



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА  
І АРХІТЕКТУРИ

Бурдейна Н. Б.  
Глива В. А.  
Петруньок Т. Б.  
Бірук Я. І.

# КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ З ФІЗИКИ

Фізичні основи механіки  
Електрика і магнетизм

# №1

Студент: \_\_\_\_\_

Викладач: \_\_\_\_\_

Київ 2023

*Затверджено кафедрою фізики Київського національного університету будівництва і архітектури, протокол №1 від 31 вересня 2023 року*

**Бурдейна Н.Б., Глива В.А., Петруньок Т.Б., Бірук Я.І. Конспект лекцій з фізики №1. Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм / Навчально-методичний посібник – К.: КНУБА, 2023. – 136 с.**

Навчально-методичний посібник розроблений з метою активізації навчально-пізнавальної діяльності студентів, оптимізації та інтенсифікації навчально-виховного процесу, формування у студентів вмінь, навичок та прагнень до самостійної роботи з інформацією, формування потреб творчої самореалізації у професійній галузі.

Посібник призначений для студентів спеціальностей: 015 «Професійна освіта», 101 «Екологія», 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування», 183 «Технології захисту навколишнього середовища», 192 «Будівництво та цивільна інженерія» для всіх форм організації навчального процесу при вивченні фізики.

Видано в авторській редакції

© Н. Б. Бурдейна,  
В. А. Глива,  
Т. Б. Петруньок,  
Я. І. Бірук,  
2023

## ЗМІСТ

<b>Передмова</b> .....	4
<b>РОЗДІЛ I. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МЕХАНІКИ</b> .....	<b>5</b>
Лекція № 1. Елементи кінематики. ....	5
Лекція № 2. Динаміка поступального руху .....	14
Лекція № 3. Закон збереження імпульсу .....	18
Лекція № 4. Динаміка обертального руху. Закон збереження моменту імпульсу. ....	22
Лекція № 5. Енергія, робота та потужність. Закон збереження енергії .....	32
Лекція № 6. Елементи механіки суцільних середовищ. ....	38
Лекція № 7. Елементи спеціальної теорії відносності (тема для самостійного опрацювання студентами) .....	46
<b>РОЗДІЛ II. ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ</b> .....	<b>55</b>
Лекція № 8. Електростатика .....	55
Лекція № 9. Теорема Гауса .....	63
Лекція № 10. Провідники та діелектрики в електростатичному полі ..	67
Лекція № 11. Постійний електричний струм. ....	77
Лекція № 12. Електричний струм у металах, рідинах і газах. ....	86
Лекція № 13. Магнітостатика .....	100
Лекція № 14. Закони магнітостатики. ....	112
Лекція № 15. Електромагнітні явища .....	120
<b>Методичне забезпечення дисципліни</b> .....	132
<b>Теми практичних занять у I семестрі</b> .....	133
<b>Теми лабораторних робіт у I семестрі</b> .....	133
<b>Приклади тем і змісту рефератів</b> .....	134

## ПЕРЕДМОВА

Серед різноманітних форм організації навчальної роботи у вищому навчальному закладі важливе місце належить лекції. Навчальна лекція (від лат. *lectio* – читання) – логічно завершений, науково-обґрунтований, послідовний і систематичний виклад певного наукового або науково-методичного питання, теми чи розділу навчального предмета, ілюстрований за необхідності наочною демонстрацією дослідів. Вона тісно пов'язана з усіма іншими формами організації навчально-виховної роботи – практичними, індивідуальними та лабораторними заняттями.

Щоб якомога ефективніше використати відведений на лекційні заняття з фізики час у будівельних вищих навчальних закладах і не втратити методичний, дидактичний та науковий зміст лекцій, ми пропонуємо ввести лекційні зошити. Ідея розробки такого зошиту полягає у тому, що він представляє собою основу, на якій будується лекція. У лекційному зошиті кожної лекції є така друкована інформація:

- тема лекції;
- загальний перелік питань, які висвітлюються під час даної лекції;
- порядковий номер і назва кожного питання;
- ключові частини означень або формулювань (наприклад, «Хвильовим процесом називається ...», «Суцільним вважають середовище ...»); назви законів чи формул (формула швидкості поширення хвиль у рідинах: ..., ... – формула Лапласа);
- виведення формул, на які неефективно чи недоцільно витратити лекційний час;
- координатні площини чи вісі (бажано проградуєвані), на яких впродовж лекції студент будуватиме графіки;
- заготовки під рисунки та їх пояснення (наприклад, при поясненні механізму виникнення електромагнітних коливань у коливальному контурі студенти багато часу гають на малювання п'яти однакових коливальних контурів і через брак часу не встигають грамотно виконати рисунки, а тим більше записати пояснення);
- фотографії, схеми дослідів або демонстрацій;
- цікаві приклади та факти;
- приклади застосування фізичних знань у будівельній галузі;
- чітке формулювання завдань, які студент мусить виконати самостійно або питань для самостійного опрацювання;
- список рекомендованої літератури.

Студенту, який має такий дидактичний матеріал, простіше зрозуміти структуру розділу і теми взагалі та лекції зокрема. Крім того студент може самостійно опрацювати необхідну частину теоретичного матеріалу, навіть якщо пропустить лекційне заняття. Перевіряючи за лекційним зошитом відпрацьоване заняття, викладач буде мати можливість об'єктивно оцінити ступінь самостійності та якість опрацювання навчальної інформації.

Запропонований нами лекційний зошит – це основа, яка сама по собі не виконує жодної навчальної функції. Але використання його як допоміжного засобу під час лекційних занять забезпечує такі можливості:

- економія лекційного часу, що дозволяє вносити у лекцію додаткові пояснення чи наводити більше прикладів, фактів тощо;
- активізація розумової діяльності студентів, що спонукає їх до спільного пошуку істини, міркувань, дискусій;
- стимулювання внутрішньої мотивації при вивченні фізики;
- формування у студентів вмінь і навичок самостійного опрацювання навчального матеріалу;
- перетворення стенографічного конспекту на логічно викладену та певним чином структуровану навчальну інформацію.

Аудиторний час необхідно використовувати максимально ефективно. Витратити цей час на суто механічну роботу – це недозволена розкіш, особливо в умовах його значної обмеженості. На сьогоднішній день виникла необхідність створення допоміжних друкованих засобів навчання, які забезпечать звільнення студента від механічної праці і одночасно стимулюватимуть ефективну розумову діяльність.

# РОЗДІЛ І. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МЕХАНІКИ

## Лекція № 1 Елементи кінематики

1. Предмет фізики
2. Предмет механіки. Класична, релятивістська та квантова механіки
3. Фізичні моделі механіки
4. Простір та час. Системи відліку
5. Рівняння руху матеріальної точки. Переміщення, шлях
6. Швидкість та прискорення. Нормальне та тангенціальне прискорення
7. Поступальний та обертальний рухи. Рух по колу

### 1. Предмет фізики

*Фізика – наука,  
що вивчає загальні  
властивості і закони  
руху речовини і поля.*

*А.Ф. Іоффе*



Фізика (від грец. *φύσις* природа) – \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

---

---

---



Матерія – \_\_\_\_\_

---

---

---

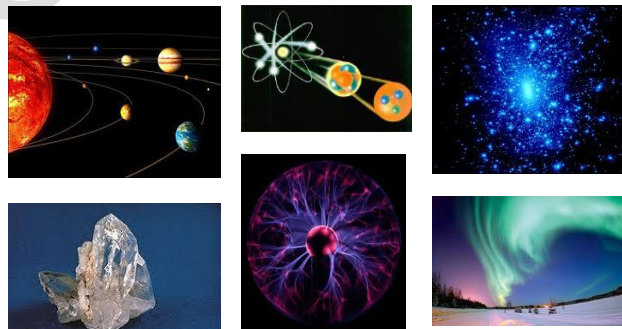
---

---

---

---

---



Невід'ємною властивістю і формою існування матерії є рух.

Рух – \_\_\_\_\_

---

---

---

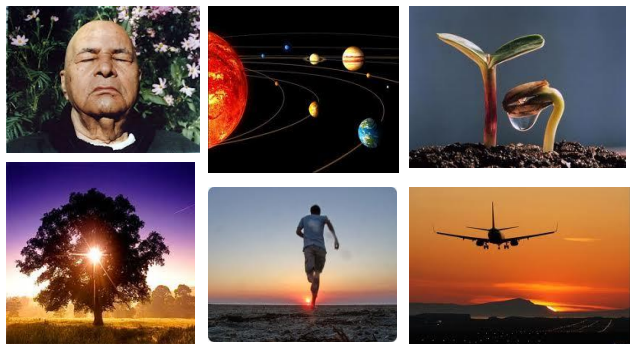
---

---

---

---

---



## 2. Предмет механіки. Класична, релятивістська та квантова механіки

*Механіка* – це \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Під *механічним рухом* тіла розуміють \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

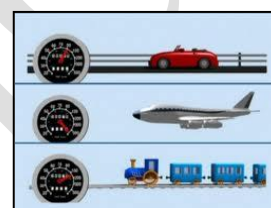


Механіку поділяють на три частини:

1) *кінематика* – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

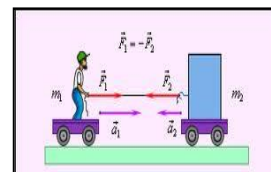


2) *динаміка* – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

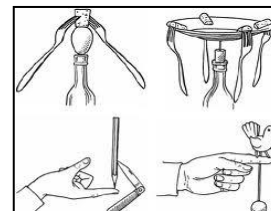


3) *статику* – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



В залежності від швидкості і розмірів тіл, рух яких вивчають, виділяють:

• *класичну механіку (механіку Галілея-Ньютона)* – вивчає \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

• *релятивістську механіку (механіку Ейнштейна)* – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

• *квантову механіку (хвильову механіку)* – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## 2. Фізичні моделі механіки

Основним принципом сучасної фізики є принцип моделювання.

*Модель* – це \_\_\_\_\_

---

---

---

*Моделювання* – це \_\_\_\_\_

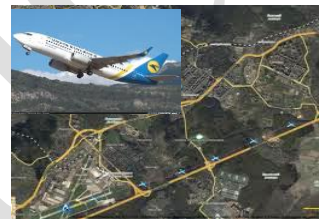
---

---

---

Для описання механічного руху та розв'язання основної задачі кінематики вводять такі основні фізичні моделі та поняття:

- *матеріальна точка (МТ)* – \_\_\_\_\_



---

---

---

- *абсолютно тверде тіло (АТТ)* – \_\_\_\_\_

---

---

- *суцільне середовище* – \_\_\_\_\_

---

---

## 4. Простір та час. Системи відліку

Для фізики та інших природничих наук поняття *простору* та *часу* є основними.

*Простір* \_\_\_\_\_

*Час* \_\_\_\_\_

---

---

В *класичній механіці*, за концепцією І. Ньютона, поняття простору та часу мають абсолютний характер, незалежний від матеріальних об'єктів.

*Абсолютний простір* – \_\_\_\_\_

*Абсолютний час* – \_\_\_\_\_

---

---

З розвитком науки змінюються уявлення про простір і час. *Теорія відносності* А. Ейнштейна привела до заміни класичної концепції простору і часу новою концепцією, згідно якої, \_\_\_\_\_

Положення тіла визначають відносно \_\_\_\_\_

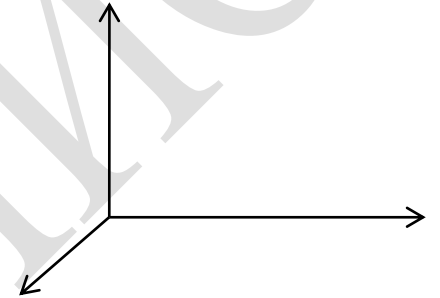
\_\_\_\_\_ – тіла відліку.

називають *системою відліку*.



### 5. Рівняння руху матеріальної точки. Переміщення, шлях

При вивченні руху тіл, найбільш часто використовують декартову прямокутну систему координат. Положення точки у просторі визначають трьома координатами  $x, y, z$  або радіус-вектором  $\vec{r}$ , проведеним з початку координат у дану точку ( $\vec{r}_1$  – радіус-вектор точки  $I$ ).



Рух точки в просторі описують \_\_\_\_\_, характеризують \_\_\_\_\_

**Рівняння руху** – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ :

$$\left. \begin{array}{l} x = \underline{\hspace{2cm}} \\ y = \underline{\hspace{2cm}} \\ z = \underline{\hspace{2cm}} \end{array} \right\}, \text{ або } \vec{r} = \underline{\hspace{2cm}}.$$

Рівняння поступального руху має вигляд:

Рівняння обертального руху має вигляд:

\_\_\_\_\_ називають **траєкторією**.

Рівняння траєкторії можна отримати, виключивши час  $t$  із рівняння руху.





Переміщення  $\Delta \vec{r}$  – це \_\_\_\_\_

$$|\Delta \vec{r}| = \sqrt{\quad}, [r] = \quad.$$

Шлях – \_\_\_\_\_,  $[S] = \quad$ .

## 6. Швидкість та прискорення

Для характеристики інтенсивності зміни тілом свого положення у просторі з часом вводять поняття швидкості.

**Середньою швидкістю** називається \_\_\_\_\_



$$\vec{v}_{\text{сер}} = \frac{\quad}{\quad}, [v] = \quad.$$

Якщо визначити швидкість у даний момент часу, тобто взяти границю від  $\vec{v}_{\text{сер}}$  при  $\Delta t \rightarrow 0$ , то будемо мати *миттєву* швидкість:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\quad}{\quad} \text{ або } \vec{v} = \frac{\quad}{\quad}.$$

**Миттєвою швидкістю** \_\_\_\_\_  
:  
:

$$\vec{v} = \frac{\quad}{\quad}, [v] = \quad.$$

Для характеристики інтенсивності зміни швидкості тіла з часом вводиться поняття прискорення.

**Прискорення** – це \_\_\_\_\_  
:

$$\vec{a}_{\text{сер}} = \frac{\quad}{\quad} \quad (\text{середнє прискорення});$$

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\quad}{\quad}, \vec{a} = \frac{\quad}{\quad}, \vec{a} = \frac{\quad}{\quad} \quad (\text{миттєве прискорення});$$

$$[a] = \quad.$$

Знаючи кінематичне рівняння руху, шляхом диференціювання за часом можна знайти швидкість \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ (пряма задача кінематики).

