динаміки</u>	
Сила $\vec{F}$	Момент сили $\vec{M}$
Маса $m$	Момент інерції $I$
Імпульс $\vec{P} = m\vec{V}$	Момент імпульсу $\vec{L} = I\vec{\omega}$
<u>I закон Ньютона</u>	
$V = \text{const}$ при $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$	$\omega = \text{const}$ при $\sum_{i=1}^n \vec{M}_i = 0$
<u>II закон Ньютона</u>	
$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m\vec{a}$	$\sum_{i=1}^n \vec{M}_i = I\vec{\epsilon}$

1	2
<u>Закон збереження</u>	
імпульсу	моменту імпульсу
$\sum_{i=1}^n m_i v_i = \text{const}$ , якщо $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$	$\sum_{i=1}^n I_i \omega_i = \text{const}$ , якщо $\sum_{i=1}^n \vec{M}_i = 0$
<u>III закон Ньютона</u>	
$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$	$\vec{M}_{12} = -\vec{M}_{21}$
<u>Робота</u>	
$A = F \cdot S$ , $N = F \cdot V$ , $A = \int F ds$	$A = M \cdot \phi$ , $N = M \cdot \omega$ , $A = \int M d\phi$
<u>Кінетична енергія</u>	
$\frac{mv^2}{2}$	$\frac{I\omega^2}{2}$



# ЕЛЕКТРИКА

---

---

## 1. ЕЛЕКТРОСТАТИКА. ОСНОВНІ ЗАКОНИ І ОЗНАЧЕННЯ

### 1.1. ВЗАЄМОДІЯ ЗАРЯДІВ. ЗАКОН КУЛОНА

Однйменні точкові заряди відштовхуються, а різнойменні притягуються з силою:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}, \quad (1.1)$$

де  $q_1, q_2$  - взаємодійні заряди;

$r$  - відстань між ними;

$\epsilon_0$  - електрична стала;

$\epsilon$  - відносна діелектрична проникність середовища, в якому знаходяться заряди (для вакууму  $\epsilon=1$ ).

### 1.2. НАПРУЖЕНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

Напруженість  $\vec{E}$  електричного поля - це величина рівна відношенню сили  $\vec{F}$ , яка діє на позитивний пробний заряд  $q_0$ , який міститься в даній точці поля до цього заряду

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}, \text{ або } E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} - \text{для точкового розряду} \quad (1.2)$$

Якщо електричне поле створене двома або більше точковими зарядами, то для знаходження напруженості поля і інших його характеристик слід використовувати принцип суперпозиції електричних полів, відповідно якому напруженість  $\vec{E}$  результувального поля рівна векторній (геометричній) сумі напруженостей:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^n \vec{E}_i. \quad (1.3)$$

Для графічного зображення поля вводиться поняття силової лінії, гобто лінії, в кожній точці якої дотична співпадає з напрямком вектора напруженості поля. Умовно прийнято силові лінії проводити з такою густиною, щоб число силових ліній, які пронизують одиницю площини, рівнялось напруженості поля. При такій умові число силових ліній, що пронизують елементарну площадку  $dS$ , обчислиться за формулою:

$$d\Phi_E = E \cos\alpha \, dS = E_n \, dS, \quad (1.4)$$

де  $\alpha$  - кут, утворений силовою лінією з нормаллю до площадки;

$E_n$  - складова напруженості  $E$  за напрямком нормалі.

Формулу

$$\Phi_E = \int_S E_n \, dS \quad (1.5)$$

одержуємо проінтегрувавши вираз (1.4).

Вираз (1.5) називається потоком вектора напруженості  $\vec{E}$  через поверхню  $S$ . У випадку замкнутої поверхні:

$$\Phi_E = \oint_S E_n \, dS. \quad (1.6)$$

### 1.3. ТЕОРЕМА ОСТРОГРАДСЬКОГО-ГАУССА ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В ВАКУУМІ

Потік вектора напруженості електричного поля  $\Phi_E$  через замкнуту поверхню дорівнює алгебраїчній сумі зарядів, які містяться всередині цієї поверхні, поділений на електричну сталу  $\epsilon_0$ :

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i.$$

## 1.4. НАПРУЖЕНІСТЬ ПОЛЯ

Напруженість поля, що створюється нескінченною рівномірно зарядженою площиною:

$$E = \frac{\delta}{2\epsilon\epsilon_0}, \quad (1.7)$$

де  $\delta=q/S$  - поверхнева густина заряду площини.

## 1.5. НАПРУЖЕНІСТЬ ПОЛЯ

Напруженість поля створеного двома паралельними нескінченними рівномірно і різнойменно зарядженими площинами:

$$E = \frac{\delta}{\epsilon\epsilon_0}. \quad (1.8)$$

## 1.6. ПОТЕНЦІАЛ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ

Потенціалом поля  $\varphi$  в даній точці електростатичного поля називається фізична величина, чисельно рівна потенціальній енергії  $W_n$  одиничного позитивного заряду, помішеного в цю точку поля.

$$\varphi = \frac{W_n}{q_0}. \quad (1.9)$$

Потенціал даної точки електростатичного поля чисельно рівний роботі  $A$ , яку виконує електричне поле при переміщенні одиничного позитивного заряду з даної точки у нескінченність.

$$\varphi = \frac{A}{q_0}. \quad (1.10)$$

Потенціал - скалярна величина, що є енергетичною характеристикою електричного поля.

При переміщенні заряду з точки поля потенціалом  $\varphi_1$  в точку з потенціалом  $\varphi_2$  електростатичне поле виконує роботу  $A$ , яка на основі

закону збереження енергії, рівна зміні потенціальної енергії цього заряду:

$$A = W_1 - W_2 = q_0(\varphi_1 - \varphi_2), \quad (1.11)$$

де  $W_1, W_2$  - потенціальна енергія заряду,

$\varphi_1, \varphi_2$  - різниця потенціалів в початковій і кінцевій точках шляху.

Формула (1.11) справедлива для однорідного поля. Якщо поле неоднорідне, то

$$A = \int_1^2 q d\varphi.$$

Потенціал точкового заряду визначається за формулою

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r},$$

де  $q$  - точковий заряд.

## 1.7. НАПРУЖЕНІСТЬ ЯК ГРАДІЄНТ ПОТЕНЦІАЛУ

Напруженість - силова характеристика електричного поля. Потенціал - його енергетична характеристика. Між ними існує певний зв'язок - напруженість електричного поля  $\vec{E}$  в будь-якій точці рівна градієнту потенціалу  $\frac{d\varphi}{dn}$  в цій точці взятому з протилежним знаком:

$$E = -\frac{d\varphi}{dn} \quad \text{або} \quad E = -\text{grad}\varphi, \quad (1.12)$$

де  $dn$  - нескінченно мале переміщення в напрямку силової лінії.

## 1.8. ДІЕЛЕКТРИКИ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

У металах є вільні електрони, які можуть переміщуватись в усьому об'ємі. Цим метали за електричними властивостями відрізняються від діелектриків, в яких при відсутності електричного поля і не дуже високій температурі немає вільних електричних зарядів.

Диполь - система двох рівних за величиною і протилежних за знаком зарядів. Плечем диполя називається вектор  $\vec{\ell}$ , напрямлений по осі диполя від від'ємного заряду до позитивного і чисельно рівний відстані  $\ell$  між ними.

Електричним моментом диполя  $\vec{p}$  називається добуток заряду диполя на його плече:

$$\vec{p} = q\vec{\ell}. \quad (1.13)$$

Полярним називається діелектрик, молекули якого жорсткі диполі із сталим електричним моментом ( $\vec{p} \neq 0$ ). У відсутності зовнішнього поля дипольні моменти орієнтовані хаотично.

Орієнтаційною поляризацією називається орієнтування дипольних моментів молекул зовнішнім електричним полем вздовж напрямку поля.

Неполярним називається діелектрик, у якого дипольні моменти молекул рівні нулю ( $\vec{p} = 0$ ) при відсутності зовнішнього електричного поля.

Електронною поляризацією називається явище виникнення пружних диполів молекул під дією зовнішнього електричного поля.

Вектором поляризації (поляризованістю) називається векторна сума  $\sum_{i=1}^n \vec{p}_i$  дипольних моментів молекул одиниці об'єму поляризованого діелектрика:

$$\vec{p} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \vec{p}_i, \quad (1.14)$$

де  $n$  - кількість диполів в об'ємі  $V$ ;

$\vec{p}_i$  - електричний момент  $i$ -го диполя.

Поляризованість діелектрика  $\vec{p}$  зв'язана з напруженістю електричного поля  $\vec{E}$  в тій самій точці співвідношенням:

$$\vec{p} = \chi \cdot \epsilon_0 \vec{E}, \quad (1.15)$$

де  $\chi$  - діелектрична сприйнятливість діелектрика.

Між діелектричною сприйнятливістю  $\chi_i$  відносною діелектричною проникністю  $\epsilon$  існує взаємозв'язок:

$$\epsilon = \chi + 1. \quad (1.16)$$

З підвищенням температури діелектрична сприйнятливість речовини зменшується.

## 1.9. СЕГНЕТОЕЛЕКТРИКИ

Сегнетоелектриками називається група кристалічних діелектриків, в яких при відсутності зовнішнього поля (електричного) виникає спонтанна орієнтація дипольних моментів частинок, які входять до складу кристалічної решітки. Одне з характерних явищ сегнетоелектриків - дуже велике значення їх діелектричної проникності ( $\epsilon$  може досягати кількох тисяч) і залежності  $\epsilon$  від напруженості електричного поля.

## 1.10. ЕЛЕКТРИЧНЕ ЗМІЩЕННЯ

Напруженість електричного поля залежить від властивостей середовища, що призводить до затруднення розрахунку полів на границі двох або кількох середовищ. Зручною для характеристики електричного поля є величина, яка не залежить від діелектричних властивостей середовища і тому не змінюється при переході від одного середовища до другого. Такою величиною є вектор електричного зміщення або електричної індукції.

$$\vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E} \quad (1.17)$$

## 1.11. ТЕОРЕМА ОСТРОГРАДСЬКОГО-ГАУССА ДЛЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В ДІЕЛЕКТРИКУ

Потік вектора електричної індукції через замкнену поверхню рівний алгебраїчній сумі зарядів, які містяться в середині цієї поверхні.

$$\Phi_D = \sum_{i=1}^n q_i. \quad (1.18)$$

## 1.12. ПРОВІДНИКИ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ

При внесенні незарядженого провідника в зовнішнє електростатичне поле проходить перерозподіл вільних зарядів провідника. Перерозподіл проходить до тих пір, поки результувальне поле всередині провідника не стане рівним нулю ( $E=0$ ).

На поверхні провідника тангенціальна складова напруженості поля рівна нулю ( $E_t=0$ ), а повна напруженість дорівнює нормальній складовій напруженості ( $\vec{E} = \vec{E}_n$ ).

Якщо зарядити провідник, то під дією сил відштовхування заряди будуть віддалятися один від одного на чим більшу відстань і перерозподілятися по поверхні провідника.

Напруженість поля біля поверхні зарядженого провідника пропорційна поверхневій густині зарядів, які знаходяться на провіднику:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}. \quad (1.19)$$

Густина зарядів на гострих виступах поверхні провідників особливо велика, тому і напруженість поля на вістрях може виявитися настільки великою, що настане іонізація навколишнього газу і заряд почне стікати з вістря - виникне витік заряду.

### 1.13. ЕЛЕКТРОЄМНІСТЬ

Електроємністю називається здатність провідника накопичувати електричні заряди.

Електроємність відокремленого провідника чисельно дорівнює заряду, який змінює потенціал провідника, на одиницю:

$$C = \frac{q}{\phi} \quad (1.20)$$

Конденсатором називається система двох близько розташованих провідників, розділених діелектриком. Ємність конденсатора чисельно дорівнює заряду, який потрібно перенести з одного провідника на другий для зміни різниці потенціалів на одиницю.

$$C = \frac{q}{\phi_1 - \phi_2} \quad \text{або} \quad C = \frac{q}{U}, \quad (1.21)$$

де  $U = \phi_1 - \phi_2$  — напруга між обкладками конденсатора.

а) ємність плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \quad (1.22)$$

де  $S$  - площа пластини,

$d$  - відстань між пластинами,

$\epsilon$  - діелектрична проникність діелектрика між пластинами.

б) ємність сферичного конденсатора:

$$C = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 Rr}{R - r}, \quad (1.23)$$

де  $R$  і  $r$  - радіуси зовнішньої та внутрішньої обкладинок.

в) ємність циліндричного конденсатора і коаксіального кабелю:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 \ell}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1.24)$$

$$C = \frac{\epsilon \ell}{2 \ln \frac{r_2}{r_1}}, \quad (1.24)$$



де  $r_1, r_2$  - радіуси зовнішнього і внутрішнього циліндрів.  
 $l$  - довжина циліндра.

## 1.14. ЕНЕРГІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ЗАРЯДЖЕНОГО КОНДЕНСАТОРА

$$W = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C}. \quad (1.25)$$

Енергія зарядженого конденсатора зосереджена в середині конденсатора і є енергією електростатичного поля. Енергію можна виразити через величини, що характеризують електричне поле.

$$W = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} V, \quad (1.26)$$

де  $E$  - напруженість електричного поля конденсатора;  
 $V$  - об'єм конденсатора.

Енергія поля, в одиниці об'єму  $\omega$  називається об'ємною густиною енергії

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} \quad (1.27)$$

## 2. ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

### 2.1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ

а) Електричним струмом називається упорядкований рух електричних зарядів.

б) За напрям електричного струму приймають напрямок руху додатних зарядів. В дійсності в металевих провідниках електричний струм створюється рухом електронів.

в) Силою струму називається скалярна фізична величина, яка дорівнює кількості електрики, перенесеної через поперечний переріз провідника за одиницю часу:

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (2.1)$$

Струм називають постійним, якщо сила струму і його напрямок не змінюється з часом.

г) Вектор густини струму чисельно дорівнює силі струму через одиницю поперечного перерізу провідника:

$$\vec{J} = \frac{d\vec{I}}{dS} = ne\vec{v}, \quad (2.2)$$

де  $S$  - площа поверхні (перерізу)

$n$  - число зарядів в одиниці об'єму

$e$  - заряд електрона

$\vec{v}$  - швидкість електронів, вздовж лінії струму.

## 2.1. ЗАКОН ОМА В ІНТЕГРАЛЬНІЙ ФОРМІ

$$I = \frac{\Phi_1 - \Phi_2 \pm \varepsilon}{R + r}, \quad (2.3)$$

де  $r$  - внутрішній опір джерела струму.

Для однорідної ділянки кола, в яку не входить джерело струму закон Ома приймає вигляд:

$$I = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{R} = \frac{U}{R}. \quad (2.4)$$

Для замкнутого кола  $\Phi_1 = \Phi_2$ , тоді закон Ома буде таким:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad \text{або} \quad \varepsilon = IR + Ir. \quad (2.5)$$

## 2.2. НАПРУГА

а) Напряга між двома точками електричного поля дорівнює різниці потенціалів у цих точках і вимірюється роботою, яку виконують сили електричного поля, переміщуючи одиничний заряд з однієї точки поля в іншу.

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q_0} = \varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 E \cos(\vec{E} \wedge d\vec{c}) de \quad (2.6)$$

Одиниця напруги в системі СІ - вольт.

З (2.3) дістанемо:

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0 U_{12} \quad (2.7)$$

Закон Ома можна представити в диференціальній формі:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \frac{U}{\ell} \quad \text{або} \quad \vec{J} = \delta \vec{E} \quad (2.8)$$

де  $\delta = \frac{1}{\rho}$  - питома провідність;

$\rho$  - питомий опір провідника;

$J$  - густина струму.

### 2.3. РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ СТРУМУ. ЗАКОН ДЖОУЛЯ-ЛЕНЦА

Якщо провідники електричного кола нерухомі, а електричний струм постійний, то робота сторонніх сил повністю витрачається на нагрівання провідників. Кількість теплоти, виділена в колі за час проходження струму по всьому об'єму провідника дорівнює:

$$A = Q = IUt = I^2 Rt = \frac{U^2}{R} t, \quad (2.9)$$

де  $I$  - сила струму в провіднику;

$R$  - опір провідника;

$t$  - час проходження струму.

Вираз (2.9) являє собою закон Джоуля-Ленца: кількість теплоти виділена струмом в провіднику, пропорційна силі струму за час його проходження і спаду напруги.

## 2.4. ПРАВИЛА КІРХГІОФА

Загальний закон Ома (2.3) дозволяє розрахувати практично будь-яке складне коло, але ця задача вирішується простіше за допомогою двох правил Кірхгофа.

а) I правило Кірхгофа: алгебраїчна сума струмів, які сходяться у вузлі, рівна нулю.

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0,$$

де  $n$  - число провідників, які сходяться у вузлі.

Позитивним називаються струми - які входять до вузла, негативними - які виходять з нього.

б) II правило Кірхгофа (правило контурів): у будь-якому замкненому контурі, довільно вибраному в розгалуженому електричному колі, алгебраїчна сума добутків величин струмів на опори відповідних ділянок дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, що діють у цьому контурі.