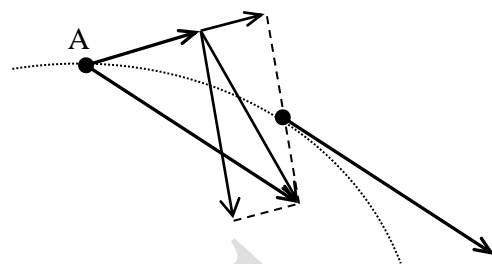
Навпаки, знаючи прискорення точки, а також початкові умови (положення  $\vec{r}_0$  і швидкість  $\vec{v}_0$  в початковий момент часу  $t_0=0$ ), можна знайти \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ (обернена задача кінематики).

Дійсно, із формул швидкості і прискорення випливає, що  $d\vec{v} = \vec{a} \cdot dt$  і  $d\vec{r} = \vec{v} \cdot dt$ , тоді:

$$\vec{v}(t) = \quad ,$$

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

Нехай точка в положенні А в момент часу  $t$  має швидкість  $\vec{v}$ . За час  $\Delta t$  рухома точка перейде в положення В і набуде швидкості  $\vec{v}_1$  (рис.). Перенесемо вектор  $\vec{v}_1$  у точку А і знайдемо зміну швидкості  $\Delta\vec{v} = \vec{v}_1 - \vec{v}$ . Розкладемо вектор зміни швидкості  $\Delta\vec{v}$  на дві взаємно перпендикулярні складові:  $\vec{v}_\tau$  – вздовж вектора  $\vec{v}$ , яку називають тангенціальною (або дотичною), і  $\vec{v}_n$  – нормальну (або доцентрову), направлену по нормалі до вектора  $\vec{v}$ , тобто  $\Delta\vec{v} = \vec{v}_\tau + \vec{v}_n$



Прискорення може виникнути при зміні швидкості не лише за величиною, але і за напрямом, тому прискорення (або повне прискорення) має дві складові:

– тангенціальне прискорення – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

$$a_\tau = \frac{\Delta v}{\Delta t}, \text{ або } a_\tau = \frac{dv}{dt};$$

– нормальне прискорення – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

$$a_n = \frac{v^2}{R}, \text{ або } a_n = \frac{v^2}{\rho},$$

де  $R$  – радіус кривизни траєкторії (рис.).

Загальне (повне) прискорення визначають за теоремою Піфагора (оскільки вектори тангенціального і нормального прискорень взаємно перпендикулярні):

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}.$$

Розрізняють такі види руху:

1)  $\vec{v} = \text{const}$ ,  $\vec{a}_\tau = 0$ ,  $\vec{a}_n = 0$  – \_\_\_\_\_ рух:

$$\vec{v} = \text{const}, v = \frac{|\Delta r|}{t} = \frac{s}{t}, s = v \cdot t, \vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}t$$

2)  $\vec{v} \neq \text{const}$ ,  $\vec{a}_n = 0$ ,  $\vec{a}_\tau = \vec{a} = \text{const}$  – \_\_\_\_\_ рух:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a} \cdot t^2}{2}.$$

3)  $\vec{v} \neq const, \vec{a}_\tau = 0, \vec{a}_n = const = \frac{v^2}{R}$  — \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_ рух.

4)  $\vec{v} \neq const, \vec{a}_\tau \neq 0, \vec{a}_n \neq 0$  — \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_ рух.

### 7. Поступальний та обертальний рухи. Рух по колу

Будь-який складний механічний рух абсолютно твердого тіла являє собою сукупність двох рухів – поступального та обертового.

1) *Поступальний рух* – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

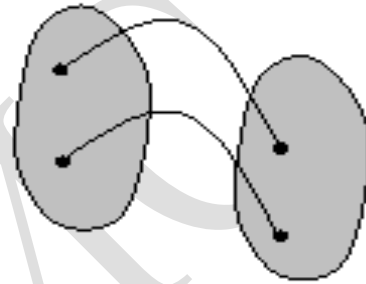
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



2) *Обертальний рух* – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

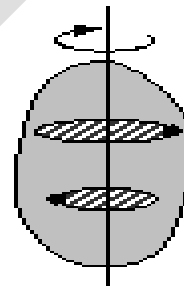
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



Положення в просторі абсолютно твердого тіла, що здійснює обертальний рух, визначають **кутовим переміщенням**  $\Delta\varphi$  – \_\_\_\_\_

---



---



---

Обертання навколо нерухомої осі здійснюють ротори турбін, електричних генераторів і двигунів, колісні вали двигунів внутрішнього згоряння і т. д.



Кінематичною характеристикою напрямку і швидкості обертання тіла є кутова швидкість.

**Кутовою швидкістю**  $\vec{\omega}$  називають \_\_\_\_\_

---

$$\vec{\omega} = \quad , [\omega] = \quad .$$

**Кутовим прискоренням**  $\vec{\beta}$  називають \_\_\_\_\_

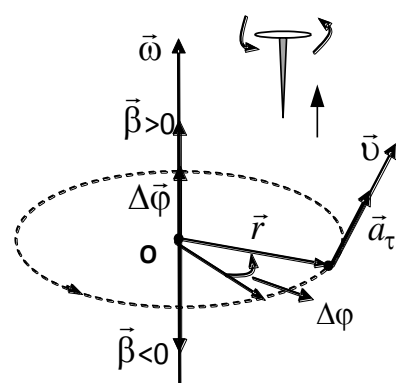
---

$$\vec{\beta} = \quad , [\beta] = \quad .$$

Кутове прискорення  $\vec{\omega}$  і кутова швидкість  $\vec{\beta}$  є *псевдовекторами*, оскільки на відміну від векторів переміщення, швидкості, прискорення й інших істинних (полярих) векторів, напрями яких очевидні, напрям вектора кутового переміщення пов'язують із напрямком обертання, а отже такий вектор є *аксіальним*, або *псевдовектором*.

Напрямок вектора кутового переміщення  $\vec{\varphi}$  і кутової швидкості  $\vec{\omega}$  визначають за **правилом** \_\_\_\_\_: напрям вектора кутового переміщення  $\vec{\varphi}$  або кутової швидкості  $\vec{\omega}$  мають збігатися з поступальним рухом гвинта, якщо його головку повертати в напрямі обертання тіла.

Вектор кутового прискорення  $\vec{\beta}$  направлений вздовж осі обертання в напрямку вектора приросту кутової швидкості: у той самий бік, що й  $\vec{\omega}$ , при прискореному обертанні ( $\frac{d\vec{\omega}}{dt} > 0$ ) і в протилежний бік – при сповільненому обертанні ( $\frac{d\vec{\omega}}{dt} < 0$ ) (див. рис.).



Величини, що описують лінійні і кутові характеристики руху пов'язані між собою формулами зв'язку:

**Періодом обертання** називають \_\_\_\_\_

$$T = \dots$$

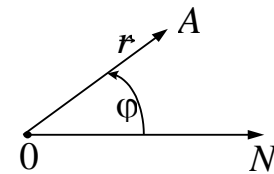
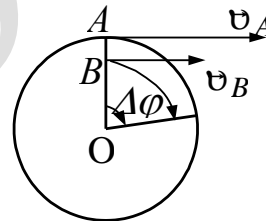
Оскільки тіло, що рівномірно обертається з кутовою швидкістю  $\omega$ , за час  $T$  повертається на кут  $\varphi=2\pi$ , то

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, |T| = \dots$$

**Частотою обертання** називають \_\_\_\_\_

$$n = \dots, \omega = 2\pi n, [n] = \dots$$

Поширеною різновидністю криволінійного руху є *рух точки по колу*. При обертанні кількох жорстко зв'язаних точок, наприклад  $A$  і  $B$  (рис.), вони мають різні лінійні швидкості, але всі точки за проміжок часу  $\Delta t$  зміщуються на той самий кут  $\Delta\varphi$ , тобто обертаються з однаковою кутовою швидкістю  $\omega$ .



## Лекція № 2

### Динаміка поступального руху

1. Закони Ньютона. Сила. Маса. Імпульс. Інерціальні системи відліку
  2. Сили інерції. Рух у неінерціальних системах відліку
1. Закони Ньютона. Сила. Маса. Імпульс. Інерціальні системи відліку

*Динаміка* – \_\_\_\_\_

Закони динаміки широко використовуються фахівцями будівельної галузі при розрахунках динамічних навантажень, які виникають в процесі експлуатації будівельних споруд та враховуються при конструюванні будівельних механізмів та машин.



В основі динаміки лежать закони Ньютона, сформульовані на основі спостережень природних явищ і процесів. Вони визначають умови руху та взаємодії тіл.



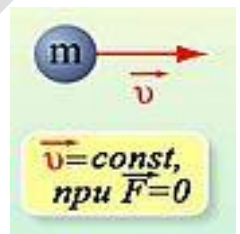
**Перший закон Ньютона (закон інерції):** \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

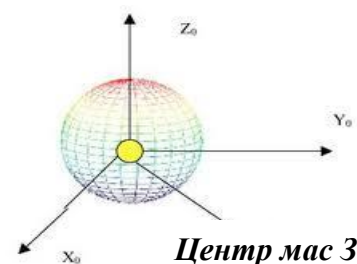


$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \Rightarrow \begin{cases} \vec{v} = \underline{\hspace{2cm}} \\ \vec{v} = \underline{\hspace{2cm}} \end{cases}$$

Систему відліку, в якій справджується перший закон Ньютона, називають \_\_\_\_\_.

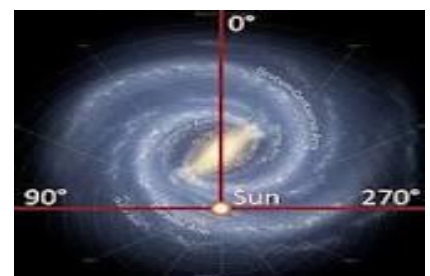
**Інерціальна система відліку** – \_\_\_\_\_

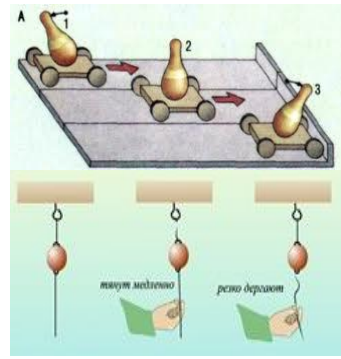
Інерціальна система відліку є фізичною абстракцією (моделлю), оскільки в природі не існує абсолютно нерухомої системи відліку. Будь-яка система відліку, що рухається відносно деякої інерціальної системи прямолінійно і рівномірно, буде також \_\_\_\_\_.



**Центр мас Землі**

В залежності від умов задач, які розв'язуються умовно за інерціальну систему відліку приймають систему відліку пов'язану із Землею – \_\_\_\_\_ систему відліку, або більш точну систему відліку, пов'язану із Сонцем – \_\_\_\_\_ систему відліку. Початок координат такої системи знаходиться у центрі Сонця, а її осі направлені на далекі зорі.





\_\_\_\_\_ називають інерцією.

\_\_\_\_\_ називають інертністю.

Мірою інертності тіла є його маса.

Маса – \_\_\_\_\_



$$[m] = \dots$$

Щоб виміряти масу тіла, необхідно порівняти її з еталоном одиниці маси.

Сила – \_\_\_\_\_

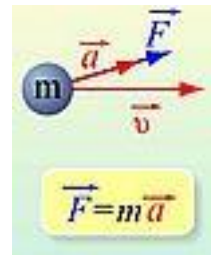


Динамометри



$$[F] = \text{(ньютон)}.$$

II закон Ньютона (умова рівноприскореного руху): \_\_\_\_\_



$\vec{a} = \dots$  – основний закон динаміки поступального руху.

Якщо маса тіла є величиною сталою, то

$$\vec{F} = m\vec{a} = \dots$$

Добуток  $\vec{p} = m\vec{v}$  називають \_\_\_\_\_

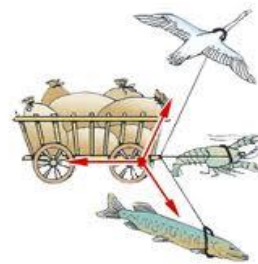
Імпульсом або кількістю руху тіла називають \_\_\_\_\_

$$\vec{p} = \dots$$

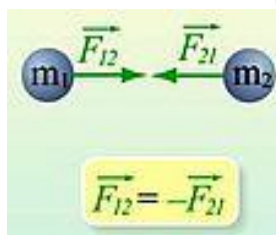
Тоді II закон Ньютона (у диференціальній формі): \_\_\_\_\_

$$\vec{F} = \dots$$

При дії на матеріальну точку кількох сил виконується принцип незалежності дії сил: \_\_\_\_\_

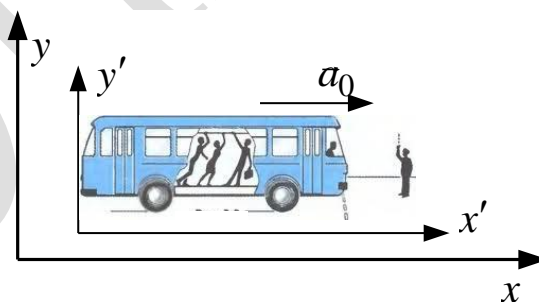


**III закон Ньютона (умова взаємодії тіл):** \_\_\_\_\_

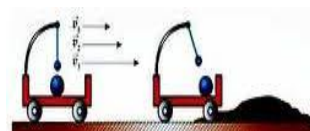


## 2. Сили інерції. Рух у неінерціальних системах відліку

**Неінерціальна система відліку** – \_\_\_\_\_



В неінерціальних системах відліку закони Ньютона не виконуються, але їх можна використовувати і в неінерціальних систем відліку, якщо окрім сил, обумовлених взаємодією тіл, врахувати сили інерції.



**Сила інерції** – \_\_\_\_\_

$$F_{in} = \dots,$$

де  $F_{in}$  – \_\_\_\_\_,

$m$  – \_\_\_\_\_,

$a$  – \_\_\_\_\_



На погляд спостерігача, який рухається з прискоренням, навколишні фізичні тіла здійснюють рухи, які не відповідають тим силам, що на них діють. Так, наприклад, коли потяг рушає з місця, спостерігачу, який сидить у вагоні, здається, що вокзал рушив у протилежний бік, хоча на нього не діють жодні сили.

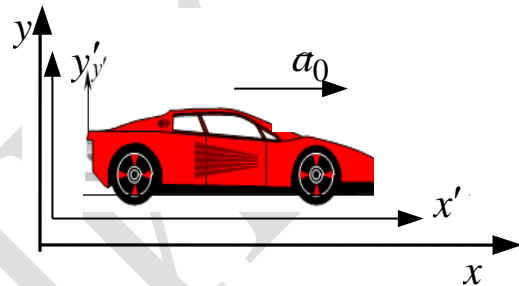
Для того, щоб мати змогу застосовувати Ньютонівську механіку в неінерційній системі координат, вводять фіктивні сили інерції, що діють у цій системі на всі тіла. Так, на погляд спостерігача у вагоні потягу, другий закон Ньютона виконується, якщо на вокзал діє сила  $F_{in} = -ma$ , де  $m$  – маса вокзалу,  $a$  – прискорення руху спостерігача.

У системі, що обертається довкола осі, сила інерції набирає вигляд:

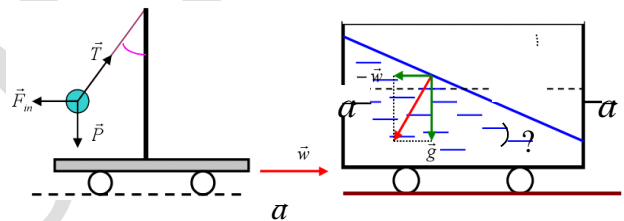
$$F_{in} = -2m[\vec{\omega} \times \vec{v}'] - [\vec{\omega} \times [\vec{\omega} \times \vec{r}]]$$

де  $\omega$  – кутова швидкість, а  $v'$  – швидкість об'єкта в системі, що обертається. Перший доданок називають *силою Коріоліса*, ця сила перпендикулярна до швидкості.

До неінерціальних систем відліку можна віднести системи відліку пов'язані з потягом, що починає рухатися або гальмує, автомобіль, що повертає на повороті шосе, ракета, що злітає з космічним апаратом, Земля, що обертається навколо Сонця тощо.



Введення сил інерції не є принципово необхідним. Оскільки рух будь-якого тіла можна завжди розглядати по відношенню до інерціальної системи відліку. Використання сил інерції дає можливість розв'язати деякі задачі безпосередньо по відношенню до неінерціальної системи відліку, що часто виявляється значно простіше, ніж розглядати рух в інерціальній системі. Такі задачі як відхилення вантажу підвішеного на нитці у вагоні рухомого потягу, нахил поверхні рідині в рухомій цистерні тощо, доцільніше розв'язувати вводячи сили інерції.



Сили Коріоліса на Землі проявляються, наприклад, у тому, що праві береги річок у північній півкулі більш круті – їх підмиває вода під дією сила Коріоліса, яка в північній півкулі напрямлена вправо по відношенню до руху тіла. У південній півкулі все відбувається навпаки. При пострілі із гармати уздовж меридіану на північ снаряд буде відхилятися на схід у північній півкулі і на захід – у південній. При пострілі уздовж екватора сили Коріоліса будуть притискувати снаряд до Землі, якщо постріл був виконаний у напрямку на захід, і піднімати його догори, якщо постріл виконаний у східному напрямку, що враховується в артилерії.



**Лекція № 3**  
**Закон збереження імпульсу**

1. Закон динаміки системи матеріальних точок. Закон збереження імпульсу. Центр мас
2. Пружний та непружний удари тіл та частинок
3. Рух тіл змінної маси

**1. Закон динаміки системи матеріальних точок. Закон збереження імпульсу. Центр мас**

\_\_\_\_\_ називають *механічною системою*.  
Сили взаємодії між матеріальними точками механічної системи називають \_\_\_\_\_. Сили, з якими на матеріальні точки системи діють зовнішні тіла називають \_\_\_\_\_.

Механічна система, в якій \_\_\_\_\_, називають *замкненою*.

Якщо розглянути механічну систему, яка складається із  $n$  тіл, маси і швидкості яких дорівнюють відповідно  $m_1, m_2, \dots, m_n$  і  $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n$ , то

$$\frac{d}{dt} \sum_{i=1}^n (m_i \vec{v}_i) = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i \quad \text{або} \quad \frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{F},$$

де  $\vec{p}$  – імпульс системи, а  $\vec{F}$  – векторна сума зовнішніх сил.

*Зміна імпульсу механічної системи з часом дорівнює векторній сумі зовнішніх сил, що діють на систему.*

Якщо система замкнена

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{d}{dt} (m_i \vec{v}_i) = 0,$$

то

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = \quad .$$

Цей вираз називають *законом збереження імпульсу*: \_\_\_\_\_

Закон збереження імпульсу є наслідком *однорідності простору*, яка полягає в тому, що фізичні властивості і закони руху замкненої системи не залежать від вибору положення початку координат інерціальної системи відліку.

*Центром мас (центром інерції) системи матеріальних точок називають точку С, радіус-вектор  $\vec{r}_c$  якої дорівнює*

$$\vec{r}_c = \quad ,$$

де  $M =$  \_\_\_\_\_ – загальна маса всієї системи,  $\vec{r}_i$  – радіус-вектор  $i$ -ї матеріальної точки. Якщо радіус-вектори  $\vec{r}_i^*$  проведені із центра мас С, то

$$\sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i^* = 0.$$

Отже, *центр мас* – це \_\_\_\_\_

Імпульс системи дорівнює добутку маси системи на величину швидкості руху її центра мас:

$$\vec{p} = M\vec{v}_c.$$

Продиференціювавши це рівняння за часом, отримуємо:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = M \frac{d\vec{v}_c}{dt} = M\vec{a}_c = \vec{F}.$$

Центр мас механічної системи рухається як \_\_\_\_\_

Якщо векторна сума прикладених до системи зовнішніх сил дорівнює нулю, то система матеріальних точок (тіло) буде перебувати у стані спокою, або рухатися рівномірно і прямолінійно. Положення центру мас визначає стійкість будівельних конструкцій, машин, кранів тощо до перекидання, що необхідно враховувати при їх конструюванні.



## 2. Пружний та непружний удари тіл та частинок

В реальних умовах при взаємному зіткненні тіла деформуються. При цьому кінетична енергія, яку мали тіла перед ударом, частково або повністю переходить в потенційну енергію пружної деформації або в так звану внутрішню енергію тіл. Збільшення внутрішньої енергії тіл супроводжується підвищенням їх температури.

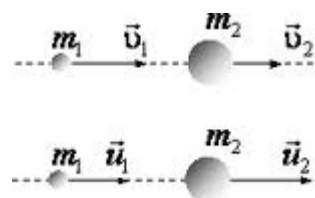
**Ударом** називають \_\_\_\_\_



**Удар** називають **центральним**, якщо \_\_\_\_\_

Для спрощення розв'язання реальних задач існують дві моделі – два граничні види удару: абсолютно пружний і абсолютно непружний.

**Абсолютно пружний удар** – \_\_\_\_\_



При такому ударі кінетична енергія тіл в момент удару повністю або частково переходить в потенційну енергію пружної деформації, в результаті чого тіла повертаються до початкової форми, відштовхуючи одне одного, потенційна енергія пружної деформації знову переходить у кінетичну енергію тіл, тобто механічна енергія тіл не розсіюється на немеханічні види

енергії. Прикладом такого удару може бути зіткнення більярдних куль із слонової кістки.

Розглянемо абсолютно пружний центральний удар двох однорідних куль масами  $m_1$  і  $m_2$ , швидкостями  $\vec{v}_1$  і  $\vec{v}_2$  до удару та  $\vec{u}_1$  і  $\vec{u}_2$  після удару. Запишемо закони збереження імпульсу та енергії системи кульок:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2 ;$$

$$\frac{m_1 \vec{v}_1^2}{2} + \frac{m_2 \vec{v}_2^2}{2} = \frac{m_1 \vec{u}_1^2}{2} + \frac{m_2 \vec{u}_2^2}{2} .$$

отримаємо швидкість куль після удару:

$$\vec{u}_1 = \dots$$

$$\vec{u}_2 = \dots$$

Для отримання кінцевого вигляду формул необхідно спроектувати швидкості тіл до удару  $\vec{v}_1$  та  $\vec{v}_2$  на координатні вісі.

**Абсолютно непружний удар** – \_\_\_\_\_

---



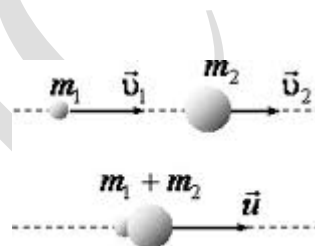
---



---



---



Наприклад, попадання кулі з гвинтівки у рухому мішень, як ящик з піском, підвішений на мотузці. Куля, застрявши в піску, залишається в ящику і рухається разом з ним.

Для абсолютно непружного центрального удару двох однорідних куль масами  $m_1$  і  $m_2$ , швидкостями  $\vec{v}_1$  і  $\vec{v}_2$  до удару та спільною швидкістю  $\vec{u}$  після удару можна записати закон збереження імпульсу:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \cdot \vec{u} ,$$

звідки:

$$\vec{u} = \dots$$

Кінетичні енергії системи куль до і після удару будуть відрізнятися, оскільки при абсолютно непружному ударі частина кінетичної енергії перетвориться на внутрішню енергію.

*Зміна кінетичної енергії системи при абсолютно непружному ударі:*

$$\Delta E_k = \dots ,$$

або

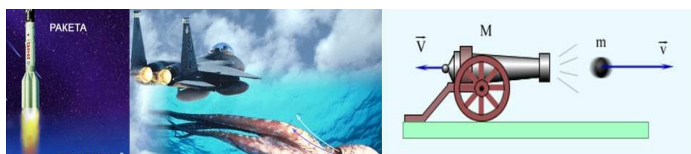
$$\Delta E_k = \dots .$$

де величину  $\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$  називають \_\_\_\_\_.

### 3. Рух тіл змінної маси

**Реактивний рух** – це \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_, наприклад, рух ракети, реактивного літака, баржі на воді, яку навантажують піском, чи вагонетки, в яку досипають щебінь, тощо.



Закони руху тіл змінної маси можна отримати, виходячи із закону збереження імпульсу.

Якщо записати закон збереження імпульсу для системи “ракета-паливо” можна отримати рівняння руху ракети – **рівняння** \_\_\_\_\_:

де  $\vec{F}$  – \_\_\_\_\_

$\frac{dm}{dt} \vec{u}$  – \_\_\_\_\_

$\vec{u}$  – \_\_\_\_\_

Реактивна сила тим більша, чим більша швидкість згорання палива  $\frac{dm}{dt}$  і чим більша відносна швидкість  $\vec{u}$ .



Рівняння, яке дозволяє обчислити \_\_\_\_\_

називають **формулою Циолковського**:

1. Ступені свободи руху абсолютно твердого тіла
2. Момент сили. Момент інерції
3. Закон динаміки обертального руху
4. Умови рівноваги твердого тіла. Центр ваги. Види рівноваги
5. Момент імпульсу. Закон збереження моменту імпульсу
6. Уявлення про гіроскопи

1. Ступені свободи руху абсолютно твердого тіла

Числом ступенів свободи абсолютно твердого тіла називають \_\_\_\_\_

---



---



---

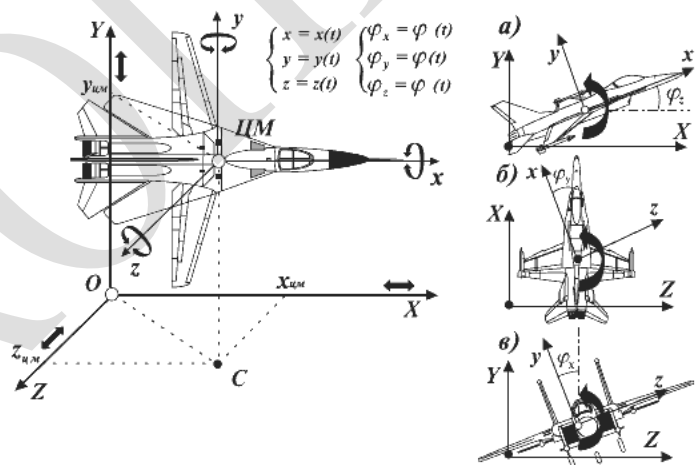


---

Матеріальна точка, що довільно рухається у просторі, має \_\_\_\_\_ ступені свободи (x, y, z). Якщо ця точка рухається по деякій поверхні або вздовж певної кривої, то вона відповідно має \_\_\_\_\_ або \_\_\_\_\_ ступені свободи (для визначення її положення достатньо двох або однієї координати).

Абсолютно тверде тіло, в загальному випадку, має \_\_\_\_\_ ступенів свободи – \_\_\_\_\_ ступені свободи поступального руху і \_\_\_\_\_ ступені свободи обертального руху.

Якщо тіло не абсолютно тверде і його частини можуть зміщуватись одна відносно одної, то вводять ще додаткові ступені вільності коливального руху.



2. Момент сили. Момент інерції

Момент інерції – \_\_\_\_\_

---



---



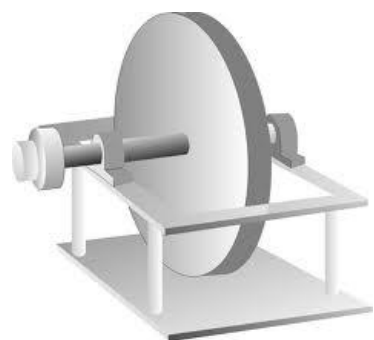
---



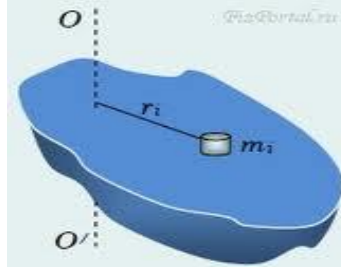
---



---



Тверде тіло, що обертається навколо певної осі можна розглядати як систему з нескінченної кількості матеріальних точок, кожна з масою  $m_i$ , відстані від кожної точки до осі обертання дорівнюють  $r_i$ .