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{k=1}^n \epsilon_k. \quad (2.10)$$

У сумах  $\sum_{k=1}^n I_k R_k$  і  $\sum_{k=1}^n \epsilon_k$  є додатні і від'ємні величини. Для

цього можна скористатися таким правилом. Вибираємо напрями струмів на окремих ділянках довільно і будемо обходити вибраний замкнений контур у напрямку руху стрілки годинника. Тоді додатними будуть ті струми ( $I_k R_k > 0$ ), які збігаються з напрямком руху, а від'ємними ( $I_k R_k < 0$ ), напрям яких протилежний напрямку руху. Додатними будуть ті електрорушійні сили, напрям дії яких збігається з напрямом вибраного руху ( $\epsilon > 0$ ).

# ЕЛЕКТОРОМАГНЕТИЗМ

## ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ

Магнітне поле завжди зв'язане з струмом, тобто з рухом зарядів. Поки заряджене тіло нерухоме, воно оточене тільки електричним полем, а як тільки воно прийде в рух, крім електричного поля виникає ще і магнітне. Магнітне поле - вид матерії, за допомогою якого здійснюється взаємодія між рухомими електричними зарядами. Магнітне поле, на відміну від електричного, не діє на нерухомий заряд.

## 1. ЗАКОН АМПЕРА

Сила  $d\vec{F}$ , з якою магнітне поле діє на елемент  $d\vec{\ell}$  провідника з струмом  $I$  в ньому, дорівнює векторному добутку елемента довжини провідника на магнітну індукцію  $\vec{B}$ :

$$d\vec{F} = I[d\vec{\ell} \times \vec{B}]. \quad (1.1)$$

Для прямолінійного провідника кінцевої довжини  $\ell$ , що знаходиться в однорідному магнітному полі:

$$\vec{F} = I[\vec{\ell} \times \vec{B}]. \quad (1.2)$$

Модуль сили Ампера визначається за формулою:

$$F = IB\ell \sin\alpha, \quad (1.3)$$

де  $\alpha$  - кут між вектором  $\vec{\ell}$  і вектором магнітної індукції  $\vec{B}$ .

Напрямок сили Ампера знаходиться за правилом лівої руки, або за правилом векторного добутку.

Магнітна індукція  $\vec{B}$  є силовою характеристикою магнітного поля. При  $\sin\alpha = 1$  із закону Ампера, отримаємо:

$$B = \frac{F}{I \cdot \ell}. \quad (1.4)$$

$B$  - магнітна індукція чисельно дорівнює силі, яка діє на провідник довжиною один метр, по якому тече струм один ампер. Одиниця магнітної індукції в СІ - тесла (Тл).

Тесла - магнітна індукція поля, в якій кожний метр довжини провідника, по якому тече струм 1 А, зазнає силу 1 Н.

**Магнітним потоком** (потокотом магнітної індукції) крізь малу площадку  $ds$  називається скалярна фізична величина

$$d\Phi_M = B_n ds = B ds \cos(\vec{B}, \hat{n}), \quad (1.5)$$

де  $B_n$  - проекція вектора магнітної індукції  $\vec{B}$  на напрямок нормалі до площадки  $ds$ .

Магнітний потік  $\Phi_M$  крізь довільну поверхню:

$$\Phi_M = \int_S B_n ds. \quad (1.6)$$

У випадку однорідного поля і плоскої поверхні:

$$\Phi_M = Bns = Bscos\alpha. \quad (1.7)$$

Магнітний потік вимірюється в веберах. Вебер - магнітний потік через площадку  $1\text{ м}^2$  в магнітному полі з індукцією 1 Тл.

## 2. СИЛА ЛОРЕНЦА

На електричний заряд, який рухається в магнітному полі, діє сила, яка називається **силою Лоренца**:

$$\vec{F}_L = q[\vec{V} \cdot \vec{B}], \quad (2.1)$$

де  $q$  - заряд,

$\vec{V}$  - швидкість заряду,

$\vec{B}$  - індукція магнітного поля.

Чисельно силу Лоренца визначають за формулою:

$$F_L = q V B \sin\alpha \quad (2.2)$$

де  $\alpha$  - кут між векторами  $\vec{V}$  і  $\vec{B}$ .

Важливо звернути увагу на те, що сила Лоренца напрямлена завжди перпендикулярно до швидкості руху заряду, є доцентровою силою і роботи над зарядом не виконує. Вона тільки змінює напрям

руху заряду. Кінетична енергія зарядженої частинки при її русі в магнітному полі не змінюється.

### 3. ЕФЕКТ ХОЛЛА

**Ефект Холла** полягає в тому, що в провіднику або напівпровіднику з струмом, поміщеному в магнітне поле, виникає поперечна різниця потенціалів. Причина ефекту Холла - дія сили Лоренца.

Різниця потенціалів в ефекті Холла визначається виразом:

$$U = R_x \frac{BI}{d}, \quad (3.1)$$

де  $R_x$  - стала Холла;

$B$  - індукція магнітного поля;

$I$  - сила струму;

$d$  - товщина зразка.

Вимірювання сталої Холла для напівпровідників дозволяє визначити знак носіїв струму і їх концентрацію.

### 4. ЗАКОН БІО-САВАРА-ЛАПЛАСА

**Закон Біо-Савара-Лапласа** визначає магнітну індукцію в будь-якій точці магнітного поля, що створюється електричним струмом, який тече по провіднику будь-якої форми.:

$$dB = \frac{\mu\mu_0 Id\ell \sin \alpha}{4\pi r^2}, \quad (4.1)$$

де  $dB$  - магнітна індукція поля, що створюється елементом провідника довжиною  $d\ell$  з силою струму  $I$ ;

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

$\alpha$  - кут між радіус-вектором і напрямком струму в провіднику;

$r$  - модуль радіуса-вектора, проведеного від елемента провідника  $d\ell$  до досліджуваної точки.

У векторній формі: 
$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r^3} [d\vec{\ell} \times \vec{r}]. \quad (4.2)$$

Закон Біо-Савара-Лапласа дозволяє розрахувати магнітне поле струму в різних конкретних випадках. Так магнітну індукцію поля, що створюється відрізком провідника з струмом кінцевої довжини, визначають за формулою.

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) \quad (4.2)$$

Позначення зображені на рис.3. Для нескінченно довгого провідника  $\varphi_1 = 0$ ,  $\varphi_2 = \pi$ .

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r_0} \quad (4.3)$$

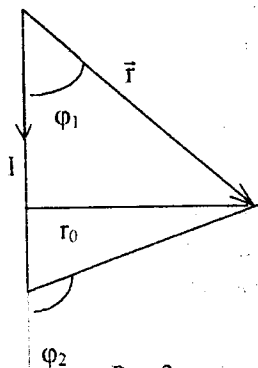


Рис.3

Нарівні з магнітною індукцією  $\vec{B}$  введена ще одна характеристика магнітного поля - напруженість поля  $\vec{H}$ .

Напруженістю магнітного поля називається допоміжна векторна характеристика магнітного поля, яка для однорідного ізотропного середовища зв'язана з індукцією співвідношенням:

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}. \quad (4.4)$$

Напруженість електричного поля вимірюється в амперах на метр.

Слід звернути увагу на те, що напруженість магнітного поля не залежить від магнітних властивостей середовища, а залежить тільки від сили струму і положення точки в магнітному полі.



## 5. МАГНІТНА ІНДУКЦІЯ В ЦЕНТРІ КОЛОВОГО СТРУМУ

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R}, \quad (5.1)$$

де  $R$  - радіус витка. Магнітна індукція на осі колового струму на відстані  $h$  від центра кола:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I R^2}{2(R^2 + h^2)^{3/2}}. \quad (5.2)$$

Магнітним моментом витка з струмом називається добуток сили струму на площу цього витка:

$$P_m = IS. \quad (5.3)$$

Магнітний момент напрямлений вздовж вісі витка з струмом в ту ж сторону, що і індукція  $\vec{B}$  цього магнітного поля (правило буравчика):

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}, \quad (5.4)$$

де  $\vec{n}$  - одиничний вектор додатної нормалі до площини витка.

Циркуляцією вектора магнітної індукції вздовж замкнутого контуру  $\ell$  називається інтеграл, що має вигляд:

$$\oint_{\ell} \vec{B} d\vec{\ell} = \oint_{\ell} B d\ell \cos(\vec{B}, \wedge d\vec{\ell}), \quad (5.5)$$

де  $\ell$  - замкнений контур довільної форми;

$d\vec{\ell}$  - вектор елементарної довжини контура, направлений вздовж обходу контура.

**Закон повного струму для магнітного поля в вакуумі.** Циркуляція вектора індукції магнітного поля вздовж замкнутого контура в вакуумі пропорційна алгебраїчній сумі струмів, які оточені цим контуром:

$$\oint_{\ell} \vec{B} d\vec{\ell} = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i, \quad (5.6)$$

де  $n$  - число провідників з струмом, які оточені контуром  $\ell$  довільної форми,  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Гн/м.

Циркуляція вектора напруженості електростатичного поля вздовж будь-якого замкнутого контура дорівнює нулю - це свідчить про те, що електростатичне поле є потенціальним полем. Циркуляція вектора індукції магнітного поля, як видно із закону повного струму, не дорівнює нулю. Тому магнітне поле - непотенціальне.

Тороїдом називається котушка, витки якої намотані на осердя, що має форму (бублика). Використовуючи закон повного струму, отримали значення магнітної індукції на осьовій лінії тороїда:

$$B = \mu_0 \frac{N}{2\pi r} I = \mu_0 n I, \quad (5.7)$$

де  $r$  - радіус середньої лінії тороїда;

$n = \frac{N}{2\pi r}$  - число витків на одиницю середньої лінії тороїда.

Соленоїдом називається циліндрична котушка з великого числа витків проволочи. Якщо довжина соленоїда значно більша його радіуса, то магнітна індукція на його осі визначається за формулою:

$$B = \mu \mu_0 n I, \quad (5.8)$$

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

## 6. ЯВИЩЕ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

Явище **електромагнітної індукції** полягає в появі ЕРС індукції в контурі при всякій зміні потоку магнітної індукції в контурі крізь поверхню, що охоплюється контуром:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_M}{dt} \quad (6.1)$$

Рівняння (6.1) - закон електромагнітної індукції (закон Фарадея).

Знак «-» в законі електромагнітної індукції відображає правило Ленца: індукційний струм в замкнутому контурі має такий напрямок, що його магнітне поле протидіє зміні магнітного потоку, який викликав індукційний струм.

Слід звернути увагу на те, що якщо замкнений контур має не один, а  $N$  витків, в законі електромагнітної індукції магнітний потік замінюється потокозчепленням:

$$\psi = N\Phi_m, \quad \text{тоді} \quad \xi = -\frac{d\psi}{dt}. \quad (6.2)$$

Явище електромагнітної індукції використовується для отримання змінної ЕРС в електричних генераторах, прискорювачах заряджених частинок (бетатронах) та ін.

## 7. ЗАКОН ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ

Розглянемо замкнений контур, який складається із джерела струму з ЕРС  $\varepsilon$ , двох нерухомих провідників і рухливої перемички довжиною  $\ell$  (рис.4).

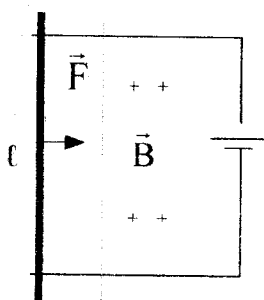


Рис.4.

Нехай повний опір контура (враховуючи і внутрішній опір джерела) дорівнює  $R$ . У відповідності з законом Ома для замкненого кола, струм в контурі:

$$I = \frac{\varepsilon}{R}. \quad (7.1)$$

Якщо цей контур перенести в магнітне поле, вектор магнітної індукції  $\vec{B}$  якого напрямлений перпендикулярно до площини контура, то під дією сили Ампера рухлива перемичка за час  $dt$  переміститься на відстань  $dx$ . Робота по переміщенню провідника в магнітному полі виконується за рахунок енергії джерела струму:

$$dA = Fdx = IB\ell dx = IBds = Id\Phi, \quad (7.2)$$

де  $d\Phi = Bds$  - потік магнітної індукції, що пересікається провідником при його русі.

За законом збереження енергії вся енергія, яка виділяється за час  $dt(\epsilon I dt)$  витрачається на виділення теплоти в контурі  $I^2 R dt$  і на переміщення рухливого провідника  $I d\Phi$ :

$$\epsilon I dt = I^2 R dt + I d\Phi. \quad (7.3)$$

Звідси

$$I = \frac{\epsilon - d\Phi/dt}{R}. \quad (7.4)$$

Порівнюючи її з законом Ома для того ж контура поза магнітним полем, переконуємося, що при зміні магнітного потоку в контурі виникає додаткова електрорушійна сила індукції:

$$\epsilon_{\text{інд}} = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (7.5)$$

а це і є вираз закону електромагнітної індукції.

## 8. САМОІНДУКЦІЯ

Явищем **самоіндукції** називається явище виникнення електрорушійної сили індукції в колі в результаті зміни струму в цьому ж самому колі. Значення ЕРС самоіндукції  $\epsilon_c$  визначається законом електромагнітної індукції:

$$\epsilon_c = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (8.1)$$

де  $\Phi$  - потік магнітної індукції крізь поверхню контура, створений власним магнітним полем струму, що протікає по контуру. Цей потік пропорційний магнітній індукції ( $\Phi \sim B$ ), а магнітна індукція, в свою чергу, згідно закону Біо-Савара-Лапласа пропорційна силі струму в контурі ( $B \sim I$ ). Звідси виходить, що потік індукції через площу контура пропорційний силі струму в контурі:

$$\Phi = LI, \quad (8.2)$$

де  $L$  - індуктивність контура. Індуктивність контура є характеристикою контура подібно його опору, ємності і ін., і для даного контура є величиною сталою. Одиниця вимірювання

індуктивності - генрі (Гн). Генрі - індуктивність контура, в якому при струму в 1 А створюється магнітний потік 1 Вб.

Індуктивність соленоїда розраховують за формулою:

$$L = \mu\mu_0 n^2 V, \quad (8.3)$$

де  $n = N/\ell$  - число витків на одиницю довжини соленоїда,

$V$  - об'єм соленоїда. Індуктивність більш складних кіл вимірюється експериментально за допомогою спеціальних приладів.

Якщо індуктивність кола стала, її можна вивести з-під знаку похідної і ЕРС самоіндукції матиме вигляд:

$$\varepsilon_c = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (8.4)$$

Магнітне поле нерозривно зв'язане з електричним струмом - воно виникає одночасно з виникненням струму і існує до тих пір поки існує струм. Якщо сила струму не змінюється, то не змінюється і магнітне поле.

## 9. ЕНЕРГІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Енергія магнітного поля  $W$  визначається роботою, яку виконує джерело струму проти ЕРС самоіндукції в процесі наростання струму в колі від нуля до максимального значення:

$$W = \frac{LI^2}{2}, \quad (9.1)$$

де  $L$  - індуктивність кола.

Об'ємною густиною енергії магнітного поля називається енергія, що зосереджена в одиниці об'єму поля:

$$\omega = \frac{W}{V}; \quad \omega = \frac{BH}{2} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}, \quad (9.2)$$

де  $B$  - магнітна індукція;

$H$  - напруженість магнітного поля.

## 10. МАГНІТНЕ ПОЛЕ В РЕЧОВИНІ

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_{\text{внутр}}, \quad (10.1)$$

тобто вектор магнітної індукції результувального поля всередині речовини ( $\vec{B}$ ) дорівнює векторній сумі індукції зовнішнього поля ( $\vec{B}_0$ ) і індукції внутрішнього поля ( $\vec{B}_{\text{внутр}}$ ).

Внутрішнє поле одних речовин підсилює зовнішнє магнітне поле, внутрішнє поле інших речовин послаблює зовнішнє поле.

Магнітні властивості речовини визначаються магнітними моментами  $\vec{p}_{\text{ам}}$  атомів. Магнітні моменти атомів складаються із орбітальних магнітних моментів і спінових магнітних моментів електронів атома:

$$\vec{p}_{\text{ам}} = \sum \vec{p}_{\text{орб}} + \sum \vec{p}_{\text{сп}}. \quad (10.2)$$

Якщо магнітні моменти атомів речовини у відсутності зовнішнього магнітного поля рівні нулю ( $p_{\text{ам}} = 0$ ), речовина називається діамагнетиком. Діамагнітним ефектом називається виникнення індукованих магнітних моментів атомів під дією зовнішнього магнітного поля і, за правилом Ленца, направлених проти зовнішнього магнітного поля. Магнітна проникність діамагнетиків менша одиниці ( $\mu < 1$ ) і стала для кожної речовини. Діамагнетики послаблюють зовнішнє магнітне поле.

Якщо магнітні моменти атомів речовини у відсутності зовнішнього магнітного поля не дорівнюють нулю ( $\vec{p}_{\text{ам}} \neq 0$ ), речовина називається парамагнетиком. Магнітна проникність парамагнетиків більша одиниці ( $\mu > 1$ ) і стала для кожної речовини. Парамагнетики слабо підсилюють зовнішнє магнітне поле.

Характеристикою ступеня намагнічування речовини є вектор намагніченості, рівний геометричній сумі магнітних моментів атомів, що знаходяться в одиниці об'єму речовини (магнітний момент одиниці об'єму речовини):

$$\vec{I} = \frac{1}{\Delta V} \sum_1^N \vec{P}_{\text{ам}}. \quad (10.3)$$

Очевидно, що намагніченість речовини буде пропорційна напруженості зовнішнього магнітного поля:

$$I = \chi H, \quad (10.4)$$

де  $\chi$  - магнітна сприйнятливість речовини.

Магнітна сприйнятливість речовини пов'язана з магнітною проникністю простою залежністю:

$$\mu = 1 + \chi. \quad (10.5)$$

З підвищенням температури речовина розмагнічується. Це відбувається тому, що з підвищенням температури магнітна сприйнятливість парамагнітних речовин зменшується (за законом Кюрі):

$$\chi = \frac{C}{T}, \quad (10.6)$$

де  $C$  - стала Кюрі.

Феромагнетиками називаються речовини у яких внутрішнє (власне) магнітне поле значно (в сотні тисяч раз) перевищує зовнішнє магнітне поле, яке його створило. До феромагнетиків належить залізо, нікель, кобальт, деякі сплави.

Основні властивості феромагнетиків:

а) магнітна проникність  $\mu \gg 1$ ; Магнітні властивості феромагнетиків обумовлені спіновими магнітними моментами електронів. У феромагнетиках існують області спонтанного намагнічування, в яких магнітні моменти електронів зорієнтовані всі в одному напрямку. Такі області називають доменами. У зовнішньому магнітному полі відбувається орієнтація вздовж поля не окремих атомів, а магнітних моментів доменів. Завдяки цьому  $\mu \gg 1$ ;

б) магнітна проникність феромагнетиків - величина не стала, вона залежить від напруженості зовнішнього магнітного поля  $\mu = f(H)$ . Тому крива намагнічування (крива залежності індукції

магнітного поля  $\vec{B}$  від напруженості  $\vec{H}$  має складний, нелінійний характер);

в) магнітний гістерезис - відставання зміни магнітної індукції  $B$  від зміни напруженості зовнішнього магнітного поля  $H$ . Петля гістерезиса - крива зміни  $\vec{B}$  від  $\vec{H}$  за цикл повного перемагнічування;

г) точка Кюрі - температура, при якій домени руйнуються і феромагнетик перетворюється в парамагнетик.

## 11. ТЕОРІЯ МАКСВЕЛЛА ДЛЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Теорією Максвелла для електромагнітного поля називається теорія електричних і магнітних явищ, починаючи з електростатичного поля і закінчуючи електромагнітною природою світла. Основу теорії Максвелла утворюють рівняння Максвелла.

Перше рівняння Максвелла:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi_M}{dt} \quad (11.1)$$

Циркуляція вектора напруженості електричного поля по довільному замкненому контуру рівна взятій з оберненим знаком швидкості зміни потоку вектора магнітної індукції крізь поверхню, обмежену контуром.

Друге рівняння Максвелла:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{\ell} = \frac{dN_D}{dt} \quad (11.2)$$

Циркуляція вектора індукції магнітного поля по довільному замкненому контурі дорівнює швидкості потоку вектора електричної індукції крізь поверхню, обмежену контуром.

Третє рівняння Максвелла виражає теорему Остроградського-Гауса для потоку вектора електричної індукції  $\vec{D}$  крізь довільну замкнену поверхню, якій належить сумарний заряд:



$$\oint_s \vec{D} d\vec{s} = \sum_{i=1}^n q_i . \quad (11.3)$$

Четверте рівняння Максвелла є узагальненням теореми Остроградського-Гаусса на змінне магнітне поле:

$$\oint_s \vec{B} d\vec{s} = 0 . \quad (11.4)$$

Із рівнянь Максвелла випливає, що між електричним і магнітним полями існує тісний взаємозв'язок.

Наведемо лабораторні роботи, які за вказівкою викладача необхідно виконати студенту. При захисті студентом лабораторних робіт студент повинен відповісти на контрольні питання до кожної лабораторної роботи.

## Лабораторна робота 1.1

### Дослідження прямолінійного руху тіл в полі тяжіння за допомогою машини Атвуда

*Мета роботи:* дослідити закони руху тіл в полі земного тяжіння.

*Прилади і матеріали:* машина Атвуда, набір важків, додаткові тягарці, електронний мілісекундомір.

#### Теоретичні відомості

Машина Атвуда призначена для вивчення законів прямолінійного рівномірного та рівномірно прискореного рухів і, зокрема, для визначення прискорення вільного падіння тіл.

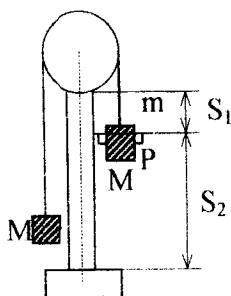


Рис.1

Будова машини Атвуда зображена на рис. 1. Принцип її дії ґрунтується на використанні законів вільного падіння тіл в повітрі. Через нерухомий блок, при обертанні якого силою тертя в осі можна знехтувати, перекинута нитка з двома однаковими вантажами масою  $M$  кожний. В цьому випадку система знаходиться в рівновазі. Якщо на один з вантажів покласти невеликий додатковий тягарець масою  $m$ , то система, що

складається з двох вантажів і тягарця, одержить деяке прискорення а під силою  $F=mg$  і на шляху  $S_1$  буде рухатись з цим прискоренням.

Кільцем  $P$  дія додаткового тягарця  $m$  припиняється і вантажі, рухаючись рівномірно, пройдуть шлях  $S_2$ .

Знайдемо закон руху вантажу  $M$ , розташованого праворуч. Для цього скористаємося системою координат, початок якої знаходиться на

осі блока, а вісь ОХ напрямлена вертикально вниз. На вантаж М діють дві сили: сила ваги  $(M+m)g$  та сила натягу правої частини нитки  $T_1$ . Запишемо другий закон Ньютона:

$$(M+m)g - T_1 = (M+m)a, \quad (1)$$

де  $a$  - прискорення вантажу М.

Тепер застосуємо другий закон Ньютона до вантажу М, що розташований ліворуч. Оскільки нитка нерозтягнута, прискорення лівого вантажу за абсолютним значенням рівне прискоренню правого, але напрямлене в протилежний бік, тобто воно рівне  $-a$ . Натяг лівого кінця нитки позначимо через  $T_2$ , тоді:

$$Mg - T_2 = -Ma. \quad (2)$$

У випадку невагомго блока і відсутності сили тертя в його осі:

$$T_1 = T_2. \quad (3)$$

Зрівнянь (1), (2) та (3) знайдемо прискорення системи:

$$a = \frac{mg}{2M + m}. \quad (4)$$

Таким чином, вважаючи  $g$  відомим та проводячи досліди з різними вантажами і додатковими тягарцями  $m$ , за формулою (4) можна обчислити прискорення  $a$  і здійснити експериментальну перевірку другого закону Ньютона.

Машина Атвуда дає можливість також визначити прискорення вільного падіння  $g$ , що й складає основне завдання даної роботи. Для цього з формули (4) знайдемо  $g$ :

$$g = \frac{2M + m}{m} a. \quad (5)$$

Прискорення  $a$  безпосередньо виміряти неможливо, але його легко обчислити, вимірявши шлях  $S_1$ , пройдений вантажем М при рівномірноприскореному русі, а також шлях  $S_2$  рівномірного руху та час  $t$  його проходження.

Для рівномірноприскореного руху, при умові, що початкова швидкість  $V_0$  рівна нулю, пройдений шлях можна знайти, маючи кінцеву швидкість та прискорення:

$$S_1 = \frac{V^2}{2a}. \quad (6)$$

Кінцева швидкість  $V$  набувається вантажем  $M$  в момент проходження кільця  $P$ , яке припиняє дію додаткового тягарця. Далі з цією швидкістю вантаж рухається рівномірно і за час  $t$  проходить шлях  $S_2$ . Тому

$$V = \frac{S_2}{t}. \quad (7)$$

З формул (6) і (7) знаходимо прискорення  $a$ , підставляючи його значення в вираз (5), остаточно одержуємо:

$$g = \frac{2M + m}{m} \cdot \frac{S_2}{2S_1 t^2}, \quad (8)$$

де  $M$  - маса великого вантажу;

$m$  - маса додаткового тягарця;

$S_1$  - шлях, що проходить вантаж  $(M+m)$  при рівноприскореному русі;

$S_2$  - шлях, пройдений вантажем  $M$  при рівномірному русі;

$t$  - час проходження шляху  $S_2$ .

### Порядок виконання роботи

1. Підготувати прилад до вимірювань.
2. На правий вантаж встановити один з додаткових тягарців.
3. Сумістити нижню грань правого вантажу з рисою, що панесена на верхньому кронштейні.
4. Виміряти з допомогою шкали колонки шляхи рівноприскореного руху  $S_1$  та рівномірного руху  $S_2$ .

5. Натиснути клавішу "Пуск".
6. Записати значення часу  $t$ .
7. Вимірювання повторити не менше 5 разів.
8. Дані всіх вимірювань занести в таблицю:

Таблиця 1

№ дослід у	M кг	m кг	S <sub>1</sub> м	S <sub>2</sub> м	t с	g м/с <sup>2</sup>	Δg м/с <sup>2</sup>	ξ %

### Обробка результатів експерименту та їх аналіз

1. Визначити середнє значення часу руху вантажу на шляху S<sub>2</sub> за формулою:

$$t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i,$$

де  $n$  - кількість виконаних вимірювань,

$t_i$  - час  $i$ -того вимірювання.

2. З допомогою формули (8) вирахувати значення прискорення вільного падіння тіл.

3. Визначити абсолютну та відносну похибку вимірювань.

### Контрольні запитання

1. Механічний рух як найпростіша форма руху матерії. Відносність руху. Види руху.

2. Кінематика матеріальної точки: траєкторія, шлях, переміщення, швидкість, прискорення. Поступальний рух твердого тіла.

3. Проаналізуйте можливі джерела та причини похибок при визначенні  $g$ .

## Лабораторна робота 1.3

### Вивчення центрального удару куль

*Мета роботи:* експериментальне вивчення застосування законів збереження енергії та імпульсу до центрального удару куль.

*Прилади і матеріали:* установка для дослідження зіткнення тіл, штангенциркуль, лінійка, терези з комплектом вантажів.

#### Теоретичні відомості

Згідно з законом збереження імпульсу, імпульс двох куль до удару повинен бути рівним імпульсу цих же куль після удару:

$$m_1 \vec{V}_1 + m_2 \vec{V}_2 = m_1 \vec{U}_1 + m_2 \vec{U}_2. \quad (1)$$

Оскільки швидкості направлені вздовж однієї прямої, геометричну суму можна замінити сумою алгебраїчною:

$$m_1 V_1 + m_2 V_2 = m_1 U_1 + m_2 U_2. \quad (2)$$

Вважаючи, що кулі взаємодіють тільки під час удару та враховуючи ізолюваність системи, робимо висновок, що повна механічна енергія обох куль до і після удару дорівнює сумі їх кінетичних енергій в відповідні моменти часу. Тому відповідно закону збереження енергії можемо записати:

$$\frac{m_1 V_1^2}{2} + \frac{m_2 V_2^2}{2} = \frac{m_1 U_1^2}{2} + \frac{m_2 U_2^2}{2}. \quad (3)$$

Рівняння (2) і (3) зведемо до виду:

$$m_1 (V_1 - U_1) = m_2 (U_2 - V_2), \quad (4)$$

$$m_1 (V_1^2 - U_1^2) = m_2 (U_2^2 - V_2^2), \quad (5)$$

Поділивши (5) на (4), одержуємо:

$$V_1 + U_1 = V_2 + U_2. \quad (6)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (4) та (5), знаходимо вирази для швидкості куль після удару:

$$U_1 = \frac{2m_2 V_2 + (m_1 - m_2)V_1}{m_1 + m_2}, \quad (7)$$

$$U_2 = \frac{2m_1 V_1 + (m_2 - m_1)V_2}{m_1 + m_2}. \quad (8)$$

Якщо маси куль однакові, то:

$$m_1 = m_2 = m. \quad (9)$$

Підставивши (9) в (7) та (8), одержуємо:

$$U_1 = V_2; \quad U_2 = V_1, \quad (10)$$

тобто кулі обмінюються швидкостями.

Знаючи масу та швидкість куль до і після удару, можна визначити середню силу удару куль. Для цього застосуємо другий закон Ньютона, наприклад, до другої кулі:

$$\langle F \rangle = \frac{\Delta(m_2 V_2)}{\tau} = \frac{m_2(U_2 - V_2)}{\tau}, \quad (11)$$

де  $\tau$  - час, протягом якого відбувався удар.

Якщо до удару друга куля була нерухома ( $V_2 = 0$ ), то підставляючи (9), (10) в (11), маємо:

$$\langle F \rangle = \frac{mV_1}{\tau} \quad (12)$$

У випадку абсолютно непружного удару двох куль виконується лише закон збереження імпульсу, на основі якого запишемо:

$$m_1 V_1 + m_2 V_2 = (m_1 + m_2) U, \quad (13)$$

де  $U$  - швидкість обох куль після удару.

Звідки знаходимо

$$U = \frac{m_1 V_1 + m_2 V_2}{m_1 + m_2}. \quad (14)$$

Врату кінетичної енергії при абсолютно непружному ударі знайдемо як різницю кінетичних енергій обох куль до та після удару:

$$\Delta W = W_1 + W_2 - W_{1-2} = \frac{m_1 V_1^2}{2} + \frac{m_2 V_2^2}{2} - \frac{(m_1 + m_2) U^2}{2}. \quad (15)$$

Підставивши (14) в (15) прийдемо до такого виразу:

$$\Delta W = \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} (V_1 - V_2)^2. \quad (16)$$

У цій роботі для вимірювання початкових і кінцевих швидкостей куль, а також часу удару використовується прилад, який складається з штатива 1 (див. рис. 1), на якому з допомогою спеціального пристрою 2 прикріплено підвіси з кулями 3, двох кутомірних шкал 4, електромагніту 5 та секундоміра 6. Для вивчення пружного удару використовуються сталеві кулі, а при вивченні непружного удару - пластилінові. Електромагніт служить для утримання першої кулі в відхиленому на кут  $\alpha_1$  положенні. Друга куля до початку вимірювань нерухома в положенні рівноваги.

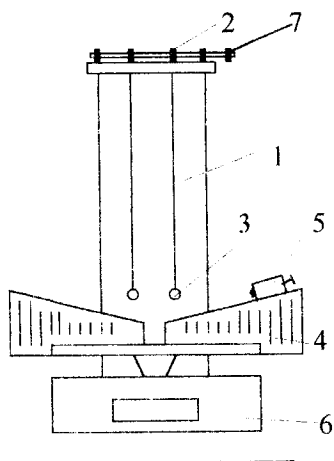


Рис. 1.

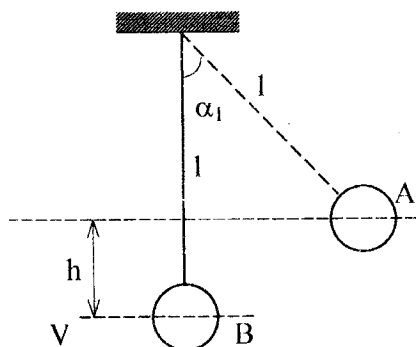


Рис. 2.



Швидкість першої кулі безпосередньо перед ударом можна вирахувати, якщо знайти довжину підвісу та початковий кут відхилення (див. рис. 2).

Оскільки з положення А в положення В куля рухається тільки під дією гравітаційних сил, справджується закон збереження енергії, на основі якого можна записати:

$$mgh = \frac{mV^2}{2}. \quad (17)$$

При цьому вважається, що в положенні В потенціальна енергія дорівнює нулеві.

З рисунка 2 видно, що:

$$h = \ell - \ell \cos \alpha_1 = \frac{2\ell \sin^2 \alpha_1}{2}. \quad (18)$$

З рівняння (17) та (18) знаходимо:

$$V_1 = 2\sqrt{g\ell} \sin \alpha_1 / 2. \quad (19)$$

За цією ж формулою визначаються швидкості куль після удару: для пружного удару кути  $\alpha_1'$  та  $\alpha_2'$  першої та другої кулі після удару, а для непружного удару  $\alpha_2''$ , на який разом відхиляються обидві кулі.

Час удару відміряється електронним мілісекундоміром.

При виконанні лабораторної роботи необхідно мати на увазі, що використаний в ній метод вивчення законів збереження та спосіб вимірювання мають певні похибки, які безумовно впливають на кінцевий результат.

Дійсно, ми вважали систему куль ізольованою і не враховували сил тертя з боку кронштейна та повітря. Ми вважали сталі кулі абсолютно пружними, а пластилінові – абсолютно непружними, що є ідеалізацією і не відповідає властивостям реальних тіл. Крім цього неминучі похибки при вимірюванні довжини підвісу та кутових відхилень куль, тому виконання законів збереження слід чекати в рамках цих похибок.