**Моментом інерції тіла (системи точок) відносно осі обертання називають** \_\_\_\_\_

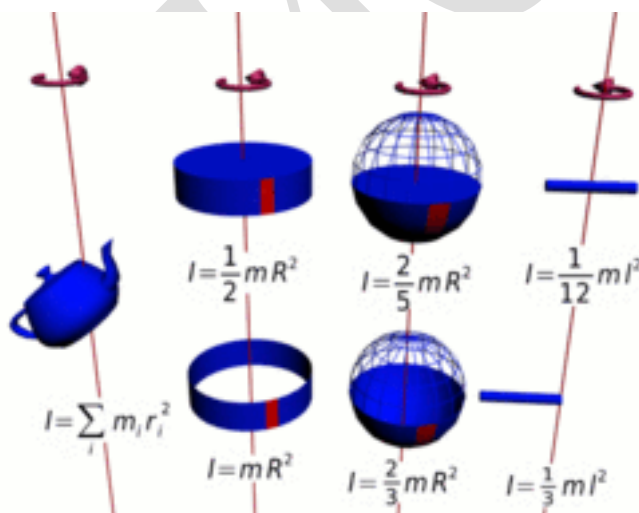
$$I = \quad .$$

За умов безперервного розподілення маси в тілі, момент інерції:

$$I = \quad ,$$

де  $dm$  – \_\_\_\_\_

В загальному випадку, значення моменту інерції тіла залежить від його форми та розподілу маси в об'ємі: чим більше маси сконцентровано далі від центра мас тіла, тим більшим є його момент інерції. Також значення моменту інерції тіла залежить від обраної осі обертання.



Якщо відомо момент інерції тіла відносно осі, що проходить через його центр мас, то момент інерції відносно іншої довільної паралельної їй осі, можна визначити за **теоремою Штейнера** (теоремою Гюйгенса-Штейнера), \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

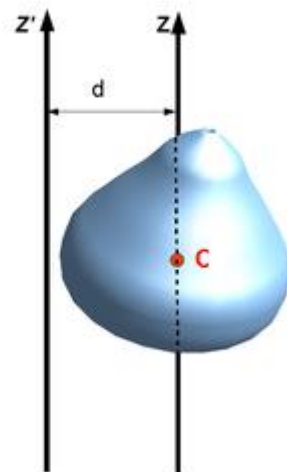
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

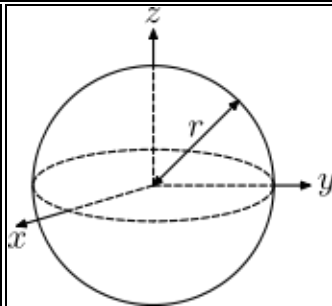
\_\_\_\_\_



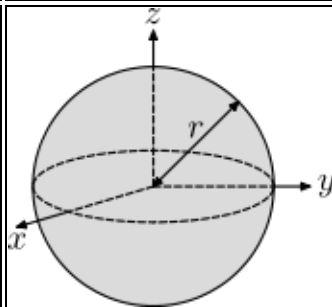
Описання фігури	Рисунок	Момент(и) інерції
Два точкові тіла масами $M$ і $m$ на відстані $x$ одне від одного		
Стержень довжиною $L$ і масою $m$ (вісь обертання проходить через один із кінців стержня)		
Стержень довжиною $L$ і масою $m$ (вісь обертання проходить через центр мас стержня перпендикулярно стержню)		
Тонке кільце радіусом $r$ і масою $m$		
Тонкий суцільний диск радіусом $r$ і масою $m$		
Порожнистий тонкостінний циліндр радіусом $r$ і масою $m$		
Суцільний циліндр радіусом $r$ , висотою $h$ і масою $m$		
Порожнистий циліндр (циліндрична труба) з внутрішнім радіусом $r_1$ , зовнішнім радіусом $r_2$ , довжиною $h$ і масою $m$		



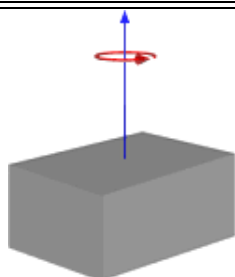
Пустотіла сфера  
радіусом  $r$  і масою  $m$



Суцільна куля радіусом  
 $r$  і масою  $m$



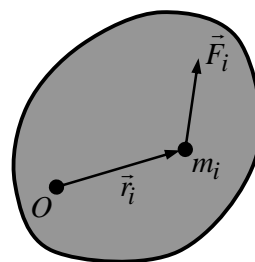
Суцільний прямокутний  
паралелепіпед висотою  
 $h$ , ширини  $w$ , глибиною  
 $d$ , маси  $m$



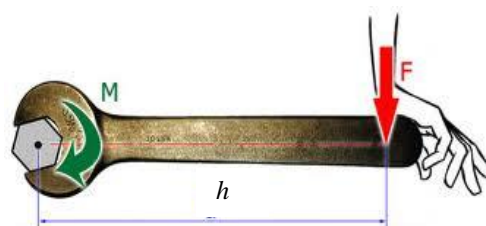
Будь-яке тіло завжди можна розглядати як систему з  $n$  матеріальних точок, причому маса  $m$  тіла дорівнює сумі мас усіх цих точок:

$$m = \sum_{i=1}^n m_i .$$

Положення  $i$ -ої точки твердого тіла в просторі повністю визначають радіус-вектором  $\vec{r}_i$ , проведеним від центру обертання твердого тіла  $O$  до даної точки (рис.),  $\vec{F}_i$  – рівнодійна всіх зовнішніх сил прикладених до  $i$ -ої точки тіла.



Для характеристики зовнішньої механічної дії на тіло, під дією якої здійснюється зміна обертального руху тіла, вводять поняття моменту сили і моменту імпульсу.



---



---



---



---

$$\vec{M} = \dots$$

Вектор  $\vec{M}_i$  направлений перпендикулярно до площини в якій розташовані вектори  $\vec{r}_i$  і  $\vec{F}_i$  (рис.).

Моментом сили відносно нерухомої осі  $Oz$  називають \_\_\_\_\_

---



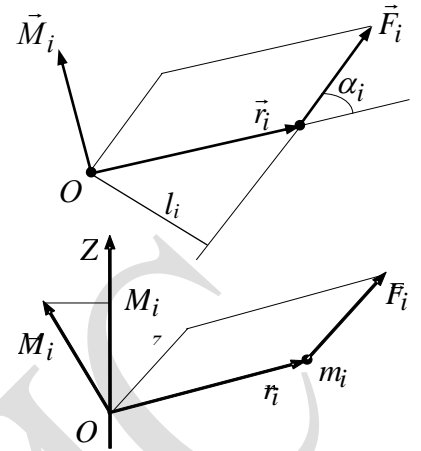
---



---



---



$$M = \dots,$$

де  $h = r \cdot \sin \alpha$  – плече (найкоротша відстань від осі обертання до лінії дії сили).

Значення моменту  $M_{iz}$  не залежить від вибору положення точки  $O$  на осі  $Oz$ .



### 3. Закон динаміки обертального руху

Оскільки момент сили рівний

$$M = F \cdot r \cdot \sin \alpha, \text{ то при } \alpha = \frac{\pi}{2} \text{ він дорівнюватиме}$$

$$M = F \cdot r \text{ або } M = ma \cdot r.$$

Замінімо  $a$  кутовим прискоренням  $\beta$ :

$$a = \beta \cdot r.$$

Тоді  $M = m\beta \cdot r^2$ , або, враховуючи, що  $mr^2 = J$ ,

$$M = J\beta.$$

Основний закон динаміки обертального руху: \_\_\_\_\_

---

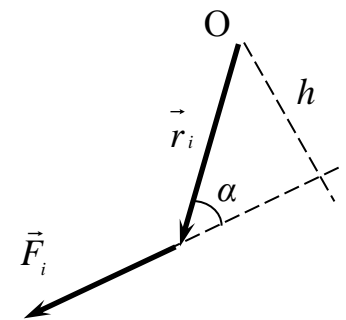


---



---

$$\vec{\beta} = \dots$$



#### 4. Умови рівноваги твердого тіла. Центр ваги. Види рівноваги

\_\_\_\_\_ вивчає *статика* ( від грец. *στατός* – “нерухомий”).

Більш детально умови рівноваги тіл у будівництві вивчають у курсах “Будівельна механіка” – вивчає стійкість будівельних конструкцій та “Будівельні машини та обладнання” – вивчає стійкість будівельних машин та обладнання під дією навантажень, що створюють моменти сил, здатні перекинути об’єкт (до основних навантажень відносять – піднімання, захвачування або перевезення вантажів, до додаткових – інерційні навантаження, що виникають в момент пуску, прискорення або гальмування механізмів; центробіжні навантаження, що виникають при повороті або нахилі частин механізмів; вітровий тиск або тиск атмосферних опадів тощо).



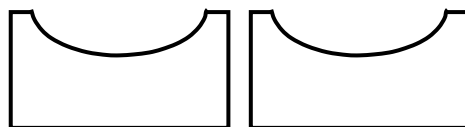
**Тіло буде залишатися в стані спокою**, якщо немає причин, що викликають його рух. Згідно основних рівнянь динаміки поступального і обертального рухів це можливо **за виконання умов:**

1) \_\_\_\_\_

2). \_\_\_\_\_

Для тіла, що має нерухому вісь обертання, можливі три **види рівноваги:**

1) *стійка рівновага* – \_\_\_\_\_



2) *нестійка рівновага* – \_\_\_\_\_



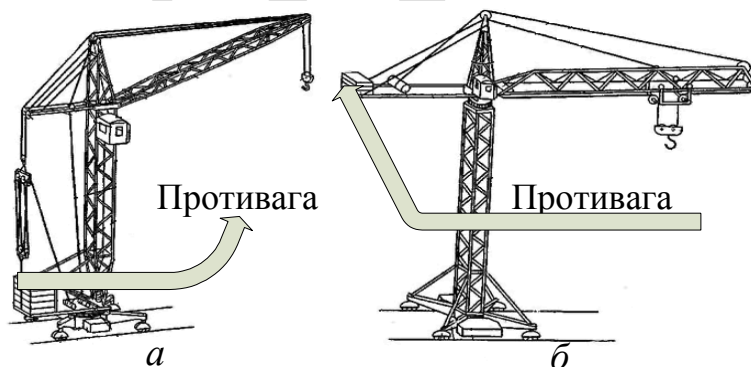
3) *байдужа рівновага* – \_\_\_\_\_



Якщо рівновага стійка, центр тяжіння кулі займає найнижче положення відносно опори. Якщо рівновага нестійка, центр тяжіння кулі займає найвище положення відносно опори. Тому положення стійкої рівноваги характеризується *мінімальною потенціальною енергією*.



Особливим випадком є рівновага тіла на опорі. У цьому випадку сила реакції опори прикладена не до однієї точки, а розподілена по площі основи тіла. Тіло знаходиться в рівновазі, якщо вертикальна лінія, проведена через центр мас тіла, проходить через площу опори, тобто всередині контуру, утвореного лініями, що з'єднують точки опори. Якщо ж ця лінія не перетинає площу опори, то тіло перекидається. З умови рівноваги тіла, яке опирається на декілька точок, стає зрозумілим, чому підйомні крани завжди обладнуються важкою противагою для підвищення їхньої стійкості проти перекидання. Дякуючи противазі спільний центр тяжіння, крана, вантажу та противаги не виступає за прямокутник, обмежений точками опори коліс, навіть тоді, коли кран піднімає важкий вантаж. На кранах з поворотною баштою (рис. а) противагу підвішують на поворотній платформі, на кранах з неповоротною баштою (рис. б) – на противажній консолі.



### 5. Момент імпульсу. Закон збереження моменту імпульсу

Для характеристики зовнішньої механічної дії на тіло, під дією якої здійснюється зміна обертального руху тіла, вводять поняття моменту сили і моменту імпульсу.



**Момент імпульсу**  $L$  відносно точки  $O$  – \_\_\_\_\_

---



---



---

$$\vec{L} = \quad , [L] = \quad ,$$

або

$$L = \quad ,$$

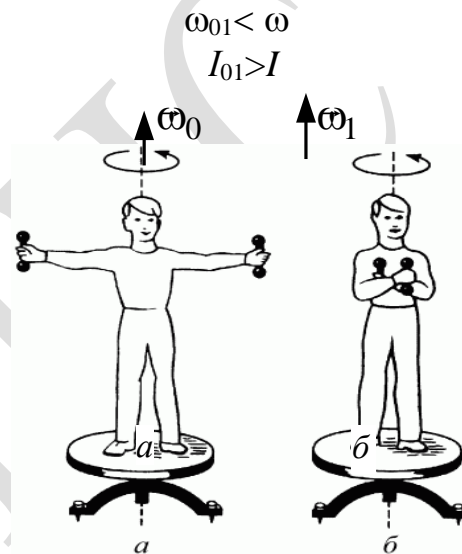
де  $\alpha$  – кут між векторами  $\vec{r}$  і  $\vec{v}$ .

$$\sum \vec{L}_i =$$

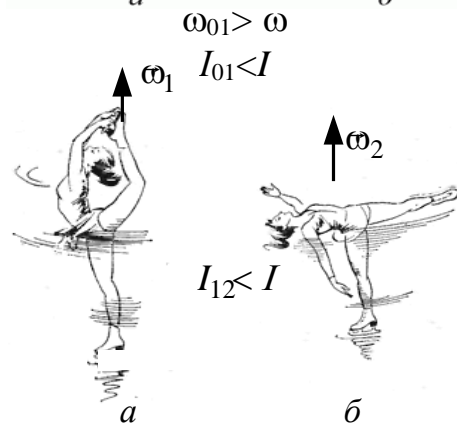
або оскільки  $v = \omega \cdot r$ , маємо  $L = m \cdot \omega \cdot r^2$ ;  $m \cdot r^2 = J$ ,  $L = J \cdot \omega$ , тоді

$$\sum \vec{L}_i =$$

Закон збереження моменту імпульсу можна продемонструвати на так званій лаві Жуковського, що представляє собою диск, який може вільно обертатися навколо вертикальної осі (рис.). Демонстратор на лаві, відштовхнувшись ногою від підлоги, надає їй обертального руху. Разом із лавою обертається і він сам. Знехтувавши силою тертя і опором повітря, можна вважати, що момент зовнішніх сил відносно осі обертання рівний нулю. Отже імпульс системи буде залишатися незмінним. Якщо демонстратор розведе руки з гантелями в сторони, то він збільшить момент інерції  $I$ , а тому кутова швидкість обертання  $\omega$  має зменшитися так, щоб залишився незмінним імпульс  $I\omega$ . Навпаки, при зведенні рук до осі обертання момент інерції зменшиться, а кутова швидкість обертання зросте.