## Порядок виконання роботи

### А. Пружний удар кулі.

1. Повертаючи корбочку 7, встановити таку відстань між стержнями, щоб кулі дотикались одна до одної.
2. Встановити кутамири так, щоб леза підвісів в положенні рівноваги показували на шкалах нулі. Шкали закріпити гайками.
3. Ввімкнути секундомір в мережу, натиснувши клавішу «СЕТЬ» мілісекундоміра, відпустити клавішу пуск «СТАРТ». Праву кулю відхилити в бік електромагніту і блокувати в цьому положенні.
4. Записати значення кута  $\alpha_1$ ; натиснути клавішу «СБРОС»; натиснути клавішу пуск «СТАРТ».
5. Після зіткнення кулі визначити значення кутів  $\alpha_1'$  та  $\alpha_2'$ , а також записати час зіткнення.
6. Дослід повторити не менше 10 разів та визначити середні значення кутів та часу за формулами:

$$\alpha_1' = \frac{\ell}{n} \sum \alpha_{1i}'; \quad \alpha_2' = \frac{\ell}{n} \sum \alpha_{2i}'; \quad \tau = \frac{\ell}{n} \sum \tau_i.$$

7. Виміряти довжину підвісу  $\ell$  - віддаль між стержнем верхнього кронштейну та центром кулі.
8. На аналітичних терезах визначити масу кулі з точністю до  $\pm 0,12$  г.
9. Всі дані вимірів занести в таблицю:

Таблиця 1.

№ досліду	$\alpha_1$ , град.	$\alpha_1'$ , град.	$\alpha_2''$ , град.	$\ell$ , м	m, кг	$\tau$ , с	

### В. Непружний удар

1. Замінити на приладі сталі кулі пластиліновими.

- Виконати пункти 1-4 завдання А.
- Після зіткнення куль визначити кут  $\alpha_2''$ .
- Дослід повторити не менше 10 разів та визначити середнє значення кута за формулою:

$$\alpha_2'' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_{2i}''.$$

- Виконати пункти 7-9 завдання А.

Таблиця 2.

№ досліду	$\alpha_1$ , град.	$\alpha_2''$ , град.	$\ell$ , м	$m$ , кг	

### Обробка результатів експерименту та їх аналіз

#### А

- За формулою (19), використовуючи дані таблиці 1, вирахувати швидкість куль до удару  $V_1$  та  $V_2$ , а також після удару  $U_1$  та  $U_2$ .
- За формулами (2) та (3) перевірити справедливість законів збереження. Виконати аналіз результатів експерименту.
- За формулою (16) знайти середню силу удару. Оцінити її величину.
- Знайти абсолютну та відносну похибки.

#### В

- За формулою (19), використовуючи дані табл.2 вирахувати швидкості куль до удару  $V_1$  та  $V_2$ , а також після удару  $U_1$  та  $U_2$ .
- За формулою (13) перевірити справедливість закону збереження імпульсу.
- За формулою (15) знайти втрати механічної енергії.
- Виконати аналіз отриманих результатів та вирахувати абсолютну та відносну похибки експерименту.

## Контрольні запитання

1. Імпульс тіла. Закон збереження імпульсу. Центр мас системи.
2. Удар. Абсолютно пружний та абсолютно непружний удари.
3. Енергія. Види енергії в механіці. Закон збереження енергії. Чи завжди справджується?
4. Перерахуйте джерела похибок при виконанні даної роботи.

## Лабораторна роботи 1.5

### Вивчення абсолютно пружного центрального удару куль за допомогою хронометра

*Мета роботи:* вивчити закони збереження при абсолютно пружному ударі на прикладі визначення часу удару, середньої сили удару, швидкості кулі в момент удару за допомогою конденсаторного хронометра.

*Прилади та матеріали:* експериментальна установка; штангенциркуль і лінійка.

### Опис установки

(Теоретичні відомості описані в лабораторній роботі №1-3)

Час зіткнення  $\tau$  тіл настільки малий, що його неможливо виміряти секундоміром. Його визначають методом конденсаторного хронометра, принцип дії якого полягає в наступному. Куля при ударі замикає електричне коло, що складається із зарядженого конденсатора  $C$ ,

резистора R і гальванометра G, з'єднаних між собою, як показано на рис.1.

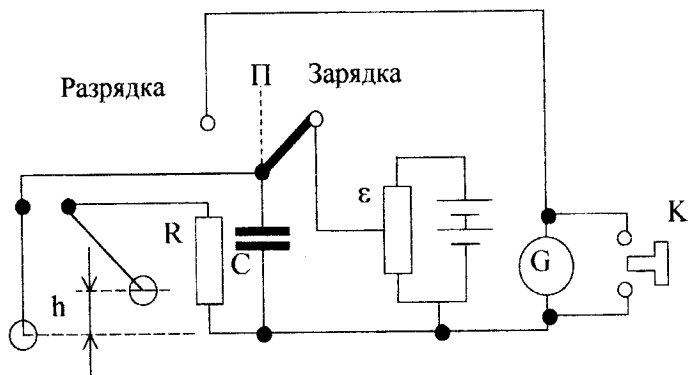


Рис. 1. Установка для визначення часу удару куль.

Нехай у початковий момент часу  $t$  конденсатор має заряд  $g_0$ . За час  $\Delta t$  при ударі заряд конденсатора зменшиться на  $\Delta g$ , виходячи із співвідношення  $I = \frac{dg}{dt}$ , маємо  $dg = I \cdot dt$ , де  $I$  – миттєве значення струму

(його визначають з Закону Ома)  $I = \frac{U}{R}$ , але  $U = \frac{g}{C}$ , де  $C$  – ємність конденсатора,  $R$  – опір кола. Тоді  $dg = \frac{g}{RC} dt$ .

Розділимо змінні та проінтегруємо останній вираз:

$$\int_{g_0}^g \frac{dg}{g} = \int \frac{dt}{RC} \rightarrow \ln \frac{g_0}{g} = \frac{\tau}{CR}$$

Звідки:  $\tau = CR \ln \frac{g_0}{g}$ ,

де  $g_0$  – початковий заряд конденсатора;

$g$  – заряд, який залишився після удару.

Для вимірювання заряду скористаємося гальванометром, відхилення показчика якого  $n$  – пропорційне значенню заряду. Тобто  $g_0 \sim n_0$ , а  $g \sim n$ .

Тоді:

$$\tau = CR \cdot \ln \frac{n_0}{n}$$

### Порядок виконання роботи

1. Відвести одну з куль і закріпити її фіксатором, зарядити конденсатор, поставити перемикач П в положення “ЗАРЯДКА” на 3-4 с., а потім розрядити його через гальванометр переведенням перемикача П в положення “РОЗРЯДКА”. Записати показ гальванометра  $n_0$ . Дослід повторити не менше 10 разів. Одержані результати занести в таблицю. Для заспокоєння показчика гальванометра слід періодично натискати кнопку К.
2. Зарядити конденсатор, перевівши перемикач П спочатку в положення “ЗАРЯДКА” на 3-4 с., а потім в нейтральне положення. Провести удар куль, звільнивши при цьому фіксатор. Потім перемикач П перевести в положення “РОЗРЯДКА” і записати відхилення показчика гальванометра  $n$ . Дослід повторити не менше 10 разів.
3. Визначити висоту піднімання кулі  $h$  і її радіус  $r$ , а також записати значення опору кола  $R$  і ємності конденсатора  $C$ .

Таблиця 1.

$C, \text{ ф}$	$R, \text{ Ом}$	$n_0$	$n$	$h, \text{ м}$	$r, \text{ м}$

## Обробка результатів дослідження і їх аналіз

1. За формулою (19) визначити швидкість кулі при ударі (л.р. 1.3).
2. За формулою (1) визначити час зіткнення куль. Знайти абсолютну і відносні похибки  $\tau$ .
3. Визначити масу кулі і за формулою (12) вирахувати середню силу удару. Пояснити одержані результати (л.р. 1.3).

### Контрольні запитання

1. Що таке пружний і непружний удар?
2. Який буде характер руху куль після удару?
3. Одержати формули для розрахунку відносної і абсолютної похибок вимірюваних величин.

## Лабораторна робота 1.6

### Визначення моментів інерції твердих тіл за допомогою трифілярного підвісу

*Мета роботи:* Набувати навичок експериментального визначення моментів інерції твердих тіл та перевірити теорему Штейнера.

*Прилади та матеріали:* трифілярний підвіс, терези, комплект гирок, штангенциркуль, досліджувані тіла.

### Теоретичні відомості

Момент інерції – це фізична величина, що є мірою інертності тіл при обертовому русі. Чисельно вона дорівнює сумі добутків мас

матеріальних точок, на які подумки розбивають тіло, на квадрати їх віддалей від осі обертання:

$$J \sum_{i=1}^n m_i r_i^2. \quad (1)$$

У випадку однорідного тіла правильної форми сума замінюється інтегруванням. На практиці часто необхідно визначити моменти інерції твердих тіл неоднорідних або довільної (неправильної) форми. У таких випадках моменти інерції визначають експериментально. Одним з методів визначення моментів інерції є метод трифілярного підвісу. Трифілярний підвіс являє собою круглу платформу, що підвішена на трьох симетрично розташованих нитках, прикріплених до країв цієї платформи. Зверху ці нитки також симетрично прикріплені до диску меншого діаметра, ніж діаметр платформи.

Платформа може здійснювати крутильні коливання навколо (рис.1.) вертикальної осі, що перпендикулярна до її площини та проходить через її середину. Центр мас платформи при цьому переміщується вздовж осі обертання. Період коливань визначається величиною моменту інерції платформи. Він буде іншим, якщо

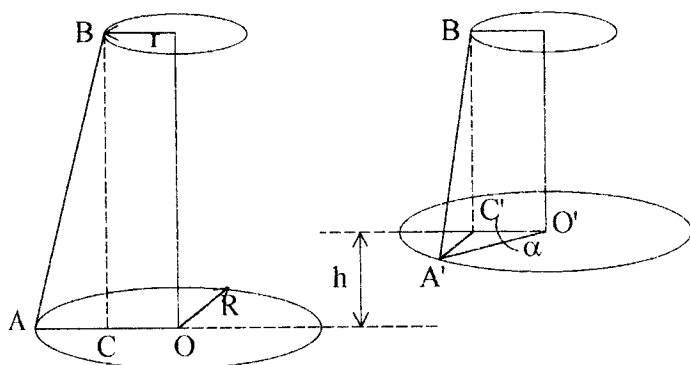


Рис.1.



платформу навантажити будь-яким тілом. Це й використовується в даній роботі.

Якщо платформа масою  $m$ , обертаючись в одному напрямку, піднялась на висоту  $h$ , то вона набуде приросту потенціальної енергії.

$$W = mgh, \quad (2)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння.

Обертаючись в другому напрямку, платформа прийде в положення рівноваги з кінетичною енергією

$$W_k = \frac{J\omega_0^2}{2}, \quad (3)$$

де  $J$  – момент інерції платформи;

$\omega_0$  – кутова швидкість платформи в момент досягнення нею положення рівноваги.

Знехтувавши роботою сил тертя, на основі закону збереження механічної енергії, можемо записати:

$$\frac{J\omega_0^2}{2} = mgh. \quad (4)$$

Вважаючи, що платформа здійснює гармонічні коливання, можемо записати залежність кутового зміщення платформи від часу в вигляді:

$$\alpha = \alpha_0 \sin \frac{2\pi}{T} t, \quad (5)$$

де  $\alpha$  – кутове зміщення платформи;

$\alpha_0$  – амплітуда зміщення;

$T$  – період коливань;

$t$  – поточний час.

Кутова швидкість  $\omega$  визначається як перша похідна від кута  $\alpha$  за часом, тобто:

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{2\pi\alpha_0}{T} \cos \frac{2\pi}{T}t. \quad (6)$$

В моменти проходження через положення рівноваги ( $t=0, \frac{1}{2}T, \frac{3}{2}T$  і т.д.) абсолютне значення її буде

$$\omega_0 = \frac{2\pi\alpha_0}{T}. \quad (7)$$

Підставивши значення  $\omega_0$  в рівняння (1), одержимо:

$$mgh = \frac{1}{2}J\left(\frac{2\pi\alpha_0}{T}\right)^2. \quad (8)$$

Якщо  $l$  - довжина ниток підвісу,  $R$  - радіус платформи,  $r$  - радіус верхнього диска, то з рис.1 видно, що

$$h = OO' = BC - BC_1 = \frac{BC^2 - BC_1^2}{BC_2 + BC_1}, \quad (9)$$

але

$$BC^2 = AB^2 - AC_1^2 = \ell^2 - (R - r)^2;$$

$$BC_1^2 = A_1B^2 - A_1C_1^2 = \ell^2 - (R + r^2 - 2Rr \cos \alpha_0), \quad (10)$$

тому

$$h = \frac{2Rr(1 - \cos \alpha_0)}{BC + BC_1} = \frac{4Rr \sin^2 \frac{\alpha_0}{2}}{BC + BC_1}.$$

При малих значеннях кута відхилення  $\alpha_0$  синус цього кута можна замінити значенням самого кута в радіанах, а знаменник вважати рівним  $2\ell$ . Врахувавши це, одержимо:

$$h = \frac{Rr\alpha_0^2}{2\ell}. \quad (11)$$

Підставивши значення  $h$  у рівняння (8), маємо:

$$mg \frac{Rr\alpha_0^2}{2\ell} = \frac{1}{2}J\left(\frac{2\pi\alpha_0}{T}\right)^2, \quad (12)$$

звідки одержуємо остаточно:

$$J = \frac{mgRr}{4\pi^2 \ell} T^2. \quad (13)$$

За формулою (13) можна визначити момент інерції і самої платформи й тіла, що покладене на неї, оскільки всі величини правої частини формули можуть бути безпосередньо виміряні.

Трифілярний підвіс дає можливість також перевірити теорему Штейнера:

$$J = J_0 + ma^2. \quad (13')$$

Момент інерції тіла відносно будь-якої осі дорівнює сумі моменту його інерції відносно паралельної осі, яка проходить через центр мас, та добутку маси тіла на квадрат віддалі між осями.

Для перевірки теореми Штейнера необхідно мати два абсолютно однакових тіла. Спочатку визначають момент інерції одного з них, а потім обидва тіла розміщують симетрично на платформі і визначають їх момент інерції при такому розташуванні. Половина цього значення і буде давати момент інерції одного тіла, що знаходиться на фіксованій віддалі від осі обертання. Знаючи віддаль, масу тіла та момент інерції його відносно центральної осі, можна вирахувати момент інерції цього ж тіла за теоремою Штейнера. Порівняння одержаних значень моментів інерції і буде перевіркою теореми.

### Порядок виконання роботи

1. Повернути нижню платформу на кут 8-10°, надавши їй обертовий імпульс для початку крутильних коливань. Секундоміром виміряти час 25-30 повних коливань підвісу та визначити період коливань за формулою:

$$T = \frac{t}{n}. \quad (14)$$

- У центрі платформи розташувати досліджувальне тіло  $m_1$ , та визначити період коливань системи  $T_1$ .
- На платформі симетрично відносно центру розмістити два тіла масою  $m_1$  і визначити період коливань системи  $T_2$ .
- Штангенциркулем заміряти радіус досліджуваного диска  $r_1$  та віддаль  $a$  між центрами платформи і зміщеного диска. Дані всіх вимірювань занести в таблицю:

Таблиця 1.

R, кг	r, м	ℓ, м	m <sub>0</sub> , кг	T <sub>0</sub> , с	T <sub>1</sub> , с	T <sub>2</sub> , с	m <sub>1</sub> , кг	r <sub>1</sub> , м	a, м

### Обробка результатів експерименту та їх аналіз

- За формулою (13) обчислити момент інерції  $J_0$  платформи. У цьому випадку  $m=m_0$ ,  $T=T_0$ .
- За формулою (13) обчислити момент інерції  $J_c$  платформи, навантаженої диском  $m_1$ . У даному разі  $m=m_0+m_1$ ,  $T=T_1$ .
- Із співвідношення  $J_c=J_0+J_g$  знайти момент інерції диска відносно центральної осі  $J_g$ .
- За теоретичною формулою  $J'_g = \frac{1}{2} m_1 r_1^2$  знайти момент інерції цього ж диска. Результат співставити з експериментальним.
- За формулою (13) обчислити момент інерції  $J_2$  платформи, навантаженої двома симетрично розташованими дисками  $m_1$ .
- За формулою  $J = \frac{J_2 - J_0}{2}$  (15) знайти момент інерції диска відносно осі, зміщеної на  $a$  від центра мас.
- За формулою (13) обчислити момент інерції зміщеного диска згідно з теоремою Штейнера. Результат співставити з експериментом.

8. Методом логарифмування та диференціювання формули (13) одержати вираз відносно похибки експерименту. Знайти відносну та абсолютну похибки одного з експериментів.

### **Контрольні запитання**

1. Тверде тіло як система частинок. Його момент інерції та кінетична енергія.
2. Основний закон динаміки обертального руху.
3. Теорема Штейнера.
4. Переваги та недоліки вивченого методу визначення моменту інерції тіл.

## **Лабораторна робота 1.7**

### **Визначення моменту інерції маятника Обербека**

*Мета роботи:* Вивчення основного закону динаміки обертального руху шляхом визначення моменту інерції маятника Обербека експериментальним і розрахунковим способом.