Аналогічно можна пояснити обертання фігуристки (рис.). Коли фігуристка робить пірует, вона обертається на носку навколо вертикальної осі. Ноги та руки при цьому максимально наближені до осі, і кутова швидкість максимальна. Для уповільнення обертання фігуристка розводить руки та відводить ногу в сторону. Таким чином, вона управляє швидкістю обертання шляхом зміни моменту інерції свого тіла.



### 6. Уявлення про гіроскопи

**Гіроскоп** (від давн.-грец. γῦρος “коло” і σκοπέω “дивлюся”) – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

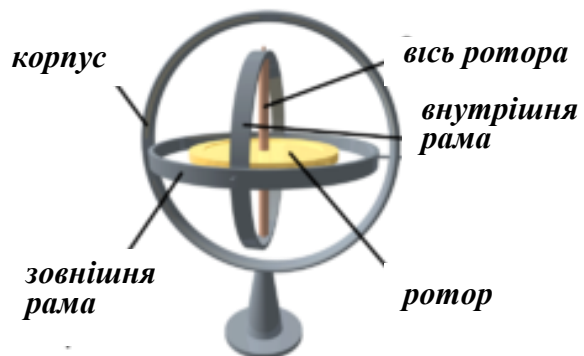
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



Гіроскоп має три характерні властивості:

1) стійкість положення головної осі в інерціальній системі: \_\_\_\_\_

---

---

---

2) прецесії: \_\_\_\_\_

---

---

---

3) нутації: \_\_\_\_\_

---

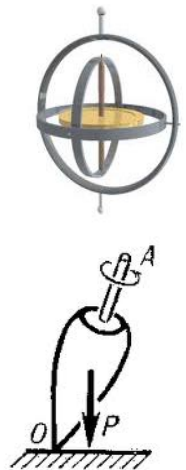
---

---

### **Класифікація гіроскопів**

1) за принципом дії:

- **механічні гіроскопи** поділяються на роторні та вібраційні. *Роторні гіроскопи* являють собою швидкообертове тверде тіло, вісь обертання якого може змінювати орієнтацію в просторі, при цьому швидкість обертання гіроскопа значно перевищує швидкість повороту осі обертання. Основна властивість такого гіроскопа – здатність зберігати у просторі незмінний напрямок осі обертання у відсутність дії на неї моментів зовнішніх сил. *Вібраційні гіроскопи* – пристрої, здатні зберігати свої коливання в одній площині при їх повороті, використовують для визначення зміни кута нахилу системи, наприклад система, що складається з п'яти вібраційних гіроскопів, дані яких опрацьовуються двома мікропроцесорами, використовують у мобільних пристроях:



- **оптичні гіроскопи** поділяють на *волоконно-оптичні* та *лазерні*. Принцип дії полягає у тому, що за різницею ходу променів світла спрямованих у напрямку обертання приладу і проти напрямку обертання приладу, визначають величину кутового повороту приладу за час ходу променів;

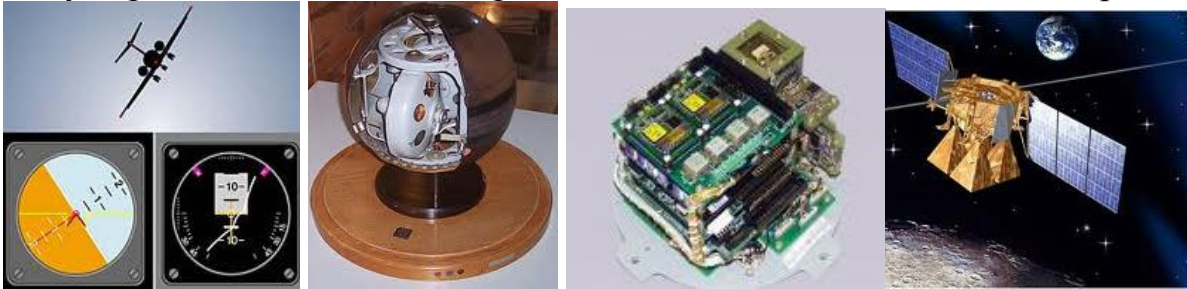


2) за режимом дії:

- датчики кутової швидкості;
- указники напрямку.

### Застосування гіроскопів:

- У техніці властивості гіроскопів використовують у приладах – гіроскопах, основною частиною яких є ротор, що швидко обертається і має декілька ступенів свободи (осей обертання), найчастіше розміщують у карданному підвісі. Використовують у вигляді компонентів в системах навігації (авіагоризонтах, гірокомпасах, інерціальних навігаційних системах тощо) та у неактивних системах орієнтації та стабілізації космічних апаратів.



- У воєнно-промисловому комплексі використовуються прецизійні гіроскопи (являють собою датчики для вимірювання і відтворення параметрів обертального руху об'єктів) – використовуються у системах наведення стратегічних ракет великої дальності.
- У приладобудуванні мікромеханічні гіроскопи використовуються у системах стабілізації, наприклад, автомобілів чи відеокамер.
- У новітніх розробках для: розвідки корисних копалин, передбачення землетрусів, надточні вимірювання положень шляхів залізниці та нафтошляхів, у медичній техніці тощо.
- У смартфонах та ігрових приставках. Гіроскоп дає програмі дані про орієнтацію смартфона чи джойстика відносно реального простору, а програма пов'язує ці дані з віртуальним світом, екран смартфона чи ігрової приставки – це вікно у віртуальний світ. Наприклад, 3D-грі, користувач, переміщуючи смартфон чи мобільну ігрову консоль, бачить інші сторони ігрової – віртуальної реальності: піднімаючи пристрій вгору користувач побачить віртуальне небо, а опускаючи вниз – віртуальну землю, повертаючи у боки – може озирнутися навкруги – всередині віртуального світу.
- Іграшки на основі гіроскопу. Найпростішими прикладами іграшок, зроблених на основі гіроскопу є йо-йо, дзига, іграшкові моделі гелікоптерів. Крім того, існують спортивні гіроскопічні тренажери.



# Лекція № 5

## Енергія, робота та потужність. Закон збереження енергії

1. Енергія, робота та потужність
2. Кінетична енергія поступального та обертального рухів
3. Потенціальна енергія
4. Гравітаційне поле та його характеристики. Потенціальна енергія матеріальної точки у гравітаційному полі
5. Потенціальні сили та консервативні системи
6. Закон збереження енергії у механіці

### 1. Енергія, робота та потужність

Енергія – \_\_\_\_\_

---



---



---

$$[E] = \dots$$

Робота – \_\_\_\_\_

---



---



---

$$A = \dots$$

$$[A] = \dots$$

Для змінної сили робота дорівнює:

$$dA = \dots \text{ або } A_{12} = \dots$$

Потужність – \_\_\_\_\_

---



---



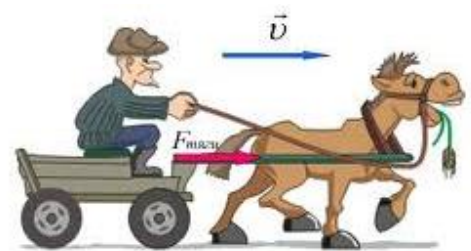
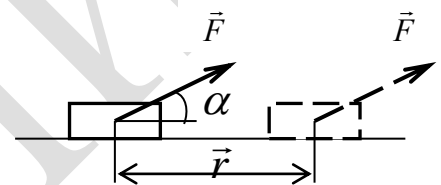
---

$$N = \dots \text{ або } N = \dots$$

$$[N] = \dots$$

Якщо система мала у першому стані 1 енергію  $E_1$  і переходить у стан 2 з енергією  $E_2$ , то  $A_{12} = E_1 - E_2$ , тобто \_\_\_\_\_

---





## 2. Кінетична енергія поступального та обертального рухів

Кінетична енергія – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



Кінетична енергія тіла, що здійснює поступальний рух:

$$E_{\text{кпост}} = \dots$$

Оскільки лінійна і кутова швидкості пов'язані залежністю  $v = \omega \cdot r$ , тоді

$$E_{\text{к}} =$$

або, якщо врахувати, що  $mr^2 =$  \_\_\_\_\_, можна отримати формулу кінетичної енергії тіла при обертальному русі:

$$E_{\text{кобер}} = \dots$$

Повна кінетична енергія тіла, що здійснює одночасно і поступальний і обертальний рухи:

$$E_{\text{к}} = \dots$$



## 3. Потенціальна енергія

Потенціальна енергія – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

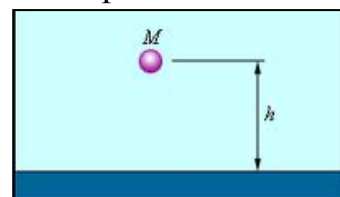


Так для системи тіло-земля потенціальна енергія тіла дорівнює:

$$E_n = \dots,$$

де  $h$  – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

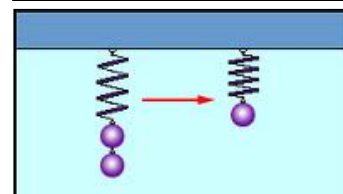


Потенціальну енергію пружно деформованого тіла (наприклад, деформованої пружини) визначають формулою:

$$E_n = \dots,$$

де  $k$  – \_\_\_\_\_

$x$  – \_\_\_\_\_



#### 4. Гравітаційне поле та його характеристики. Потенціальна енергія матеріальної точки у гравітаційному полі

Англійський фізик Ісаак Ньютон, вивчаючи рух небесних тіл, дійшов висновку, що \_\_\_\_\_



\_\_\_\_\_

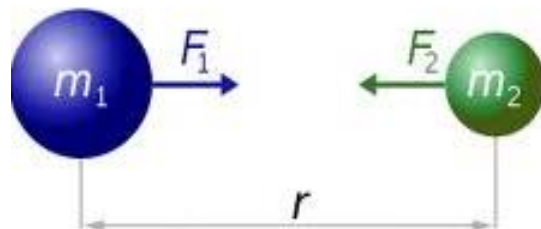
\_\_\_\_\_

$$F = \quad ,$$

де  $G =$  \_\_\_\_\_ – гравітаційна стала,

$m_1$  і  $m_2$  – \_\_\_\_\_

$r$  – \_\_\_\_\_



Гравітаційна взаємодія між тілами передається через **гравітаційне поле** – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Для характеристики гравітаційного поля вводять два параметри:

- 1) силову характеристику – \_\_\_\_\_;
- 2) енергетичну характеристику – \_\_\_\_\_.

1) *Напруженість гравітаційного поля  $E$*  – це \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

$$\vec{E} = \quad ,$$

так як  $F = G \frac{mm_0}{r^2}$ , то  $E = G \frac{m}{r^2}$ .

Оскільки сила, з якою Земля притягує до себе тіла поблизу своєї поверхні дорівнює  $F = mg$ , а з іншого боку за законом всесвітнього тяжіння

$F = G \frac{M_3 m}{R_3^2}$ , то  $mg = G \frac{M_3 m}{R_3^2}$  і  $g = G \frac{M_3}{R_3^2}$ . Звідси слідує,

що напруженість гравітаційного поля Землі чисельно дорівнює \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

$$E_{\text{землі}} = \quad .$$



$$\varphi = \dots$$

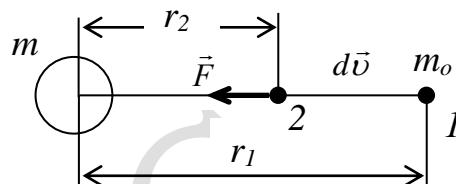
Розглянемо чому дорівнює робота по переміщенню тіла пробної маси  $m_0$  з точки 1 у точку 2 поля тяжіння тіла масою  $m$  (рис.).

Елементарна робота дорівнює  $dA = F ds$ ,

де  $F = G \frac{mm_0}{r^2}$ , тобто є функцією відстані  $r$ .

Отже:

$$dA = G \frac{mm_0}{r^2} dr.$$



Проінтегрувавши даний вираз в межах від  $r_1$  до  $r_2$  отримаємо повну роботу

$$A_{12} = \int_{r_2}^{r_1} G \frac{mm_0}{r^2} dr = -G \left( \frac{mm_0}{r_2} - \frac{mm_0}{r_1} \right), \quad A_{12} = G \frac{mm_0}{r_1} - G \frac{mm_0}{r_2}.$$

З іншого боку, виконана над тілом робота дорівнює зміні його потенціальної енергії:

$$A_{12} = E_{n_1} - E_{n_2},$$

Потенціальна енергія тіла масою  $m_0$  у полі тяжіння Землі дорівнює:

$$E_n = \dots$$

Тоді потенціал гравітаційного поля у даній точці дорівнюватиме:

$$\varphi = \dots$$

Потенціал  $\varphi$  і напруженість гравітаційного поля  $E$  пов'язані між собою рівнянням:

де знак “-” показує, що вектор напруженості поля  $\vec{E}$  протилежно направлений до зростання потенціалу  $d\varphi$ , величину  $\frac{d\varphi}{dr}$  називають

градієнтом потенціалу, вона показує зміну потенціалу з одиницею довжини.

У математиці вводять оператор  $\overrightarrow{\text{grad}} \varphi = \vec{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial \varphi}{\partial z}$ , тобто:

$$-\text{grad } \varphi = \dots$$

Гравітаційні сили порівняно слабкі. Наприклад, вони значно слабкіші за електричні. Однак сили гравітації стають відчутними для космічних тіл великих мас: планет, зірок, і відіграють основну роль в формуванні зір і планетних систем із туманностей тощо. Справедливість закону всесвітнього тяжіння можна побачити на рисунку, де зображено одне з найкрасивіших небесних видовищ – кульове зоряне скупчення M13 у сузір'ї Геркулес, кожна точка якого – це зоря.



## 5. Потенціальні сили та консервативні системи

називають *консервативною* або *потенціальною силою*, якщо \_\_\_\_\_

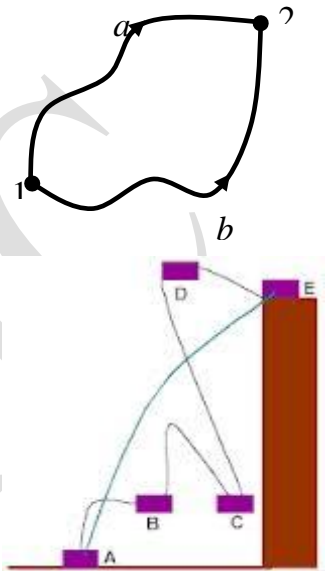
\_\_\_\_\_:

$$A_{1-a-2} = A_{1-b-2} = A_{1-2}.$$

Зміна напрямку руху вздовж траєкторії на протилежний спричинює зміну знака роботи (кут  $\alpha$  замінюється на  $\pi - \alpha$  і  $\cos \alpha$  змінює свій знак). Тому робота консервативної сили при переміщенні матеріальної точки вздовж замкненої траєкторії  $L$  (1-a-2-b-1) тотожно дорівнює нулю:

$$\oint_L (\vec{F}, d\vec{r}) = A_{1-a-2} + A_{2-b-1} = \dots$$

Прикладами консервативних сил можуть бути сили тяжіння, гравітаційні сили, сили пружності, сили електростатичної взаємодії між зарядженими тілами. Прикладами неконсервативних сил є сили тертя, сили опору середовища.