*Прилади і матеріали:* маятник Обербека, комплект вантажів, штангенциркуль, електронний секундомір.

### **Теоретичні відомості**

В даній роботі належить визначити момент інерції маятника Обербека, який являє собою хрестовину 1 (рис.1), що складається з чотирьох взаємно перпендикулярних стержнів. Вздовж них можуть переміщуватись вантажі 2 однакової маси  $m_1$ . На горизонтальній осі хрестовини є двоступінчатий диск 3, на який намотується нитка. Один

кінець її прикріплений до диска, на другий підвішується вантаж 4. Під дією цього вантажу нитка розмотується з диска і викликає обертовий рух хрестовини, який приблизно можна вважати рівномірно прискореним рухом.

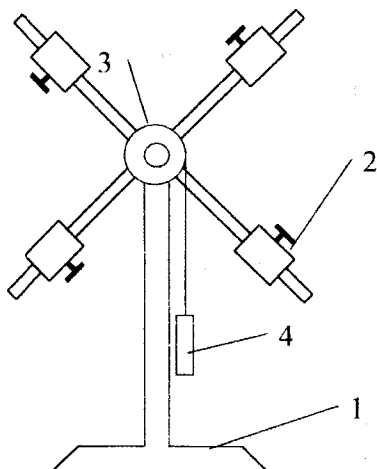


Рис.1

Визначити момент інерції маятника Обербека:

Перший спосіб – експериментальний.

Якщо виміряти кутове прискорення  $\epsilon$  руху хрестовини і момент діючих на диск сил  $M$ , то скориставшись основним рівнянням динаміки обертового руху:

$$\epsilon = \frac{M}{J} \quad (1)$$

ми можемо визначити момент інерції маятника.

Але величини  $M$  та  $\epsilon$  безпосередньому вимірюванню не піддаються. Тому, вимірявши висоту падіння  $h$  вантажу  $m$  та час його падіння  $t$ , за рівнянням рівноприскореного руху при  $V_0 = 0$ .

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

можемо знайти прискорення падіння вантажу, яке є одночасно тангенціальним прискоренням обертового руху маятника.

Заміривши радіус диска  $r$ , обчислимо кутове прискорення:

$$\varepsilon = \frac{a}{r} = \frac{2h}{t^2 r}. \quad (2)$$

Момент діючих сил створюється силою натягу нитки.

$$F = m(g - a).$$

Якщо знехтувати силою тертя, то

$$M = F \cdot r = m(g - a) \cdot r = m \left( g - \frac{2h}{t^2} \right) \cdot r \quad (3)$$

Підставивши вирази (2) і (3) в (1), одержимо кінцевий результат:

$$J = mr^2 \left( \frac{gt^2}{2h} - 1 \right). \quad (4)$$

#### Другий спосіб – теоретичний.

Розіб'ємо маятник на систему тіл, що обертаються: 4-х стержнів довжиною  $\ell$ , 4-х тіл масою  $m$  та довжиною  $\ell_0$ . Момент інерції маятника дорівнює сумі моментів інерції тіл, що його складають.

Момент інерції стержня довжиною  $\ell$  відносно осі, що проходить перпендикулярно до стержня через його кінець, дорівнює:

$$J = \frac{1}{3} m_2 \ell^2,$$

де  $m_2$  - маса стержня. Для 4-х таких стержнів

$$J_1 = \frac{4}{3} m_2 \ell^2. \quad (5)$$

Розміри тіл масою  $m_1$  малі в порівнянні з віддаллю від осі обертання до центра мас цих тіл, тому їх можна розглядати як матеріальні точки, момент інерції яких визначається співвідношенням:

$$J_2 = 4m_1R^2. \quad (6)$$

Знехтувавши моментом інерції дисків, одержуємо для всього маятника:

$$J' = \frac{4}{3}m_2\ell^2 + 4m_1R^2. \quad (7)$$

### Порядок виконання роботи

1. Встановити верхній кронштейн на вибраній висоті так, щоб вантаж при падінні проходив через середину робочого вікна фотоелектричного датчика.
2. Розмістити вантажі  $m_1$  на однаковій відстані від осі обертання.
3. Штангенциркулем заміряти радіус двоступінчастого диска  $r_1$  та  $r_2$ .
4. Намотати нитку з вибраним числом вантажів масою  $m$  на диск радіусом  $r_1$ .
5. Встановити нижній край вантажів точно по рисці на корпусі верхнього фотоелектричного датчика.
6. Натиснути клавішу “СЕТЬ” та переконатись, що всі індикатори показують “нуль”, в протилежному випадку натиснути клавішу “СБРОС”.
7. За допомогою шкали визначити висоту падіння вантажів.
8. Натиснути клавішу “ПУСК”.
9. Записати час падіння вантажів, виміряти мілісекундоміром.
10. Експеримент повторити 3-4 рази для однакового положення вантажів  $m_1$  при різних значеннях вантажу  $m$  для радіуса диска  $r_1$ , потім повторити теж саме для радіуса  $r_2$ . Всі дані занести в таблицю 1.



Таблиця 1.

m	t	h	r <sub>1</sub>	r <sub>2</sub>

11. Для визначення моменту інерції маятника Обербека теоретичним шляхом необхідно заміряти довжину стержня хрестовини  $\ell$ , записати масу вантажів  $m_1$ , та заміряти їх довжину  $\ell_0$ .
12. Заміряти діаметр стержня хрестовини  $D$  і віддаль вантажів від осі обертання  $R_0$ . Всі данні занести в таблицю 2.

Таблиця 2.

$\ell$	$D$	$m_1$	$\ell_0$	$R_0$	$m_2$	$R$

Де  $m_2$  – маса стержня яку можна знайти за формулою:

$$m_2 = \rho V = \rho \frac{\pi D^2}{4} \cdot \ell \quad (8)$$

$\rho$  – густина матеріалу стержнів.

$R$  – віддаль від осі обертання до центрів мас вантажів

$$R = R_0 + \frac{\ell_0}{2}. \quad (9)$$

### Обробка результатів експерименту та їх аналіз

1. За формулою (4) обчислимо момент інерції маятника Обербека для різних радіусів диска та вантажів  $m$ .
2. Визначити абсолютну та відносну похибки експерименту.
3. За формулою (7) визначити теоретичний момент інерції маятника Обербека.
4. Порівняти результати, одержані експериментальним та теоретичним шляхом. Зробити відповідні висновки.

## Контрольні запитання

1. Тверде тіло як система матеріальних точок. Обертання тіла навколо нерухомої осі.
2. Основне рівняння динаміки обертального руху твердого тіла. Момент інерції твердого тіла. Момент інерції, момент сили, момент імпульсу.
3. Кінетична енергія тіла, що обертається.
4. Закон збереження енергії та моменту імпульсу.

## Лабораторна робота 1.10

### Визначення моментів інерції тіл на основі закону збереження енергії

*Мета роботи:* експериментальна перевірка закону збереження енергії в механіці шляхом визначення моментів інерції тіл кочення.

*Прилади і матеріали:* установка для визначення моментів інерції тіл; набір тіл кочення; терези; штангенциркуль; лінійка.

### Теоретичні відомості

Закон збереження та перетворення енергії є одним з фундаментальних законів природи, справедливим для систем як макроскопічних тіл, так і для елементарних частинок. Він є вираженням вічності й незнищуваності руху в природі, який лише переходить із однієї форми в іншу. Цей закон формулюється так: в ізольованій системі тіл енергія може переходити із одних видів в інші та передаватися від одного тіла до іншого, але її загальна кількість залишається незмінною.

Якщо в ізолюваній системі діють тільки потенціальні (консервативні) сили, то взаємні перетворення механічної енергії в інші види (немеханічні форми) відсутні. Така система носить назву ізолюваної консервативної системи і для неї дійсний закон збереження та перетворення енергії в механіці: механічна енергія ізолюваної консервативної системи тіл не змінюється в процесі її руху:

$$W = W_k + W_n = \text{const},$$

Закон збереження механічної енергії не можна застосовувати до систем, в яких діють сили тертя або існує залишкова (пластична) деформація, оскільки частина механічної енергії в процесі руху розсіюється, перетворюється в немеханічні форми, наприклад, в теплоту. Такі системи називаються дисипативними.

Нехай тіло масою  $m$  скочується без тертя по похилій площині висотою  $h$ . Опором повітря знехтуємо. Оскільки в цьому випадку діє тільки сила тяжіння, яка є потенціальною (консервативною), то це тіло являє собою ізолювану консервативну систему, до якої можна застосувати закон збереження механічної енергії:

$$W_n = W_k. \quad (1)$$

Потенціальна енергія вираховується за формулою:

$$W_n = mgh. \quad (2)$$

Кінетична енергія тіла визначається як сума кінетичної енергії поступального та обертального рухів:

$$W_k = W_{\text{пост}} + W_{\text{оберт}} = \frac{mV^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}, \quad (3)$$

де  $J$  – момент інерції тіла,

$\omega$  – його кутова швидкість.

З рівнянь (1)-(3) одержуємо:

$$mgh = \frac{mV^2}{2} + \frac{J\omega^2}{2}. \quad (4)$$

Кутова швидкість обертання тіла пов'язана з швидкістю його поступального руху співвідношенням:

$$\omega = \frac{V}{R}, \quad (5)$$

де  $R$  – радіус тіла.

Рух тіла рівноприскорений, тому

$$V = at; \quad (6)$$

$$S = \frac{at^2}{2}, \quad (7)$$

де  $S$  – довжина похилої площини;

$t$  – час скочування тіла.

З формул (6) і (7) одержуємо:

$$V = \frac{2S}{t}. \quad (8)$$

Підставивши вирази (5) та (8) в (4), і розв'язавши рівняння відносно  $J$ , одержимо:

$$J = mR^2 \left( \frac{ght^2}{2S^2} - 1 \right). \quad (9)$$

Таким чином, визначення моменту інерції тіла кочення зводиться до вимірювання його маси, радіуса, висоти похилої площини, довжини шляху та часу скочування.

Але момент інерції тіл правильної форми можна розрахувати теоретично. Дійсно, момент інерції безмежно малого елемента з масою  $dm$  відносно осі виражається формулою:

$$J_i = r_i^2 dm, \quad (10)$$

де  $r_i$  – віддаль елемента до осі обертання.

Для знаходження моменту інерції тіла його розбивають на безмежно велике число безмежно малих елементів, вираховують момент інерції кожного елемента, потім момент інерції тіла визначають сумою

моментів інерції всіх його елементів. Ця операція зводиться до інтегрування:

$$J_z = \int_0^m r^2 dm. \quad (11)$$

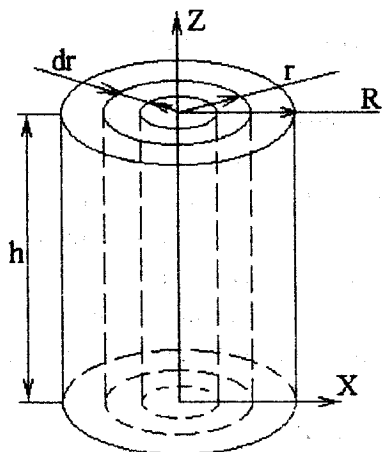


Рис.1

Вирахуємо момент інерції однорідного циліндра відносно осі Z, що проходить через центр маси тіла (рис.1). Для цього виділимо елемент об'єму циліндра в вигляді кільця завтовшки  $dr$ , його об'єм буде:

$$dV = 2\pi r dr h, \quad (12)$$

тоді:

$$dm = \rho dV = 2\pi r dr h\rho. \quad (13)$$

Значення  $dm$  з формули (13) підставляємо в формулу (11) та інтегруємо:

$$\begin{aligned} J_z &= \int_0^m r^2 dm = \int_0^R r^2 2\pi r dr h\rho = 2\pi h\rho \int_0^R r^3 dr = 2\pi h\rho \frac{1}{4} r^4 \Big|_0^R = \frac{1}{2} \pi h\rho R^4 = \\ &= \pi R^2 h\rho \frac{1}{2} R^2 = V\rho \frac{1}{2} R^2 = \frac{1}{2} mR^2, \end{aligned}$$

де  $m$  – маса тіла;

$R$  – радіус тіла.

Цим способом можна визначити момент інерції будь-якого іншого однорідного тіла правильної форми; результати для найбільш поширених тіл приводяться в таблиці 1.

Таблиця 1.

Тіло	Момент інерції
Однорідний циліндр	$\frac{mR^2}{2}$
Однорідна куля	$\frac{2}{5}mR^2$
Тонкостінний циліндр	$mR^2$
Диск з отвором	$\frac{m}{2}(R^2 + r^2)$

### Порядок виконання роботи

Лабораторну роботу виконують на установці, що являє собою похилу площину, висоту якої можна змінювати. Після ввімкнення установки в мережу досліджуване тіло утримується в верхній частині похилої площини з допомогою електромагніта. Після вимкнення живлення електромагніта тіло починає скочуватись і одночасно вмикається секундомір, який вмикається автоматично тілом, що скочується в кінці похилої площини. При виконанні роботи необхідно:

1. Спочатку виконати кілька тренувальних пусків тіла; добитися, щоб тіло при скочуванні не торкалось бортиків похилої площини; переконатись у справності секундоміра.
2. За вказівкою викладача для кожного з досліджуваних тіл (куля, циліндр та ін.) виконати 3-4 вимірювання часу скочування. Знайти середній час скочування кожного тіла.
3. Заміряти довжину похилої площини та її висоту.
4. Зважити досліджуване тіло та виконати необхідні вимірювання. Всі результати занести в таблицю 2.

Таблиця 2.

Тіло	t	m	h	S	R	r	J <sub>експ</sub>	J <sub>теор</sub>
Куля								
Циліндр								

### Обробка результатів експерименту та їх аналіз

1. За формулою (9) обчислити момент інерції досліджуваного тіла експериментальним способом.
2. За формулою з таблиці 1 для відповідного тіла обчислити момент інерції теоретично.
3. Результати експериментальні і теоретичні співставити між собою та зробити висновки.
4. Знайти абсолютну та відносну похибки експерименту.

### Контрольні запитання

1. Тверде тіло як система матеріальних точок, його момент інерції і кінетична енергія.

## Лабораторна робота 2.4

### Дослідження температурної залежності властивостей сегнетоелектриків та визначення точки Кюрі

*Мета роботи:* Вивчення залежності електричних властивостей сегнетоелектриків від температури і визначення точки Кюрі.

*Прилади і матеріали:* експериментальна установка, досліджуваний сегнетоелектрик.

## Теоретичні відомості

У даній роботі досліджується температурна залежність діелектричної проникливості сегнетоелектриків, оскільки вона грає важливу роль при їх технічному застосуванні.

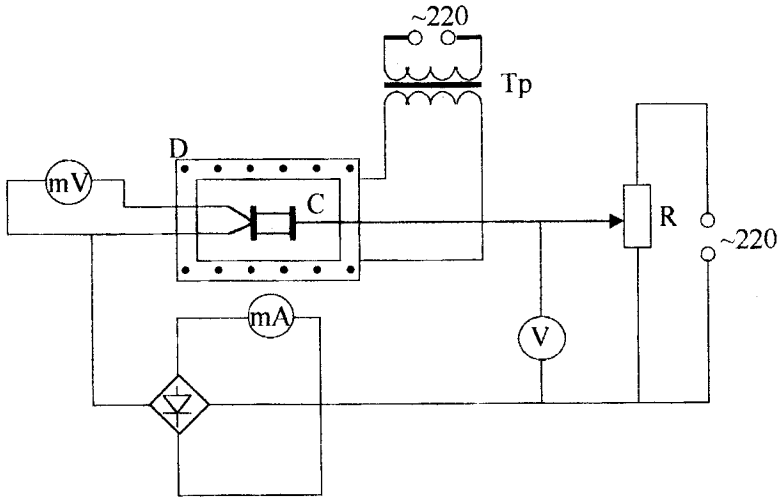


Рис.1

На рис.1 зображена електрична схема експериментальної установки для дослідження температурної залежності відносної діелектричної проникливості титанату барію, який є сегнетоелектриком в інтервалі температур від 5 до 120°C.

Розглянемо методику знаходження відносної діелектричної проникливості сегнетоелектрика та дослідження її температурної залежності за допомогою даної установки. Нехай при кімнатній температурі  $t^{\circ}$ , ефектне значення струму в колі при напрузі  $U$  буде  $I_1$ . При цьому мікроамперметр дасть значення  $I_{C1}$ . На основі закону Ома запишемо:



$$I_1 = \frac{U}{R_1}, \quad (2)$$

де  $R = \frac{1}{C_1 \omega}$  - ємнісний опір кола змінному струму з циклічною частотою  $\omega = 2\pi f$  ;  
 $f = 50$  Гц – частота струму міської мережі.

Електричну ємність знайдемо як ємність плоского конденсатора:

$$C_1 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0 S}{d}. \quad (3)$$

Враховуючи вирази для  $R_1$  і  $C_1$  із формули (2) знайдемо відносну діелектричну проникність сегнетоелектрика  $\epsilon_1$  при кімнатній температурі:

$$\epsilon_1 = \frac{I_1 d}{S \omega \epsilon_0 U} = \frac{1,11 \cdot I_{c1} d}{S \omega \epsilon_0 U}, \quad (4)$$

де  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  ф/м – електрична стала.