\_\_\_\_\_ називають *консервативними системами* (у них можуть відбуватися тільки перетворення кінетичної енергії в потенціальну і навпаки в еквівалентних кількостях, так що повна механічна енергія залишається сталою).

*Дисипативні системи* – це системи, в яких \_\_\_\_\_

(у системі, в якій діють такі неконсервативні сили, наприклад сили тертя, повна механічна енергія системи не зберігається, але при цьому завжди виникає еквівалентна кількість енергії іншого виду).

## 6. Закон збереження енергії у механіці

Повна енергія тіла (або системи тіл) складається \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

---

---

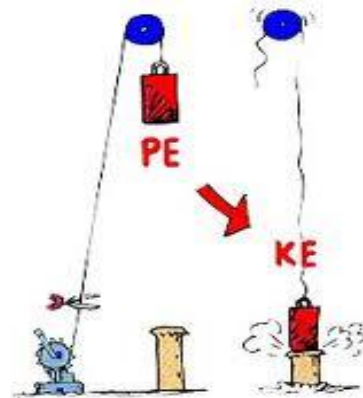
---



\_\_\_\_\_ – закон збереження механічної енергії.

Для системи, в якій відсутні сили тертя або опору (консервативна система), сума кінетичної і потенціальної енергії є величиною сталою – **закон збереження механічної енергії для консервативних систем:**

або



**Лекція № 6**  
**Елементи механіки суцільних середовищ**

- 1. Механічні властивості твердих тіл, рідин та газів**
- 2. Види деформацій, пружність та повзучість. Закон Гука**
- 3. Ламінарна та турбулентна течії**
- 4. Сили в'язкого тертя**
- 5. Рівняння неперервності та Бернуллі. Течія рідин та газів по трубах**
- 6. Рух твердих тіл у рідинах та газах. Підймальна сила крила літака**

**1. Механічні властивості твердих тіл, рідин та газів**

Окрім механіки матеріальної точки та механіки твердого тіла існує ще і механіка суцільних середовищ.

*Суцільним* вважають *середовище*, що \_\_\_\_\_

---

---

---

*Механіка суцільних середовищ* – \_\_\_\_\_

---

---

Механіку суцільних середовищ поділяють на:

1) *механіку деформованого твердого тіла* – \_\_\_\_\_

---

---

---

• теорію пружності – \_\_\_\_\_

---

---

• теорію пластичності – \_\_\_\_\_

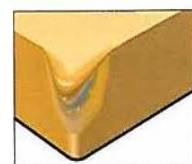
---

---

• механіку руйнування – \_\_\_\_\_

---

---



2) *механіку рідин та газів* – \_\_\_\_\_

---

---

---

## 2. Види деформацій, пружність та повзучість. Закон Гука

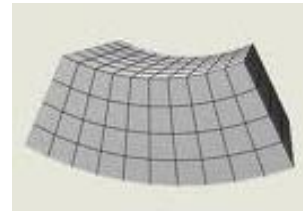
**Деформація** (від лат. *deformatio* – “спотворення”) –

---

---

---

---



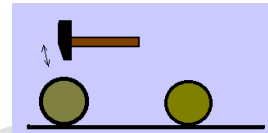
В залежності від поведінки тіла після зняття навантаження розрізняють такі **типи деформацій**:

- **Пружна** (або **оборотна**) **деформація** – \_\_\_\_\_

---

---

---



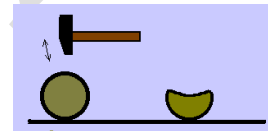
Пружні деформації спостерігаються у тому випадку, коли напруження (сила віднесена до одиниці площі), що зумовлює деформацію, не перевищує деяку, визначену для кожної речовини, межу – *межу пружності*. Деякі речовини (метали, каучук) можуть зазнавати значної пружної деформації, в той час як у інших (кераміки, пресовані матеріали) навіть незначна деформація перестає бути пружною.

- **Пластична** (або **залишкова** чи **необоротна**) **деформація** – \_\_\_\_\_

---

---

---



Природа пластичної деформації може бути різною в залежності від температури, тривалості дії навантаження або швидкості деформації. **Пластичність** – \_\_\_\_\_

**Крихкість** – \_\_\_\_\_

**Повзучість** – \_\_\_\_\_

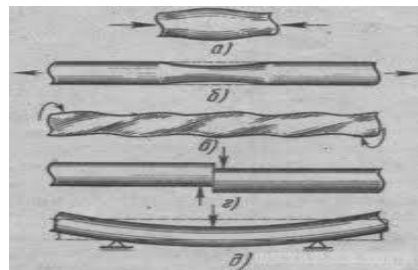
---

---

На теорії пластичних деформацій засновані такі технологічні процеси обробки матеріалів, як “обробка металів тиском” або холодна обробка металів, а саме: прокатка, пресування, штампування, ковка тощо.

**За зміною форми** розрізняють такі основні **види деформацій**:

- 1) деформація розтягу (рис. б) або стиску (рис. а),
- 2) деформація зсуву (рис. г),
- 3) деформація кручення (рис. в),
- 4) деформація згину (рис. д).

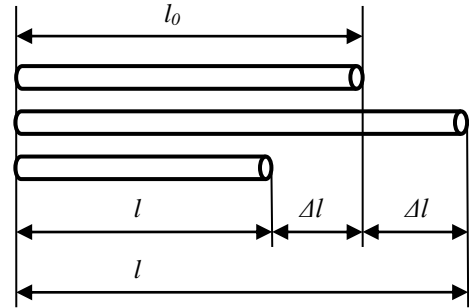


Під час деформації тіла відбувається зміщення його частинок (атомів або молекул) відносно положень рівноваги в інші положення. Цим зміщенням протидіють сили взаємодії між частинками, що діють між окремими частинами деформованого тіла і намагаються повернути тіло в стан рівноваги – *внутрішні сили* або *внутрішнє напруження*.

$$\sigma = \dots$$

Основним видом деформації є *деформація розтягу* або *стиску*, при якій тіло зазнає зміни довжини. Зміну довжини деформованого тіла називають **абсолютною деформацією**:

$$\Delta l = \dots$$



Оскільки абсолютна деформація не вказує, яку частину становить зміна довжини від початкової, то мірою деформації тіла є його **відносна деформація**:

$$\varepsilon = \dots$$

при розтягу  $\varepsilon$  , а стиску –  $\varepsilon$  .

Експериментально встановлено, що при невеликих послідовно зростаючих навантаженнях \_\_\_\_\_

– закон Гука:

$$\sigma = \dots$$

де  $E$  – \_\_\_\_\_

При деформаціях розтягу або стиску відбувається також зміна поперечних розмірів тіла, яку характеризують **відносним поперечним стиском** або **розтягом**:

$$\varepsilon_{\perp} = \dots$$

Відношення відносної поперечної деформації тіла до відносної повздовжньої деформації називають \_\_\_\_\_

$$\mu = \dots$$

Числове значення коефіцієнта Пуассона лежить у межах:  $0 < \mu \leq 0,5$ . Для ізотропних матеріалів, що мають однакові механічні властивості за всіма напрямками  $0,25 < \mu \leq 0,33$ , зокрема, для металів  $\mu = 0,3$ ; для гуми  $\mu = 0,5$ ; для пористих матеріалів (наприклад, коркової винної пробки)  $\mu \approx 0$ . Але навіть незначного зменшення діаметру при видовженні пробки достатньо, щоб більш-менш легко вийняти її штопором із пляшки.

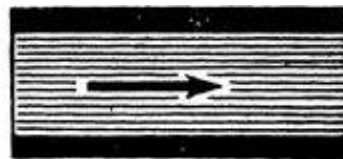




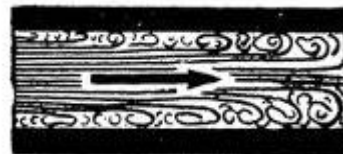
### 3. Ламінарна та турбулентна течії

Рух рідин називають \_\_\_\_\_, а сукупність частинок рідини, які рухаються – \_\_\_\_\_. Для графічного зображення руху рідини вводять поняття \_\_\_\_\_ – ліній, дотичні до яких у кожній точці співпадають з вектором швидкості потоку. Лінії проводять таким чином, щоб густина їх була пропорційною до швидкості потоку. Частину рідини, яка обмежена лініями течії називають \_\_\_\_\_.

*Ламінарною течією* називають течію в якій



\_\_\_\_\_,  
*турбулентною течією* називають течію в якій



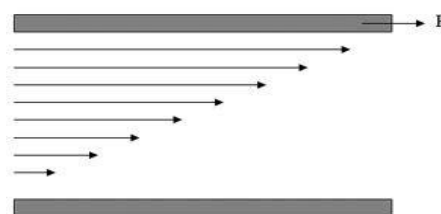
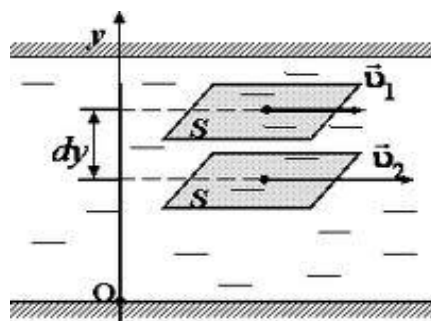
*Число Рейнольдса* \_\_\_\_\_



### 4. Сили в'язкого тертя

*В'язкість (внутрішнє тертя)* – \_\_\_\_\_

Механізм виникнення в'язкості зумовлена переносом імпульсу ( $m\bar{v}$ ) направленою руху від одного шару рідини чи газу до іншого. В реальних рідинах і газах між молекулами існують сили взаємного притягання і відштовхування. При взаємному зміщенні одного шару речовини відносно іншого відстані між молекулами шарів збільшуються, тобто починають діяти сили взаємного притягання. З боку більш швидкого шару починає діяти сила, що прискорює менш швидкий шар, а з боку повільних шарів рідини або газу діють сили, що гальмують рух швидких шарів.



Але виникнення в'язкості в рідинах і газах має й відмінності. У газах це явище зумовлене тільки обміном молекул на межі двох шарів (власне дифузією), в той час як в рідинах до подібного механізму обміну імпульсом додається ще й обмін імпульсом внаслідок безпосередньої взаємодії молекул на межі двох сусідніх шарів. Відмінність процесів переносу проявляється різною залежністю в'язкого тертя від температури. У газах унаслідок підвищення температури в'язкість завжди зростає, а в рідинах вона, найчастіше, спочатку спадає, оскільки зменшується міжмолекулярна взаємодія між молекулами, а потім зростає внаслідок дифузійного процесу.

Під час переміщення одних шарів реальної рідини (газу) відносно інших виникають сили внутрішнього тертя, спрямовані вздовж дотичної до поверхні цих шарів, які визначають **законом Ньютона для в'язких рідин**:

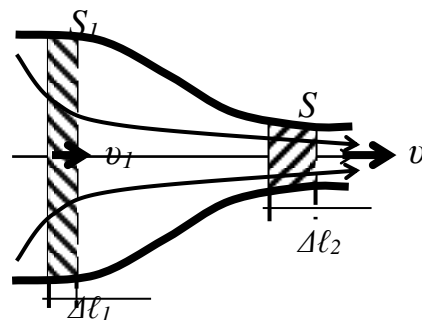
$$F = \eta S \frac{dv}{dy},$$

де  $F$  – \_\_\_\_\_  
 $\frac{dv}{dy}$  – \_\_\_\_\_  
 $S$  – \_\_\_\_\_  
 $\eta$  – \_\_\_\_\_

### 5. Рівняння неперервності та Бернуллі. Течія рідин та газів по трубах

Якщо потік рідини змінює площу свого перерізу (див. рис.), то за час  $\Delta t$  рідина у трубці площею перерізу  $S_1$  пройде шлях  $\Delta \ell_1$ , а площею  $S_2$  – шлях  $\Delta \ell_2$ . Об'єми рідин  $\Delta V_1$  і  $\Delta V_2$  будуть дорівнювати відповідно:

$$\Delta V_1 = S_1 v_1 \Delta t \quad \text{і} \quad \Delta V_2 = S_2 v_2 \Delta t$$



Оскільки рідини мало стисливі, то об'єми  $\Delta V_1$  і  $\Delta V_2$  будуть рівними

$$\Delta V_1 = \Delta V_2$$

або

$$s_1 v_1 \Delta t = s_2 v_2 \Delta t.$$

Скоротивши значення часу отримаємо **рівняння неперервності** для стаціонарної течії ідеальної рідини:

З рівняння неперервності для стаціонарної течії ідеальної рідини випливає, що \_\_\_\_\_

Цю залежність широко використовують для отримання сильного та далекобійного струменя рідини, наприклад, у брандспойтах для гасіння пожеж; у гідрорізаках для видобування, розрізування та обробки будівельних матеріалів; у системах поливу або пристроях для розпилення рідин (у зволожувачах повітря, розпилювачах фарб) тощо.

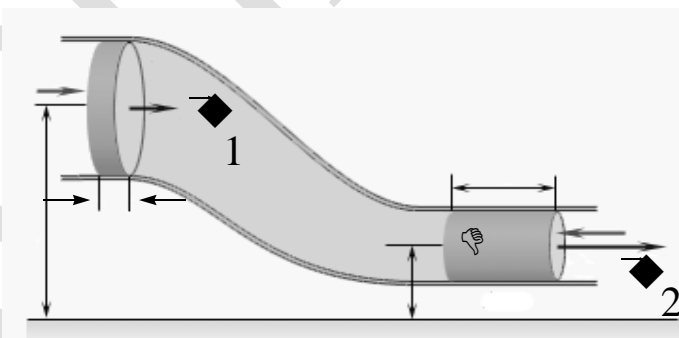


Якщо ділянки труби розташовані на різних висотах, то прискорення рідини виникає завдяки сукупній дії сили тиску та сили тяжіння. Оскільки рідина є ідеальною, тобто вона тече по трубі без тертя, то до її течії можна застосувати закон збереження механічної енергії.