При підвищенні температури зразка його відносна діелектрична проникливість зміниться і набуде значення  $\epsilon$ , причому, як випливає з формули (4):

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_1} = \frac{I}{I_1} = \frac{I_c}{I_{c1}}, \quad (5)$$

тобто, надалі розрахунки та дослідження можна проводити, використовуючи тільки покази мікроамперметра середніх значень струму, не переводячи в ефективне.

### Порядок виконання роботи

1. При кімнатній температурі  $t$  ввімкнути коло конденсатора в мережу через потенціометр  $R$ . Встановити робочу напругу 100-120 В.
2. Записати значення напруги  $U$  і струму  $I_{c1}$ .

3. Ввімкнути електропічку D через трансформатор Tr в мережу.
4. Через кожні 5 поділок шкали мілівольметра (через 0,5 мВ при його ввімкненні на 15 мВ) записувати значення струму мікроамперметра до тих пір, поки його покази повільно зростають).
5. Коли значення струму почнуть спадати, покази мікроамперметра фіксувати через кожну поділку шкали мілівольметра.
6. При досягненні температури 140 °С, що відповідає 5,75 мВ, дослід припинити, пічку вимкнути і відкрити її верхню половину для охолодження.
7. Користуючись градууювальним графіком температури, перевести всі значення термоЕРС в градуси за шкалою Цельсія і скласти таблицю температур з відповідними їм значеннями струму.

### **Обробка результатів експерименту**

1. За формулою (4) обчислити відносну діелектричну проникливість  $\epsilon_1$  сегнетоелектрика при кімнатній температурі.
2. Користуючись співвідношенням (5) визначити відношення для всіх значень струму.
3. Побудувати температурну залежність  $\frac{\epsilon}{\epsilon_1} = f(t^\circ)$  і визначити точку Кюрі для даного сегнетоелектрика.
4. Знайти абсолютну та відносну похибки визначення відносної проникливості сегнетоелектрика, проаналізувати результати роботи та зробити висновки.

### **Контрольні запитання**

1. Які основні властивості і будова сегнетоелектриків?

2. Залежність діелектричної проникливості сегнетоелектриків від температури? Що таке точка Кюрі?
3. Приведіть приклади застосування сегнетоелектриків в техніці і, зокрема, в вашій майбутній спеціальності.

## Лабораторна робота 2.5

### Визначення електрорушної сили джерела струму

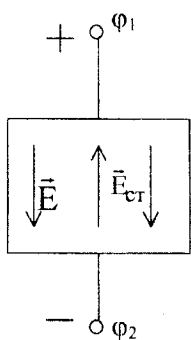
*Мета роботи:* набути навичок вимірювання електрорушної сили джерел струму компенсаційним методом.

*Прилади і обладнання:* джерело струму, реохорд, нормальний елемент, гальванометр, досліджуване джерело струму.

### Теоретичні відомості

При наявності замкнутого кола електричний струм існує лише до тих пір, поки між двома точками кола підтримується різниця потенціалів. Тому в замкненому колі поряд з ділянками, на яких додатні заряди рухаються в сторону зменшення потенціалу, повинні бути ділянки, на яких додатні заряди рухаються в зворотному напрямі, тобто відбувається зростання потенціалу.

Таким чином, для підтримання струму в колі необхідні сторонні сили, які діють по всьому колу, або на його окремих ділянках і які створюють додаткові електричні поля. Напруженість стороннього поля  $\vec{E}_{\text{ст}}$  вимірюється величиною сторонніх сил, які діють на одиничний додатний заряд



$$\vec{E}_{ст} = \frac{\vec{F}}{g}$$

Вектор напруженості стороннього поля  $\vec{E}_{ст}$  в середині джерела направлений проти вектора напруженості електростатичного поля  $\vec{E}$  (рис.1). При розімкненому зовнішньому колі електростатичне поле в середині джерела врівноважується стороннім полем.

Таким чином, джерело струму – це такий енергетичний агрегат, який концентрує від'ємні заряди на одній клемі, а додатні заряди на іншій. Ці заряди і створюють напругу на клемі розімкнутого джерела; вона чисельно дорівнює спаду напруги на внутрішньому опорі.

Сторонні сили виконують роботу по розділенню електричних зарядів. Відношення величини роботи, яку виконують сторонні сили при переміщенні одиничного додатного заряду вздовж замкнутого кола до величини цього заряду називають ЕРС і вимірюють у вольтах (В)

$$\varepsilon = \frac{A_{ст}}{q} \quad (2)$$

Якщо гальванічний елемент створює у колі струм, то в середині цього джерела відбувається хімічна реакція. Енергія хімічної реакції  $Q_x$  і є та енергія, яка звільняється в гальванічних елементах. У випадку замкнутого кола в ньому буде виконуватись робота струму  $A$ , яка перетворюється у тепло

$$A = Q = I^2 R t \quad (3)$$

При цьому слід враховувати, що електричні заряди ніде не нагромаджуються в колі, а значить, струм існує не лише в зовнішньому колі, а і в середині джерела. Гальванічний елемент являє собою для

струму деякій опір  $r$ , що називається внутрішнім, який складається з опору електроліта та електродів.

Використавши, до розглянутого кола, перший принцип термодинаміки (загальний закон збереження енергії), одержуємо:

$$Q_x = A + Q_T, \quad (4)$$

де  $Q_T$  – деяка кількість теплоти, яка необхідна для підтримання постійної температури джерела.

Тоді 
$$A = Q_x - Q_T.$$

Величина  $A$ , являє собою частину енергії  $Q_x$ , яку називають максимальною роботою хімічної реакції і яка пропорційна величині заряду, перенесеного по колу. Тому вважаючи  $\epsilon$  (2) максимальною роботою хімічної реакції (реакції), розрахованої на одиницю заряду, і, прирівнявши її до величини роботи струму (у зовнішньому колі і в середині джерела), одержимо:

$$\epsilon = I^2 R t + I^2 r t. \quad (5)$$

Цей вираз носить назву закону Ома для замкнутого кола.

Одержаний закон Ома (5) при розгляданні джерела струму в вигляді гальванічного елемента має загальне значення, тому що кожне джерело можна охарактеризувати його електрорушійною силою. Напруга на затискачах джерела струму відповідно формулі (5) дещо менша ЕРС джерела:

$$IR = \epsilon - Ir. \quad (6)$$

Однак при значних за величиною опорах зовнішнього кола порівняно з внутрішнім опором джерела спад напруги в середині джерела незначний і напруга в середині джерела наближається до ЕРС, тобто, якщо  $R \gg r$  (коло розімкнене), то  $E \approx U$ ; електрорушійна сила рівна напрузі на клемі розімкнутого джерела. Такий метод вимірювання ЕРС вважається досить наближеним.

Широкого розповсюдження набув компенсаційний метод вимірювання ЕРС. Цей метод досить простий, дає добру точність і реалізується в різноманітних типах потенціометрів.

Принципальна схема методу подана на рис.3.

Основна ідея методу полягає у тому, що вимірювана ЕРС зрівноважується (компенсується) спадом напруги на ділянці кола ВС так, що гальванометр показує відсутність струму в колі з невідомою ЕРС.

Запишемо рівняння Кірхгофа для схеми на рис.3, скориставшись позначеннями вказаними на схемі:

$$I = I_1 + I_2$$

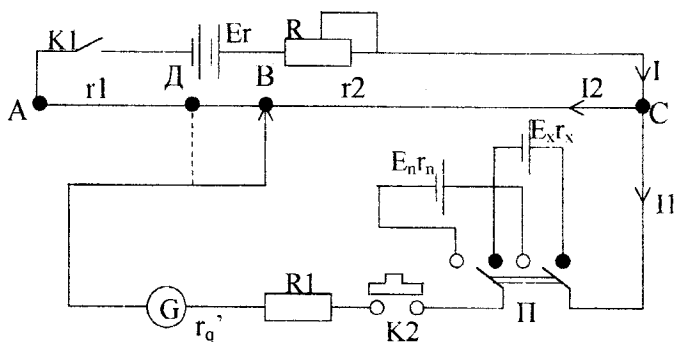


Рис.3

$$-\varepsilon = I_1 r_x + I_1 r_g + I_1 R_1 - I_2 r_2 \quad (7)$$

$$\varepsilon = I r + I R + I_1 r_1 - I_2 r_2$$

Змінюючи опір  $r_2$ , можна досягти того, що струм  $I_1$  в вибраній ділянці кола буде дорівнювати нулю. При цьому

$$U_{BC} = I_2 R_2 = \varepsilon_x \quad (8)$$

Із співвідношення (8) видно, що регулювання компенсаційного спаду напруги  $U_{BC} = I_2 R_2$  можливе у двох випадках: при зміні струму

$I_2$ , або зміні опору  $r_2$ . Перевагу в компенсаційних установках отримав другий випадок. При цьому в процесі вимірювань, струм, названий робочим струмом, підтримується постійним. Із формули (8) також видно, що точність методу залежить від точності установки робочого струму. Для даного методу велике значення має плавність регулювання опору  $r_2$ , якість і стабільність всіх опорів.

Якщо в цю схему замість досліджуваного джерела  $\epsilon_x$  струму включити джерело  $\epsilon_n$  з відомою ЕРС, то з допомогою тих же міркувань можна отримати:

$$U_{DC} = I_2 r_2' = \epsilon_n, \quad (9)$$

де  $r_2'$  – опір ділянки кола (реорхорда ДС).

Розділивши (8) на рівняння (9), отримаємо формулу за якою можна визначити ЕРС:

$$\omega_x = \epsilon_n \frac{r_2}{r_2'}. \quad (10)$$

Величина ЕРС нормального елемента  $\epsilon_n$  відома із точністю  $10^5$  В. Опори ділянок реорхорда  $r_2$  і  $r_2'$  можна замінити на довжини ділянок каліброваного дроту відповідно  $\ell_1=r_{BC}$  і  $\ell_2=r_{1X}$ . Тому робоча формула набуде вигляду:

$$\epsilon_x = \epsilon_n \frac{\ell_1}{\ell_2}. \quad (11)$$

Слід мати на увазі, що гальванометр реєструє відсутність струму, а не вимірює його, тому реєстрація факту компенсації не залежить від класу приладу, а залежить тільки від його чутливості.

## Хід роботи

1. Скласти схему згідно рис.3, при цьому слід чітко зберегти правильну полярність при підключенні всіх ЕРС.
2. Перемикачем П ввімкнути в схему невідоме джерело  $\epsilon_x$ .
3. Добитись компенсації напруги  $U_{BC}$  і ЕРС невідомого елемента. Записати результати вимірювань.
4. Перемикачем П включити в схему нормальний елемент  $\epsilon_n$ .
5. За допомогою повзунка реорхорда добитись відсутності струму через гальванометр.
6. Записати результати вимірювань.
7. За допомогою формули (11) розрахувати величину невідомої ЕРС.

## Контрольні запитання

1. Що таке ЕРС джерела?
2. Закон Ома для замкнутого кола.
3. Якими методами можна виміряти ЕРС?
4. В чому суть компенсаційного методу вимірювання ЕРС?
5. ЕРС якої із батарей  $\epsilon$ ,  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_n$  повинна бути найбільшою? Чому?

## Лабораторна робота 2.6

### Вимірювання електричних опорів і вивчення залежності опору металу від температури

*Мета роботи:* навчитись вимірювати опори за допомогою місткових схем; вивчити залежність опору металів від температури.



*Прилади та матеріали:* набір вимірювальних резисторів; магазин еталонних резисторів; джерело постійного струму; універсальний міст типу МВУ-49; термостат і термометр; з'єднувальні проводи.

### Теоретичні відомості

Для більшості металів при температурах, близьких до кімнатних, питомий опір змінюється пропорційно абсолютній температурі  $T$ :

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha T). \quad (1)$$

При низьких температурах спостерігається відхід від цієї залежності (рис. 1), пояснення якої дасться квантовою механікою.

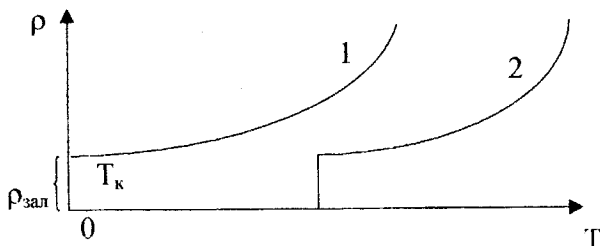


Рис. 1.

У більшості випадків залежність  $\rho$  від  $T$  зображається графіком 1 на рис. 1. Величина залишкового опору  $\rho_{\text{зал}}$  в великій мірі залежить від чистоти матеріалу і залишкових механічних напружень у зразку. Тому після відпалювання  $\rho_{\text{зал}}$  значно зменшується. У абсолютно чистого металу з ідеально правильною кристалічною ґраткою при абсолютному нулі  $\rho=0$ .

Із формули (1) випливає, що температурний коефіцієнт опору:

$$\alpha = \frac{\rho_t - \rho_0}{\rho_0 t^0} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0 t^0}. \quad (2)$$

Він вказує на відносний приріст питомого опору при збільшенні температури на один градус.

Вимірювання опору резисторів має широке практичне значення.

Скориставшись законом Ома для ділянки кола, можна виміряти невідомий опір  $R_x$  за допомогою вольтметра і амперметра згідно схем на рис.2 і рис.3.

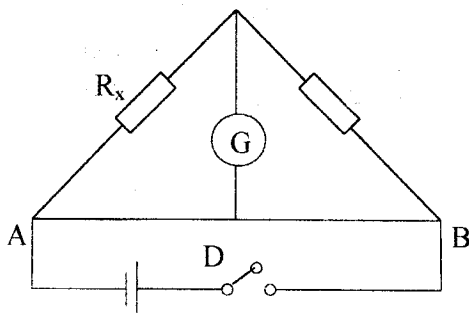


Рис 2.

Вимірювання середніх опорів  $R_x$  з високим ступенем точності можна виконати мостовим методом за допомогою містка Уїтстона.

На рис.2 відношення плечей виконане у вигляді реорхорда з повзунком.

Умові рівноваги такого містка відповідає співвідношення:

$$\frac{R_x}{R} = \frac{r_{AB}}{r_{DB}},$$

яке може бути одержане на основі другого закону Кірхгофа.

Оскільки опори ділянок AD і DB пропорційні їх довжинам  $\ell_1$  і  $\ell_2$ ,

то

$$R_x = \frac{R\ell_1}{\ell_2}.$$

Недоліком місткової схеми є неможливість врахувати опори з'єднувальних елементів схеми, що виключає можливість вимірювання малих опорів.

Для технічного вимірювання опорів можна скористатись універсальними містками постійного струму типу МВУ-49, схема якого в принципі не відрізняється від схеми лінійного містка Уїтстона (рис.3).

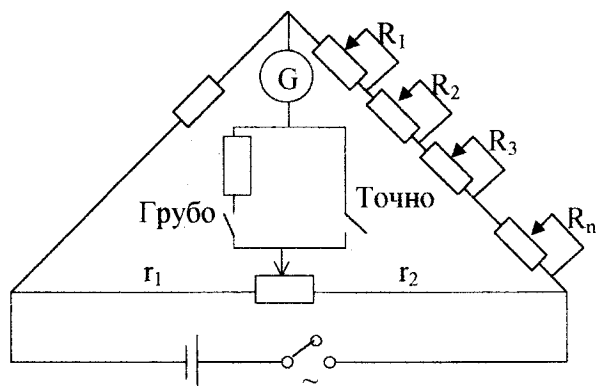


Рис.3

В цій схемі плечем порівняння служить магазин опорів, набраний з резисторів  $R_1 \div R_n$ . Відношення плеч визначається за формулою

$$N = \frac{r_1}{r_2}$$

Вимірювальний опір резистора  $R_x$  визначається на основі рівноваги моста:

$$R_x = R \frac{r_1}{r_2} = NR,$$

де  $N$  – множник, який відповідає положенню рукоятки перемикача “помножити”,

$R$  – опір плеча порівняння в Ом (покази магазину).

Опір  $R_3$  є захисним при ввімкненні гальванометра в схему і відповідає включеному положенню кнопки “грубо”.

### Хід роботи

1. Скласти схему (рис.2).
2. Встановити повзунок на середину реорхорда.
3. Підібрати на магазині опорів такий опір, при якому струм через гальванометр дорівнював би нулю ( $R_x \approx R$ ).
4. Виміряти  $\ell_1$  і  $\ell_2$  – плечі реорхорда в одиницях шкали реорхорда.
5. Повторити аналогічні вимірювання послідовно для всіх резисторів  $R_i$ .
6. З'єднати резистори паралельно і виміряти їх загальний опір. Зробити перевірку вимірювання за допомогою аналітичних розрахунків.
7. З'єднати всі резистори послідовно і виміряти їх загальний опір. Зробити перевірку вимірювання за допомогою аналітичних розрахунків.
8. Скласти таблицю і занести в неї всі результати вимірювань та проведених обчислень. Зробити відповідні узагальнення отриманих результатів.
9. З'єднати провідниками резистор з мідного дроту, розміщений в термостаті з мостом постійного струму типу МВУ.
10. Виміряти опір досліджуваної котушки при кімнатній температурі.
11. Ввімкнути нагрівач термостата і провести вимірювання опору досліджуваної котушки через  $5\text{ }^\circ\text{C}$  до температури  $80\text{--}90\text{ }^\circ\text{C}$ .
12. Скласти таблицю і занести в неї всі отримані результати.