При переміщенні рідини сили тиску виконують роботу:

$$A =$$

При стаціонарній течії зміни, що відбулися за час  $\Delta t$  у виділеній частині рідини зводяться до переміщення маси рідини  $\Delta m$  з однієї частини труби перерізом  $S_1$  в іншу частину перерізом  $S_2$  (заштриховані об'єми на рис.). Закон збереження механічної енергії для цієї маси має вигляд:



$$E_1 - E_2 = A,$$

де  $E_1$  і  $E_2$  – повні механічні енергії рідини масою  $\Delta m$  у полі тяжіння Землі:

$$E_1 =$$

$$E_2 =$$

Оскільки робота сил тиску призводить до зміни повної механічної енергії, то із попередніх рівнянь можна отримати співвідношення, яке називають **рівнянням Бернуллі**:

де  $\rho$  – \_\_\_\_\_

$v_1$  і  $v_2$  – \_\_\_\_\_

$h_1$  і  $h_2$  – \_\_\_\_\_

$\frac{\rho v^2}{2}$  – \_\_\_\_\_

$\rho gh$  – \_\_\_\_\_

$p$  – \_\_\_\_\_

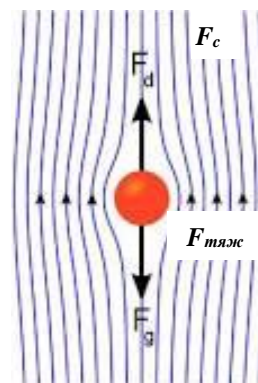
З рівняння Бернуллі випливає, що \_\_\_\_\_

## 6. Рух твердих тіл у рідинах та газах. Підймальна сила крила літака

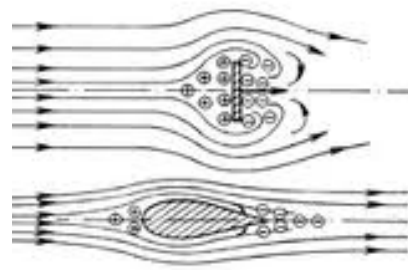
Під час руху тіла у рідині або газі, на нього з боку середовища діє **сила лобового опору** – сила \_\_\_\_\_



Якщо сферичне радіусом  $r$  тіло рухається у ламінарному потоці рідини або газу і сила в'язкого тертя прямо пропорційна його швидкості, то **силу в'язкого тертя** визначають **формулою Стокса**:



При великих швидкостях руху тіл у потоці рідини або газу, позаду тіла, відбувається відрив ліній течії, виникають вихрі, що призводить до інтенсивних турбулентних рухів (рис.). Для тіла сферичної форми **силу лобового опору** визначають за формулою:

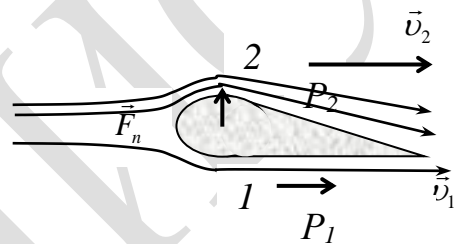


де  $C_x$  – \_\_\_\_\_  
 $S$  – \_\_\_\_\_

При обтіканні такого тіла потік добре замикається позаду нього, заважаючи, тим самим, падінню тиску за тілом.



Розглянемо приклад застосування рівняння Бернуллі для визначення підйомної сили крила літака. На рис. показано потік повітря навколо крила літака. Запишемо рівняння Бернуллі для нижньої і верхньої точок крила 1 і 2:

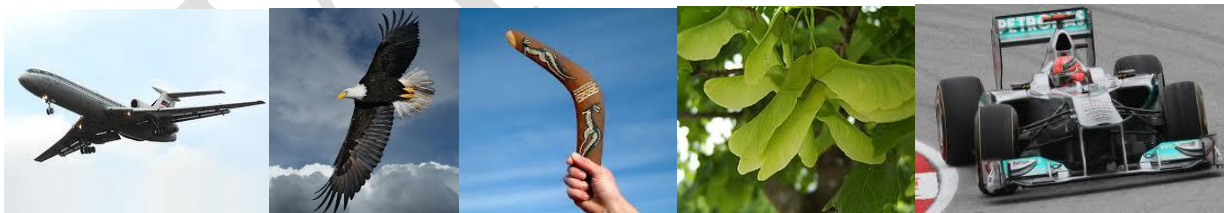


$$\frac{\rho v_1^2}{2} + \rho g h_1 + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + \rho g h_2 + p_2.$$

Так як  $h_1 \approx h_2$  (товщина крила невелика), то рівняння набуває вигляду:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2.$$

Оскільки  $v_2 > v_1$ , то  $p_1 > p_2$  і результуюча сила, яка діє на крило, буде направлена вгору. Цю силу називають \_\_\_\_\_

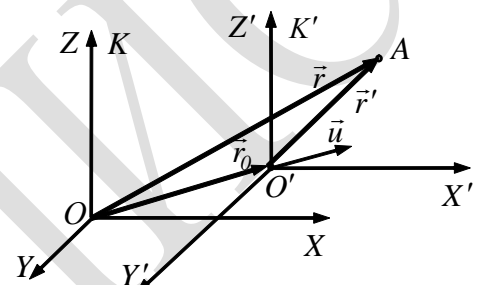


Елементи спеціальної теорії відносності  
(тема для самостійного опрацювання студентами)

1. Перетворення координат Галілея та їх інваріанти. Принцип відносності в класичній механіці
2. Передумови спеціальної теорії відносності
3. Постулати Ейнштейна
4. Перетворення координат Лоренца
5. Релятивістський закон додавання швидкостей. Відносність довжин та проміжків часу. Інтервал між подіями
6. Релятивістський імпульс. Основний закон релятивістської динаміки. Взаємозв'язок маси та енергії
7. Границі застосовності класичної механіки

1. Перетворення координат Галілея та їх інваріанти. Принцип відносності в класичній механіці

Якщо інерціальна нерухома система  $K'$  рухається відносно системи  $K$  рівномірно і прямолінійно із швидкістю  $\vec{u}$  (рис.) то  $\vec{r}_0 = \vec{u}t$ . Відлік часу починають з моменту, коли початки координат обох систем збігаються.



Зв'язок між координатами довільної точки  $A$  в обох системах називають

\_\_\_\_\_:

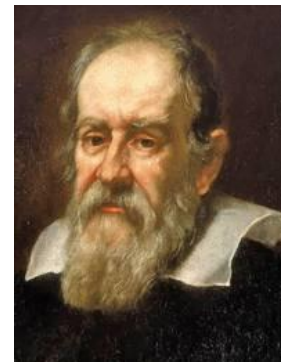
$$\vec{r} = \quad ,$$

або в проєкціях на осі координат:

$$x = \quad ,$$

$$y = \quad ,$$

$$z = \quad .$$



У класичній механіці передбачається, що хід часу не залежить від відносного руху систем відліку:

$$t = t' .$$

Записані вище співвідношення мають місце лише в класичній механіці ( $u \ll c$ ).

Отримаємо правило додавання швидкостей в класичній механіці:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \quad ,$$

$$\vec{v} = \quad .$$

## Прискорення в системі відліку K

$$\vec{a} = \quad \quad \quad = \vec{a}'.$$

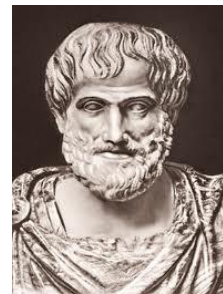
Сила  $\vec{F}$ , що діє на частинку в системі  $K$ , збігається з силою  $\vec{F}'$ , що діє на частинку в системі  $K'$ :  $\vec{F} = \vec{F}'$ . Це пов'язано з тим, що сила залежить від відстані між даною частинкою і частинками, які діють на неї або їх відносними швидкостями руху, а вони в ньютонівській механіці вважаються однаковими у всіх інерціальних системах, як і маса.



– механічний принцип відносності.

## 2. Передумови спеціальної теорії відносності

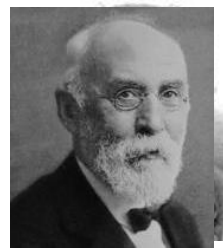
Принцип відносності вперше був сформульований Галілеєм. Відкидаючи застарілу концепцію руху Аристотеля, він стверджував, що рух, принаймні рівномірний та прямолінійний, відбувається “відносно чогось”, і немає ніякої абсолютної системи відліку, відносно якої можна було б відштовхуватись в проведенні фізичних вимірювань. Галілей сформулював певний набір перетворень, які дозволяли переходити між системами відліку, та отримали назву перетворень Галілея.



Після Галілея Ньютон сформулював свої три закони, які добре пояснювали рух матеріальних тіл, але не пояснювали рух світла, природа якого на той час була не відома. Ньютон вірив, що світло є “корпускулярним”, тобто складається з частинок, але пізніше фізики зрозуміли, що модель поперечних світла хвиль дозволяє пояснити природу світла. Аналогічно тому, як механічні хвилі розповсюджуються в певному середовищі, так і хвилі світла повинні були мати його для свого розповсюдження. Це гіпотетичне середовище отримало назву “світлового ефіру”. Ідея ефіру була, в якомусь розумінні, відродженням ідеї абсолютної системи відліку – стаціонарної відносно ефіру.



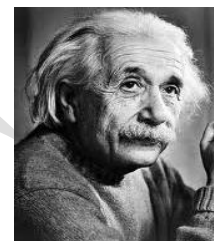
На початку XIX століття, світло, електрику та магнетизм стали розуміти як різні аспекти електромагнітного ефірного поля. Рівняння Максвелла доводили, що рух заряджених об'єктів продукує електромагнітне випромінювання, швидкість розповсюдження якого завжди є



швидкістю світла. Ці рівняння базувалися на ідеї існування ефіру, в якому швидкість розповсюдження такого випромінювання не змінюється зі зміною швидкості джерела. Зрозуміло, що фізики намагались виміряти швидкість Землі відносно ефіру. Результати цих експериментів зійшлись в одному: швидкість світла не змінюється зі зміною швидкості спостерігача, тобто має бути інваріантною для всіх спостерігачів.

Ще до появи СТВ, Хендрік Лоренц та інші помітили, що прояви електромагнітного поля можуть бути різними в залежності від стану спостерігача. Наприклад, один спостерігач може не спостерігати магнітного поля, а інший спостерігач, який рухається відносно першого, може.

Коли Лоренц запропонував свої правила перетворень, як альтернативу Галілеєвим, завданням Ейнштейна було вивести їх із фундаментальних закономірностей без урахування існування ефіру. А.Ейнштейн намагався встановити, що є інваріантним відносно кожного спостерігача. В спеціальній теорії відносності формули перетворень Лоренца виводяться просто з основ геометрії та теореми Піфагора. Оригінальна теорія була опублікована в праці “До електродинаміки тіл, що рухаються” (1905). Термін “відносність” був запропонований Максом Планком для визначення процесів зміни фізичних законів для спостерігачів, які рухаються один відносно одного.



### 3. Постулати Ейнштейна

*Спеціальна теорія відносності* – це \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

---

---

---



В основі спеціальної теорії відносності лежать *два постулати Ейнштейна*:

I. *Принцип відносності*: \_\_\_\_\_

---



---



---



---



---

II. *Принцип інваріантності швидкості світла*: \_\_\_\_\_

---



---



---

#### 4. Перетворення координат Лоренца

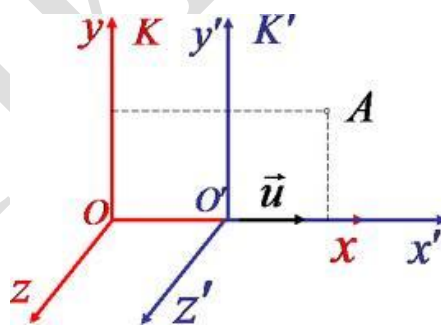
Розглянемо дві інерціальні системи відліку:  $K$  і  $K'$ , яка рухається відносно  $K$  вздовж осі  $Ox$  зі швидкістю  $\vec{u}$  (див. рис.). Нехай в початковий момент часу  $t = t' = 0$ , коли початки  $O$  і  $O'$  збігаються, випромінюється світловий імпульс. Швидкість світла в обох системах одна і та сама і дорівнює \_\_\_\_\_. Тому, якщо за час  $t$  в системі  $K$  сигнал дійде до деякої точки  $A$ , пройшовши відстань

$$x = \dots,$$

то в системі  $K'$  координата світлового імпульсу в момент досягнення точки  $A$

$$x' = \dots.$$

$$x' - x = \dots.$$



Оскільки  $x' \neq x$ , тому що система  $K'$  переміщується відносно системи  $K$ , то  $t' \neq t$ . В результаті відлік часу має \_\_\_\_\_ характер.

Ейнштейн показав, що в теорії відносності перехід від однієї інерціальної системи відліку до іншої описується перетвореннями Лоренца:

$$x = \dots, \quad y = \dots, \quad z = \dots, \quad t = \dots;$$

$$x' = \dots, \quad y' = \dots, \quad z' = \dots, \quad t' = \dots;$$

де  $\beta = \frac{u}{c}$ .

Перетворення Лоренца переходять у перетворення Галілея, якщо  $u \ll c$ .

## 5. Релятивістський закон додавання швидкостей. Відносність довжин та проміжків часу. Інтервал між подіями

Розглянемо рух матеріальної точки в системі  $K'$ , яка рухається відносно системи  $K$  із швидкістю  $u$ . Якщо в системі  $K$  рух точки в кожний момент часу  $t$  визначається координатами  $x, y, z$ , а в системі  $K'$  в момент часу  $t'$  – координатами  $x', y', z'$ , то

$$v_x = \frac{dx}{dt}, v_y = \frac{dy}{dt}, v_z = \frac{dz}{dt},$$
$$v'_x = \frac{dx'}{dt'}, v'_{y'} = \frac{dy'}{dt'}, v'_{z'} = \frac{dz'}{dt'}$$

є проєкціями вектора швидкості точки відносно систем  $K$  і  $K'$  на відповідні координатні осі.