## Обробка отриманих експериментальних результатів та їх аналіз

1. Використовуючи дані таблиці 2, побудувати графік залежності  $R_t = f(t^0)$ , відкладаючи по осі X значення температури від  $0\text{ }^\circ\text{C}$ , а по осі Y значення  $R_t$ .
2. З графіка визначити значення  $R_0$  продовжуючи отриману криву до перетину з віссю  $R_t$ .
3. Розрахувати значення  $\alpha$  за формулою (3), скориставшись даними графіка. Отриманий результат порівняти з табличним значенням температурного коефіцієнта опору для міді.

### Контрольні запитання

1. Постійний електричний струм, умови існування. Закон Ома в інтегральній і диференціальній формах.
2. Вираз для питомої електричної провідності металу із класичної електронної теорії. Закон Відемана-Франца.
3. Методи вимірювання електричних опорів. Області їх застосування, переваги, недоліки, можливості.

## Лабораторна робота 2.7

### Вивчення законів постійного струму

*Мета роботи:* перевірка закону Ома для неоднорідної ділянки кола.

*Прилади та обладнання:* джерело струму на 6 В, два джерела на 1,5 В, вольтметр, амперметр, реостати.

## Теоретичні відомості

Електричний струм – упорядкований рух електричних зарядів. У металах – це рух електронів проти поля, в електролітах – іонів різних знаків у протилежних напрямках, у напівпровідників – електронів і дірок. Для збудження електричного струму у тілах потрібно створити електричне поле. Щоб струм був тривалим, енергія поля повинна підтримуватись сталою. Це здійснюється за допомогою джерела струму.

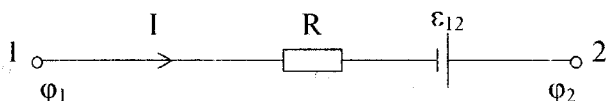


Рис.1

Закон Ома у формі  $U=IR$  справджується лише для однорідної ділянки кола, тобто такої, на якій немає стрибків потенціалів за рахунок контактних явищ, або дії електрорушійних сил.

Розглянемо однорідну ділянку кола 1-2 (рис.1), на кінцях якої діє різниця потенціалів  $\varphi_1-\varphi_2$ . ЕРС, що діє на даній неоднорідній ділянці кола, позначимо через  $\epsilon_{1,2}$ . Знайдемо напрям струму ( $\varphi_1>\varphi_2$ ). Тоді  $\epsilon_{1,2}>0$ , якщо вона діє в напрямі струму (позначено стрілкою). Скористаємося законом збереження і перетворення енергії. Оскільки провідники нерухомі, то робота  $dA$  електростатичних і сторонніх сил, яка виконується по переміщенню заряду  $dq$  на ділянці 1-2, дорівнює кількості тепла  $dQ$ , яке виділилось за час проходження заряду  $dq$ .

Тому можна записати:

$$dA = \epsilon_{1,2}dq + (\varphi_1 - \varphi_2)dq$$

$$dQ = I^2Rdt = IRdt.$$

Приврівнявши праві частини цих рівнянь, будемо мати:

$$IR = (\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{1,2},$$

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \varepsilon_{1,2}}{R}. \quad (1)$$

Це закон Ома для неоднорідної ділянки кола.

Якщо неоднорідна частина кола складається з кількох ділянок, то формулу (1) можна узагальнити на будь-яке число ділянок:

$$I \sum_{i=1}^n R_i = \varphi_1 - \varphi_2 + \sum_{i=1}^n \varepsilon_i, \quad (2)$$

де  $\sum_{i=1}^n R_i$  - загальний опір всієї ділянки кола;

$\sum_{i=1}^n \varepsilon_i$  - алгебраїчна сума ЕРС, що діють на цій ділянці.

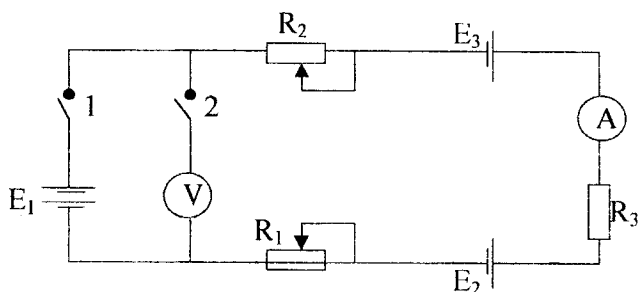


Рис.2

### Хід роботи

1. Скласти електричне коло за схемою, показаною на рис.2.
2. Замкнути вимикач 1, потім 2. Резисторами  $R_1$  і  $R_2$  добитися значення сили струму 0,3 А.

3. Виміряти значення  $I$ ,  $U_{AB}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  і  $R_3$ . Результати вимірювань занести до таблиці, яку слід намалювати самостійно.
4. Обчислити величини, які входять до лівої та правої частини рівняння (2):

$$X = I(R_1 + R_2 + R_3),$$

$$Y = U_{AB} + \varepsilon_1 + \varepsilon_2.$$

При цьому слід враховувати знаки  $\varepsilon_1$  і  $\varepsilon_2$ .

5. Зміною опорів  $R_1$ ,  $R_2$  і  $R_3$  підібрати у колі струми 0,35 А; 0,4 А; 0,45 А та провести необхідні обчислення, згідно з пунктами 3,4.
6. Обчислити похибки вимірювань за класом точності вимірювальних приладів та перетворити рівність (2). Зробити відповідні висновки.

### Контрольні запитання

1. За яких умов при перевірці закону Ома для неоднорідної ділянки кола можна знехтувати внутрішнім опором амперметра?
2. Чому можна нехтувати внутрішніми опорами джерел струму?
3. Вказати межі застосування закону Ома.

## Лабораторна робота 3.1

### Визначення індукції магнітного поля за допомогою балістичного гальванометра

*Мета роботи:* засвоєння навичок вимірювання індукції магнітного поля і дослідження залежності індукції поля від форми полюсів магніту.



*Прилади та матеріали:* електромагніт, балістичний гальванометр, вимірювальна котушка, реостат, джерело постійного струму, двополюсний перемикач.

### Теоретичні відомості

На провідник із струмом в магнітному полі діє сила Ампера:

$$d\vec{F} = i[d\vec{\ell} \cdot \vec{B}]. \quad (1)$$

Вектор  $\vec{B}$  називається магнітною індукцією і є основною характеристикою магнітного поля. Закон Ампера дозволяє визначити числове значення магнітної індукції  $\vec{B}$ . Якщо елемент струму  $i d\vec{\ell}$  перпендикулярний до  $\vec{B}$ , то формулу (1) можна записати у вигляді:

$$B = \frac{1}{i} \frac{dF}{d\ell}. \quad (2)$$

Однією з основних величин, що використовується в електромагнетизмі, є магнітний потік. Поток вектора магнітної індукції, називається величина, рівна добутку площі цієї поверхні і проекції  $B_n$  вектора  $\vec{B}$  на напрям нормалі  $\vec{n}$  до поверхні (рис.1).

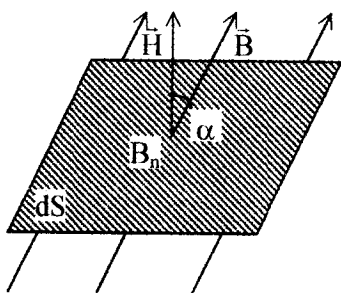


Рис.1.

$$d\Phi = B_n dS = B_{dS} \cos(\vec{B}, \vec{n}) = \vec{B} d\vec{S}, \quad (3)$$

де  $\Phi$  – магнітний потік через довільну поверхню  $S$ ;

$\vec{n}$  – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні площею  $dS$ . Інтегруючи цей вираз по  $S$ , дістанемо:

$$\Phi = \int B_n dS = \int \vec{B} d\vec{S}. \quad (4)$$

## Теорія методу

Розглянемо коло, складене з гальванометра та вимірювальної котушки (ВК), поміщеної в поле електромагніта (рис.2).

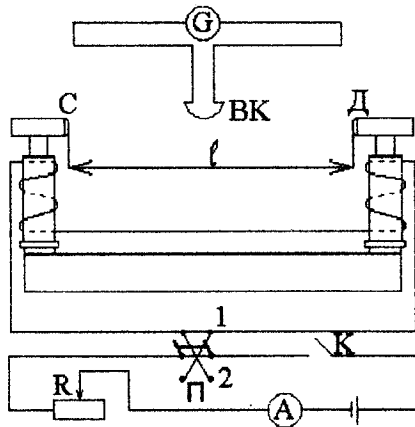


Рис.2.

Відомо, що

$$B = \mu\mu_0 H. \quad (6)$$

Враховуючи, що для повітряного проміжку  $\mu=1$ , підставляємо в (6) значення  $H$  з (3.4). Отримаємо робочу формулу

$$B = \frac{(R_\ell + R_g) B_n}{2NS}. \quad (7)$$

### Послідовність виконання роботи

#### Завдання 1

1. Зібрати схему згідно рис.2.

2. Виставити вимірювальну котушку по центру повітряного проміжку.
3. Довжину проміжку  $l$  зробити рівною 20 мм.
4. За допомогою реостата  $R$  підібрати такий струм, щоб при перемиканні ключа  $\Pi$ , покази гальванометра  $G$  були максимальними. Записати покази  $n$  гальванометра та координати  $X$  котушки.
5. Виставити проміжок  $l=30$  см. Повторити вимірювання, переміщуючи котушку до центру проміжку.

### Завдання 2

1. Перемістити вимірювальну котушку до центру повітряного проміжку.
2. Довжину проміжку  $l$  зробити рівною 20 мм. При цьому котушка повинна залишатись у центрі проміжку.
3. Записати покази амперметра. Перемикачем  $\Pi$  поміняти напрям струму в намагнічуваній котушці і зняти покази “зайчика” гальванометра.
4. За допомогою реостата  $R$ , зменшити струм на 0,05-0,1 А. Записати отримані значення струму. Перевести перемикач  $\Pi$  з положення 1 в положення 2 і записати максимальні покази гальванометра.
5. Зменшувати з вказаним кроком (0,05; 0,1 А) струм до 0. Кожен раз перемикачем  $\Pi$  змінювати його напрям, записати значення струму та відповідні їм покази гальванометра.

## **Обробка результатів експерименту та їх аналіз**

### Завдання 1

1. По (7) обчислити магнітну індукцію  $\vec{B}$  для всіх експериментальних значень  $n$ . Значення  $R$ ,  $N$ ,  $S$  та  $R_g$  знаходяться на відповідних елементах схеми.
2. В одній і тій самій системі координат побудувати графік  $B = f(x)$  для проміжку  $l_0=20$  мм та  $l_0=50$  мм (за вісь  $X$  вибрана пряма, що

проходить через центр вимірювальної котушки та паралельна осі гвинта).

### **Контрольні запитання**

1. Фізичний зміст магнітної індукції?
2. Як знаходять магнітний потік через задану поверхню?
3. Чому при збільшенні довжини повітряного зазору зменшується магнітна індукція?
4. В чому полягає суть балістичного методу вимірювання магнітної індукції?

### **Лабораторна робота 3.3**

#### **Визначення питомого заряду електрона методом магнітного фокусування**

*Мета роботи:* визначити питомий заряд електрона за допомогою магнітного фокусування розбіжного електронного пучка.

*Прилади та матеріали:* електронно-променева трубка з блоком живлення; джерело постійного та змінного струмів; реостат; амперметр; вольтметр.

#### **Теоретичні відомості**

У даній лабораторній роботі використовується метод фокусування пучка електронів повздовжнім магнітним полем. Принципова схема установки показана на рис. 1.

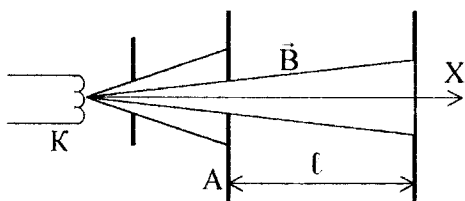


Рис.1

Електрони, які вилетіли з нагрітого катоду К, прискорюються електричним полем, створеним між катодом і анодом А, входять через малий отвір в аноді розбіжним променем і, потрапивши на флюорисцентний екран D, створюють світлу пляму.

Якщо у просторі між анодом і екраном D створити магнітне поле з індукцією  $B$ , направленою вздовж осі  $X$ , то на електрон, який рухається в полі з швидкістю  $V$ , буде діяти сила Лоренца;

$$\vec{F} = e[\vec{V} \times \vec{B}] \quad (1)$$

Сила  $\vec{F}$  перпендикулярна як до напрямку магнітного поля, так і до напрямку руху електрона. Для електрона  $e < 0$ , тому сила буде направлена так, як показано на рис 2.

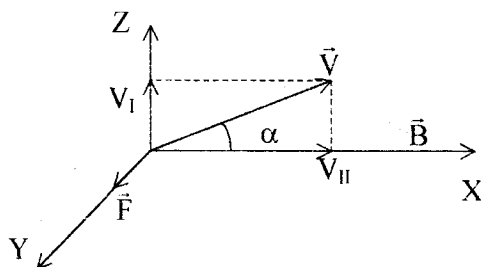


Рис.2

Визначимо крок гвинтової лінії  $\zeta$ . За другим законом Ньютона:

$$F = ma$$

А з врахуванням виразів

$$V_1 = V \sin \alpha, \quad V_2 = V \cos \alpha \quad (2)$$

$$F = eVB \sin \alpha = \ell V_1 B \quad (3)$$

і того, що  $a = \frac{V_1^2}{R}$ , одержимо  $eBV_1 = m \frac{V_1^2}{R}$ . З останнього виразу знаходимо радіус кола:

$$R = \frac{V_1}{\frac{e}{m} B} \quad (4)$$

Очевидно час одного оберту:

$$T = \frac{2\pi R}{V_1} \quad (5)$$

З формули (4) і (5) випливає:

$$T = \frac{2\pi}{\frac{e}{m} B} \quad (6)$$

За час одного оберту електрон, рухаючись рівномірно вздовж осі X, пройде шлях, рівний кроку гвинтової лінії (рис.3).

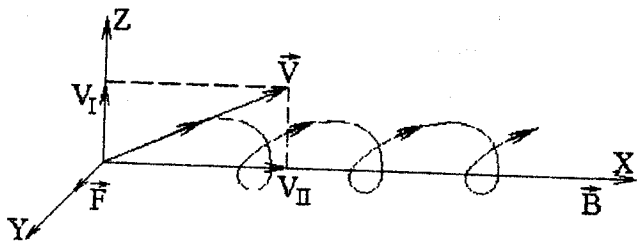


Рис.3

$$l = V_{II} T \quad (7)$$

З формул (2), (6) і (7) випливає:

$$l = \frac{2\pi V \cos \alpha}{\frac{e}{m} B} \quad (8)$$

Оскільки в будь-якому випадку кут надзвичайно малий, то  $\cos\alpha \approx 1$ , а вираз (8) переписеться:

$$\ell = \frac{2\pi V}{\frac{e}{m} B} \quad (9)$$

Це означає, що всі електрони, які вилетіли з отвору в аноді А з однаковою швидкістю за час  $T$  в площині  $ZOY$  описують повні кола і переміщуються вздовж осі  $X$  на віддаль  $\ell$ , тобто зберуться в одній точці.

### Теорія методу

Для вимірювання величини  $\frac{e}{m}$  використовується установка, схема якої показана на рис. 4. Основна частина установки – електронно-променева трубка.

Електрони, що вилітають з нагрітого катода  $K$ , проходять через фокусуючий електрод  $\epsilon$ , а потім отвір в аноді  $A$  і рухаються далі з постійною за величиною швидкістю, значення якої визначається напругою прискорення  $U$ . Потім пучок електронів потрапляє в змінне електричне поле відхилювальних пластин  $C$ , направлене перпендикулярно до осі променів. Після конденсатора електрони попадають на екран трубки, покритий флюорисцентною речовиною ( $ZnS$ ). Точки екрана, на які попадають електрони, світяться, оскільки при цьому атоми флюорисцентної речовини збуджуються, і на екрані створюється світла смуга. Щоб кут  $\alpha$  був достатньо малий, довжина світлої смужки на екрані не повинна перевищувати 1,5-2 см.

Електронно-променева трубка вставлена в середину соленоїда, що створює вздовж нього магнітне поле напруженістю  $\vec{H}$ , паралельне осі  $OX$ :

$$H = nI,$$

де  $I$  – струм у соленоїді;

$n$  – число витків на одиницю довжини соленоїда.

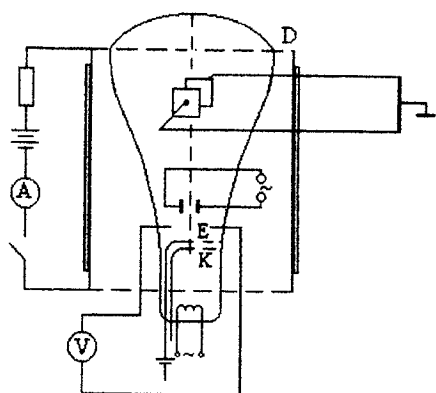


Рис. 4

Тоді  $\ell$  буде дорівнювати віддалі між відхиляючими пластинами С і екраном D і залишиться постійною величиною для даної трубки.

Таким чином, потрібний нам вираз, з урахуванням (10) набуває вигляду:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U}{\mu_0 n^2 I^2 \ell^2} \quad (11)$$

### Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему згідно з рис.4. Після перевірки схеми лаборантом, або викладачем, ввімкнути її до мережі напругою 220 В.
2. Ввімкнути джерело живлення електронно-променевої трубки. На екрані з'явиться світна смужка. Вертикальні відхилювальні пластини в цьому випадку повинні бути заземлені.
3. Замкнути ключ і підібрати за допомогою реостата такий струм в соленоїді, щоб світна смужка на екрані була зведена в точку.
4. Зняти покази амперметра і вольтметра.



## Обробка результатів експерименту і їх аналіз

1. Розрахувати питомий заряд електрона за формулою (11). Значення  $n$  і  $\ell$  вказані на панелі установки.

Порівняти отриманий результат  $\frac{e}{m}$  з табличним значенням і пояснити можливі причини розходження цих результатів.

### Лабораторна робота 3.4

#### Вивчення напруженості магнітного поля на осі соленоїда

*Мета роботи:* набути навиків вимірювання напруженості магнітного поля в різних точках вздовж осі соленоїда.

*Прилади та матеріали:* соленоїд з вимірювальною котушкою; балістичний гальванометр; амперметр; реостат; вимикач.

#### Теоретичні відомості

Напруженість магнітного поля на осі соленоїда в загальному випадку визначається формулою

$$H = \frac{In}{2} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2), \quad (1)$$

де  $I$  – струм, що проходить по обмотці соленоїда;

$n$  – кількість витків на одиницю довжини соленоїда;

$\varphi_1$  та  $\varphi_2$  – кути під якими з точки спостереження видно радіуси поблизу кінців соленоїда (рис. 1).

Коли діаметр і довжина соленоїда сумірні, то такий соленоїд називається коротким. Для короткого соленоїда напруженість  $\vec{H}$  магнітного поля максимальна на осі соленоїда. В решті точок величина  $\vec{H}$  менша.

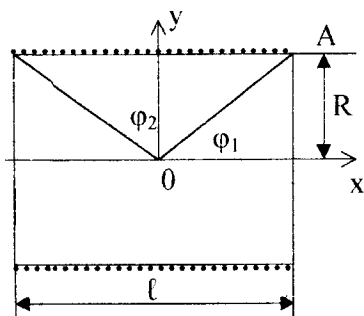


Рис.1

Для довгого соленоїда  $H$  (коли  $R \gg l$ )  $\varphi_1 \rightarrow 0$ ,  $\varphi_2 \rightarrow \pi$  і магнітне поле буде однорідним. Обчислимо напруженість магнітного поля для будь-якої точки на осі соленоїда.

З рис.1 видно, що

$$\cos \varphi_1 = \frac{l}{2 \cdot OA} = \frac{l}{\sqrt{l^2 + 4R^2}} \quad (2)$$

$$\cos \varphi_2 = -\frac{l}{\sqrt{l^2 + 4R^2}} \quad (3)$$

Тоді

$$H = I \cdot n \frac{l}{\sqrt{l^2 + 4R^2}} \quad (4)$$

Величина  $n \cdot l = N$  – повне число витків. Отже,

$$H = \frac{IN}{\sqrt{l^2 + 4R^2}} \quad (5)$$

поле багат шарового соленоїда якісно має той самий характер, що і поле одношарового.

У даній роботі напруженість магнітного поля визначається за

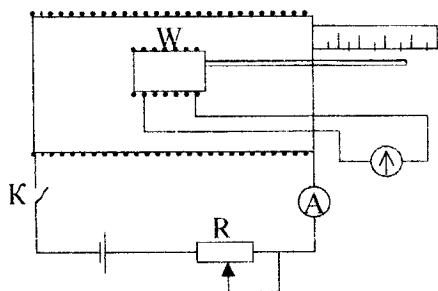


Рис.2

допомогою балістичного гальванометра. Схему установки приведено на рис.2.

Балістичний гальванометр приєднується до вимірювальної котушки W. При замиканні вимикача K напруженість магнітного поля на осі соленоїда зростає

від 0 до значення  $H$ .

Магнітний потік, який пронизує при цьому вимірювальну котушку,

$$\Phi = \mu\mu_0 H S N_1, \quad (6)$$

де  $S$  і  $N_1$  – площа поперечного перерізу і число витків вимірювальної котушки.

У колі котушки  $W$  виникає короточасний індукційний струм і рамка гальванометра відхиляється на деякий кут  $\beta$ . Зміщення світлового “зайчика” відраховується по шкалі гальванометра.

Кількість електрики  $q$ , що пройде через гальванометр,

$$q = \frac{\Phi}{R_K}, \quad (7)$$

де  $R_K$  – опір кола гальванометра, Ом. (Складається з опору котушки і опору гальванометра)  $R_K = R + R_g$

$$q = \frac{\mu\mu_0 H S N_1}{(R + R_g)} \quad (8)$$

З другого боку, кількість електрики  $q$  пропорційна величині зміщення покажчика балістичного гальванометра від положення рівноваги  $\alpha$ :

$$q = C_q d, \quad (9)$$

де  $C_q$  – стала балістичного гальванометра (рівна ціні однієї поділки шкали балістичного гальванометра).

З формул (8) і (9) маємо:

$$H = C_g \frac{(R + R_g) \alpha}{S N_1 \mu\mu_0}. \quad (10)$$

Величини  $S$ ,  $N$ ,  $R$ ,  $R_g$ ,  $C_q$  залишаються сталими при всіх вимірюваннях, тому введемо позначення:

$$C' = C_g \frac{(R_k + R_g)}{S N_1 \mu\mu_0} \quad (11)$$

тоді

$$C' = \frac{H}{\alpha}, \quad (12)$$

де  $C'$  – балістична стала установки.

Після визначення сталої  $C'$  установки можна визначити напруженість магнітного поля в будь-якій точці, розміщеній на осі соленоїда.

$$H_x = C' dx, \quad (13)$$

де індекс  $x$  означає координату на осі соленоїда.

### Порядок виконання роботи

1. Скласти схему згідно рис.2.
2. Розмістити вимірювальну котушку  $W$  на осі соленоїда, в точці що відповідає координаті  $x=0$ , та встановити реостатом струм у колі соленоїда 1,0-1,5 А. (За точку відліку прийняти точку центра соленоїда).
3. Розрахувати напруженість магнітного поля на осі соленоїда (центр соленоїда) за формулою (5).
4. Визначити  $\alpha$  в момент замикання та розмикання і взяти середнє значення.
5. Користуючись формулою (11), визначити сталу  $C'$ .
6. Повторити вимірювання зазначені в пп. 4,5, не менше як три рази та розрахувати середнє значення.
7. Провести вимірювання в точках соленоїда, розташованих одна від одної на відстані 1 см від точки  $x=0$  і до точки, яка співпадає з кінцем соленоїда.
8. Записати в таблицю для кожної точки значення  $dx$  та за формулою (13) розрахувати напруженість магнітного поля в цих точках. Побудувати графік залежності  $H_x$  від  $x$ . Початок координат сумістити з центром соленоїда.

## Контрольні запитання

1. Сформулюйте закон Біо-Савара-Лапласа.
2. Виведіть формулу для  $H$  на осі колового витка і на осі соленоїда.

## Лабораторна робота 3.6

### Вивчення явища взаємної індукції

*Мета роботи:* Дослідження явища взаємної індукції двох коаксіально розміщених котушок.

*Прилади та матеріали:* звуковий генератор; осцилограф; дві коаксіальні котушки індуктивності; стержень з шкалою.

### Теоретичні відомості

Розглянемо два контури 1 і 2, які розміщені на деякій відстані один від одного (рис.1). Якщо по контуру 1 пропустити струм  $I_1$ , то він створить потік магнітної індукції через контур 2, який буде пропорційний струму  $I_1$

$$\Phi_{2,1} = M_{2,1}I_1 \quad (1)$$

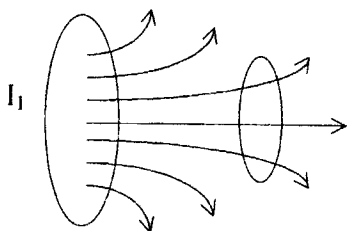


Рис.1

Коефіцієнт пропорційності  $M_{2,1}$  – називається коефіцієнтом взаємної індукції контурів. Він залежить від форми кривої і взаємного розміщення контурів 1 і 2, а також від магнітних властивостей навколишнього середовища. При зміні струму у першому контурі магнітний потік через другий контур змінюється, а це значить в ньому наводиться ЕРС взаємної індуктивності:

$$\varepsilon_2 = -\frac{d\Phi_{2,1}}{dt} = -M_{2,1} \frac{dI_1}{dt}. \quad (2)$$

Формула (2) справедлива при відсутності феромагнетиків.

Якщо номіняти місцями контури 1 і 2 та провести всі попередні міркування, то одержимо

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\Phi_{1,2}}{dt} = -M_{1,2} \frac{dI_1}{dt}. \quad (3)$$

Можна показати, що коефіцієнт взаємної індукції

$$M_{1,2} = M_{2,1}. \quad (4)$$

У даній роботі вимірюється коефіцієнт взаємної індукції між довгою котушкою 1 і короткою 2, яка надягається на котушку 1 і може переміщуватись вздовж її осі. Живлення однієї з котушок, наприклад 1, здійснюється від генератора звукової частоти ЗГ, напруга якого

$$U = U_0 \cos \omega t \quad (5)$$

подається через опір  $R$ . Вольтметр, розміщений на панелі вимірює діюче значення напруги  $U_g = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$ .  $R$  вибираються таким чином, щоб виконувалась нерівність

$$R \gg \sqrt{R_1^2 + L_1^2 \omega^2}, \quad (6)$$

де  $L_1$  – індуктивність котушки 1;

$R_1$  – її активний опір.

У цьому випадку струм, який протікає через котушку 1 створює змінну ЕРС взаємної індукції в котушці 2:

$$\varepsilon_2 = -M_{2,1} \frac{dI_1}{dt} = M_{2,1} \frac{U_0}{R} \omega \sin \omega t. \quad (7)$$

Змінний струм у котушці 1 створює змінну ЕРС взаємної індукції в котушці 2:

$$\varepsilon_2 = -M_{2,1} \frac{dI_1}{dt} = M_{2,1} \frac{U_0}{R} \omega \sin \omega t. \quad (8)$$

Для вимірювання  $\varepsilon_2$  використовується осцилограф. Амплітуда ЕРС взаємної індукції:

$$\varepsilon_{0,2} = M_{2,1} \frac{U_0}{R} \omega = M_{2,1} \frac{U_0}{R} 2\pi f, \quad (9)$$

де  $f$  – частота звукового генератора.

Із співвідношення (9) маємо

$$M_{2,1} = \varepsilon_{0,2} \frac{R}{2\pi f U_0}. \quad (10)$$

Якщо поміняти місцями котушки 1 і 2, то можна виміряти

$$M_{1,2} = \varepsilon_{0,1} \frac{R}{2\pi f U_0}. \quad (11)$$

Для перестановки котушок слід перемикачі  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$  перевести в протилежні положення (рис.2).

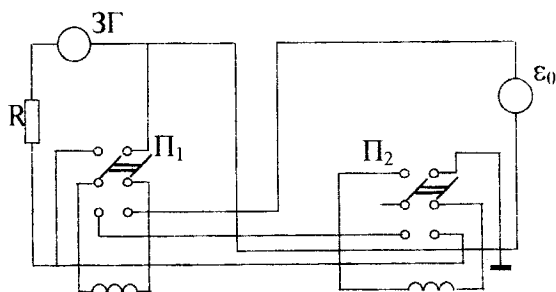


Рис.2

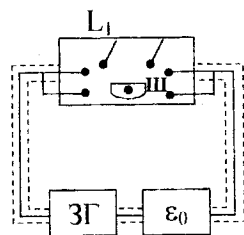


Рис.3

### Порядок виконання роботи

**Завдання 1:** Вимірювання коефіцієнтів взаємної індукції  $M_{2,1}$  і  $M_{1,2}$  і дослідження їх залежності від взаємного розміщення котушок.

1. Зібрати схему показану на рис.2 і рис.3.
2. Ознайомитись з роботою електронного осцилографа та звукового генератора.
3. Задати напругу  $U_0$  і частоту  $f$  сигналу генератора (за вказівкою викладача), подати напругу на котушку 1 (за допомогою

перемикача  $\Pi_1$ ), в ЕРС котушки 2 на осцилограф (за допомогою перемикача  $\Pi_2$ ).

4. Встановити рухоми котушку 1 в крайнє положення. Переміщуючи її в протилежнє крайнє положення через 1 см, записати значення ЕРС взаємної індукції в колі котушки 2.
5. За формулою (10) розрахувати значення  $M_{2,1}$ . Одержані значення вимірних величин занести до таблиці 1.
6. Поміняти місцями котушки  $L_1$  і  $L_2$  за допомогою перемикачів  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$ , повторити вимірювання згідно пунктів 2 і 3 і розрахувати  $M_{1,2}$ .
7. Побудувати графіки залежності  $M_{2,1}$  і  $M_{1,2}$  як функції координати  $Z$  ( $Z$  – віддаль між центрами котушок 1 і 2).

Таблиця 1.

U=			f=			
Z, см	$\epsilon_{0,2}$		$M_{2,1},$ Гн	$\epsilon_{0,2}$		$M_{1,2},$ Гн
	діл	В		діл	В	

Завдання 2: Вимірювання  $M_{1,2}$  при різних амплітудних значеннях напруги генератора.

1. Помістити котушку 1 в середнє положення відносно котушки 2.
2. Установити частоту генератора за вказівкою викладача (наприклад  $10^4$  Гц).
3. Виміряти амплітуду ЕРС взаємної індукції при різних значеннях напруги  $U_q$  в колі котушки 1 в інтервалі 0-5 В через кожні 0,1 В.
4. За формулою (10) розрахувати  $M_{2,1}$ . Одержані значення величин занести до таблиці 2.

Таблиця 2.

f=		$R = 10^4$ Ом			
$U_q, \text{В}$					
$\epsilon_{0,2}, \text{В}$					
$M_{2,1}, \text{Гн}$					



**Завдання 3:** Вимірювання  $M_{2,1}$  при різних частотах напруги живлення.

1. Помістити котушку 1 в середнє положення відносно котушки 2.
2. Установити амплітуду живлення генератора (за вказівкою викладача) наприклад 2 В.
3. Виміряти амплітуду ЕРС взаємної індукції  $\epsilon_{0,2}$  при різних частотах генератора від 5 до 20 кГц (провівши біля 10 вимірювань).
4. За формулою (10) розрахувати  $M_{2,1}$ . Отримані значення занести до таблиці 3.

Таблиця 3.

$U_B =$	$R = 10^4 \text{ Ом}$				
$f, \text{ Гц}$					
$\epsilon_{0,1}, \text{ В}$					
$M_{2,1}, \text{ Гн}$					

5. Для кожного із одержаних значень  $M_{2,1}$  розрахувати абсолютну та відносну похибки.

### Контрольні запитання

1. Сформулювати закон електромагнітної індукції Фарадея і правило Ленца.
2. Суть явища взаємної індукції.
3. Чому дорівнює ЕРС взаємної індукції двох контурів?
4. Пояснить графік залежності  $M_{2,1}=f(z)$ , одержаний у цій роботі.

## Література

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс фізики. – М.: Высш. школа, 1989.
2. Лабораторний практикум по фізиці. Под ред. К.А. Барсукова и Ю.И. Уханова. – М.: Высш. школа, 1988.
3. Бушок Г.Ф., Півень Г.Ф. Курс фізики, ч.1. – К.: Вища школа, 1981.
4. Авдєєв С.Г. Лабораторний практикум з фізики, ч.1 – Вінниця: ВДГУ, 1995.

*Навчальне видання*

Гель Павло Васильович  
Бабюк Тодор Ілліч  
Хрущак Олександр Вікторович

**ФІЗИЧНИЙ ПРАКТИКУМ**  
**частина I**  
(МЕХАНІКА, ЕЛЕКТРИКА І ЕЛЕКТРОМАГНІТИЗМ)

**Навчальний посібник**

Оригінал-макет підготовлено авторами

Редактор С.А.Малішевська

Підписано до друку

Формат 29,7x42  $\frac{1}{4}$  Гарнітура Times New Roman

Друк різнографічний Ум. друк. арк. 7,13

Тираж 75 прим.

Зам. № 2001-011

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького державного технічного університету  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВДТУ, ГНК, 9-й поверх  
Тел. (0432) 44-01-59