Використаємо перетворення Лоренца

$$dx = \frac{dx' + u dt'}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

$$dy = dy',$$

$$dz = dz',$$

$$dt = \frac{dt' + \frac{u}{c^2} dx'}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

$$\beta = \frac{u}{c}.$$

Розділимо перші три рівності на четверту:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{dx' + u dt'}{dt' + \frac{u}{c^2} dx'},$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dy'}{dt' + \frac{u}{c^2} dx'},$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{dz'}{dt' + \frac{u}{c^2} dx'}.$$

В результаті отримуємо формули перетворення швидкостей при переході від однієї системи відліку до іншої:

$$v_x = \frac{v'_x + u}{1 + \frac{v'_x u}{c^2}}, \quad v_y = \frac{v'_y}{\gamma \left(1 + \frac{v'_x u}{c^2}\right)}, \quad v_z = \frac{v'_z}{\gamma \left(1 + \frac{v'_x u}{c^2}\right)}.$$

Аналогічно

$$v'_{x'} = \frac{v_x - u}{1 - \frac{v_x u}{c^2}}, \quad v'_{y'} = \frac{v_y}{\gamma \left(1 - \frac{v_x u}{c^2}\right)}, \quad v'_{z'} = \frac{v_z}{\gamma \left(1 - \frac{v_x u}{c^2}\right)}.$$

Якщо матеріальна точка рухається паралельно осі  $Ox$ , то швидкість  $v$  відносно системи  $K$  збігається з  $v_x$ , а швидкість  $v'$  відносно  $K'$  – з  $v'_{x'}$ .  
Тоді

$$v = \frac{v' + u}{1 + \frac{v' u}{c^2}}, \quad v' = \frac{v - u}{1 - \frac{v u}{c^2}}.$$

Якщо швидкості  $v$ ,  $v'$  і  $u$  малі порівняно з швидкістю  $c$ , то

$$v = v' + u, \quad v' = v - u.$$

Якщо  $v' = c$ , то

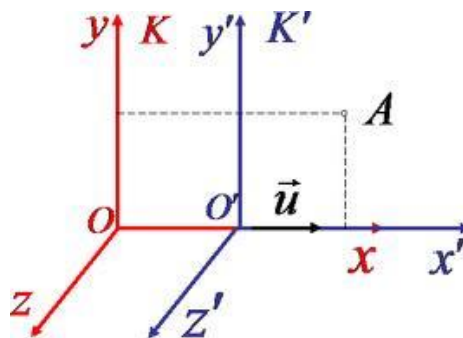
$$v = \frac{c + u}{1 + \frac{cu}{c^2}} = c.$$

Нехай  $v' = u = c$ .

$$v = \frac{c + c}{1 + \frac{c^2}{c^2}} = c.$$

При додаванні довільних швидкостей їх сума не може перевищити  $c$ .

Нехай в системі  $K$  в точках з координатами  $x_1$  і  $x_2$  в моменти часу  $t_1$  і  $t_2$  відбуваються дві події. В системі  $K'$ , яка рухається відносно  $K$  з швидкістю  $\vec{u}$  вздовж осі  $Ox$ , цим подіям відповідають координати  $x'_1$  і  $x'_2$  в моменти часу  $t'_1$  і  $t'_2$  (рис. ). Якщо події в системі  $K$  відбуваються в одній точці ( $x_1 = x_2$ ) і є одночасними ( $t_1 = t_2$ ), то згідно перетворень Лоренца



$$x'_1 = x_1 - u t_1 \quad \text{і} \quad t'_1 = t_1 - \frac{u x_1}{c^2},$$

тобто ці події є \_\_\_\_\_

Якщо події в системі  $K$  просторово розділені ( $x_1 \neq x_2$ ), але одночасні ( $t_1 = t_2$ ), то в системі  $K'$

$$x'_1 = \quad , x'_2 = \quad ,$$

$$t'_1 = \quad , t'_2 = \quad ,$$

$$x'_1 = \quad , t'_1 \neq \quad .$$

Отже, в системі  $K'$  ці події, залишаючись просторово розділеними, виявляються і \_\_\_\_\_.

Знак різниці  $t'_2 - t'_1$  визначається знаком виразу  $u(x_1 - x_2)$ , тому в різних точках системи  $K'$  (при різних  $u$ ) різниця  $t'_2 - t'_1$  буде неоднаковою за величиною і за знаком.

Нехай в деякій точці, яка нерухома в системі  $K$ , відбувається подія, тривалість якої  $\tau = t_2 - t_1$ . Тривалість цієї події в системі  $K'$

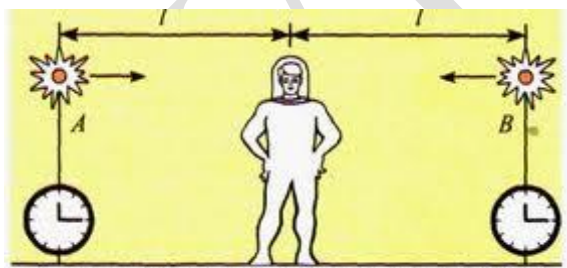
$$\tau' = t'_2 - t'_1 =$$

або

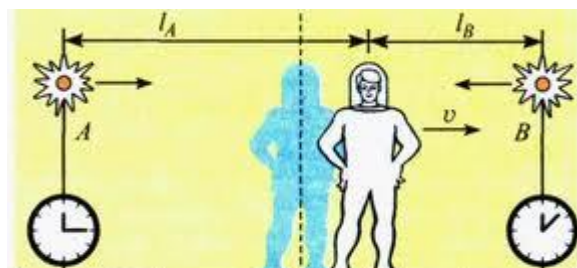
$$\tau' = \quad .$$

Отже,  $\tau < \tau'$  \_\_\_\_\_

Отже, годинники, які рухаються відносно інерціальної системи відліку, йдуть \_\_\_\_\_ нерухомих годинників.



Спостереження події нерухомих спостерігачем



Спостереження події рухомих спостерігачем

Нехай деяке тіло (наприклад, стержень) розміщене вздовж осі  $Ox'$ , рухається разом з системою відліку  $K'$  і має в цій системі довжину  $l_0 = x'_2 - x'_1$ , де  $x'_1$  і  $x'_2$  – координати початку і кінця стержня, які не змінюються з часом  $t'$ . Визначимо довжину стержня в системі  $K$ , відносно якої він рухається зі швидкістю  $u$ . Для цього треба виміряти координати його кінців  $x_1$  і  $x_2$  в системі  $K$  в один і той самий момент часу  $t$ :

$$l_0 = x'_2 - x'_1 =$$

тобто

$$l = \dots$$

Отже, \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Поперечні розміри тіла не залежать від швидкості його руху і однакові у всіх інерціальних системах відліку.



### 6. Релятивістський імпульс. Основний закон релятивістської динаміки. Взаємозв'язок маси та енергії

У релятивістській динаміці рівняння, що описують рух тіл під дією сил, повинні бути незалежними від вибору системи відліку, інваріантними відносно перетворень Лоренца. Перший постулат А.Ейнштейна вимагає збереження форми фундаментальних законів фізики в усіх інерціальних системах відліку. Фундаментальним є другий закон І.Ньютона.

А.Ейнштейн показав, що запис другого закону І.Ньютона у формі

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{v})$$

зберігається, якщо під імпульсом розуміти вираз

$$\vec{p} = m\vec{v} = \dots,$$

де  $m = \dots$ ,

а  $m_0 = \dots$   
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

**Основний закон релятивістської динаміки:** швидкість зміни імпульсу матеріальної точки дорівнює силі, що діє на цю точку, тобто

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \vec{v} \right) = \vec{F}$$

А. Ейнштейн сформулював закон взаємозв'язку маси і енергії – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_:

$$\Delta E = \quad .$$

Звідси А.Ейнштейн дійшов до універсальної залежності між повною енергією тіла  $E$  і його масою  $m$ :

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Релятивістська залежність між повною енергією й імпульсом частинки:

$$E = \quad .$$

Якщо тіло нерухоме, то

$$E_0 = \quad ,$$

де  $E_0$  – \_\_\_\_\_

**Загальний висновок теорії відносності:** \_\_\_\_\_

Тільки тому просторово-часовий інтервал між двома подіями є абсолютним, в той час як просторовий і часовий проміжки між подіями відносні.

## 7. Границі застосовності класичної механіки

Класична механіка дає точні результати для систем, які ми зустрічаємо в повсякденні. Але вони стають некоректними для систем, швидкість яких наближається до швидкості світла. Тоді класична механіка замінюється релятивістською механікою, або для дуже малих систем квантовою механікою.

## Лекція № 8 Електростатика

1. Значення фізичних знань з електромагнетизму для майбутньої професійної діяльності інженера-будівельника
2. Електричний заряд. Закон Кулона
3. Електричне поле. Напруженість електростатичного поля, принцип суперпозиції електростатичних полів
4. Потенціал електростатичного поля. Різниця потенціалів

1. Значення фізичних знань з електромагнетизму для майбутньої професійної діяльності інженера-будівельника

Вивчення розділу “Електрика і магнетизм” у курсі фізики студентами вищих будівельних навчальних закладів спрямоване на подальше сприйняття і засвоєння основ електротехніки, електроніки, мікропроцесорної техніки, автоматизованих систем управління у будівництві тощо. Викладання цих дисциплін, окрім отримання студентами знань фундаментально-базового характеру, направлене на вивчення процесів, що відбуваються в електричних колах постійного і змінного струму та здійснення електричних вимірювань у них; вивчення більшості електротехнічних пристроїв, таких як електротрансформатори, електричні апарати і машини постійного і змінного струму, електровимірювальні прилади та ознайомлення з характерними режимами їх роботи; вивчення напівпровідникових приладів та електронної схемотехніки, що є складовими різноманітних електронних пристроїв; вивчення систем автоматизованого контролю і алгоритмів управління процесами у виробничій та експлуатаційній сфері будівельної галузі; вивчення систем електроживлення виробничого, транспортного, монтажного і побутового призначення.



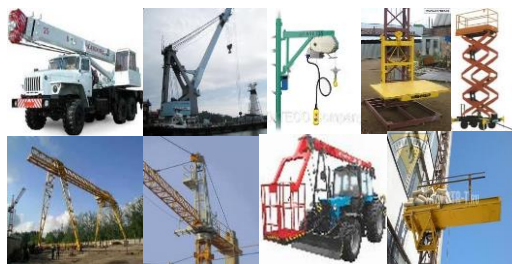
Інженер-будівельник має розуміти особливості будови, принцип роботи і способи експлуатації електрообладнання будівельних машин та майданчиків, підприємств будівельної індустрії, інженерних систем будівель та питань електробезпеки. Окреслимо основні **складові частини, елементи та види електрообладнання будівельних машин, майданчиків, підприємств і будівель**, які є досить різноманітними за своїм призначенням і межами застосування:

- вимірювання фізичних величин з високою точністю у ручному і автоматичному режимах забезпечують **електровимірювальні прилади** (амперметри, вольтметри, ватметри, омметри, електрорічильники тощо), **вимірювальні перетворювачі** (шунти, дільники напруги, вимірювальні трансформатори, терморезистори, термопари, тензорезистори, ємнісні й індуктивні перетворювачі та ін.), **електровимірювальні установки та вимірювальні інформаційні системи**;
- для перетворення електричної енергії одного класу напруги або струму на інший клас напруги або струму використовують **трансформатори**, для



взаємоперетворення механічної та електричної енергії – *електричні машини* (генератори та електродвигуни);

• *засобами автоматизації і контролю виробничих процесів* виступають напівпровідникові прилади, які мають широке застосування у різних пристроях, зокрема в системах керування електроприводами будівельних машин і механізмів (регулювання швидкості у димососах котелень, ліфтах, підйомних і транспортних механізмах тощо). До напівпровідникових приладів



відносяться напівпровідникові діоди, тиристори і транзистори, що застосовуються у випрямлячах, підсилювачах, інверторах, згладжуючих фільтрах, електричних приводах;



• ручне або автоматичне зварювання контактним або електродуговим методом у повітряному чи інертногазовому середовищах забезпечує *електрообладнання зварювальних установок*;

• у будівництві та на підприємствах будівельної індустрії найбільш часто використовують *вантажопідйомні машини*, до яких відносяться стрілові, баштові, козлові, мостові й інші види кранів, а також підйомники різного призначення;

• серед *електричних ручних машин*, що використовуються у будівництві розрізняють свердлильні, шліфувальні машини, машини для розпилювання деревини, гайко- та шуруповерти, машини ударної дії, вібратори.



• при виготовленні залізобетонних виробів важливе місце займають *електропрогрів бетону і ґрунту* електродним, індукційним, інфрачервоним або непрямим методами теплової обробки та метод електропропарювання.



• *електроосвітлювальні установки* (лампи розжарювання, газорозрядні, люмінесцентні та ртутні лампи, освітлювальна арматура, світильники) забезпечують організацію електричного освітлення на будівельному майданчику та відіграють істотне значення при виконанні будівельно-монтажних робіт, особливо в осінньо-зимовий період та нічний час;



• ефективна експлуатація промислово-житлових об'єктів забезпечується *електрообладнанням інженерних систем будівель*. Сучасні житлові, громадські та промислові будинки насичені такими основними компоненттами інженерних систем будинків як електро-, тепло- і водопостачання, водопідготовка, каналізація, вентиляція, кліматичне обладнання, установки кондиціонування, електрообігрівання, охоронно-пожежні системи, установки очистка стоків, іонізація та очистка повітря, освітлення тощо;

• найсучаснішими системами устаткування приватного житла є системи типу “розумний будинок”, які передбачають системи утримання будинку за допомогою програмовано-автоматизованих систем керування освітленням,





опаленням, кондиціюванням, вентиляцією, водопостачанням холодної та гарячої води, водовідведенням, охоронними і протипожежними комплексами у раціонально-економних режимах.

За такої електрифікації усіх сфер будівельної індустрії, виробничо-монтажні та експлуатаційні процеси у будівництві мають бути забезпечені великим ступенем електробезпеки. Практичне вирішення цього завдання забезпечується технічними способами і засобами (захисне заземлення, вирівнювання потенціалів, ізоляція струмоведучих частин, попереджуюча сигналізація, блокування, знаки безпеки, засоби захисту тощо). Освоєння застосування усього різноманіття будівельного обладнання і техніки є необхідною умовою успішної професійної діяльності інженера будівельної галузі.

## 2. Електричний заряд. Закон Кулона

**Електричний заряд** – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

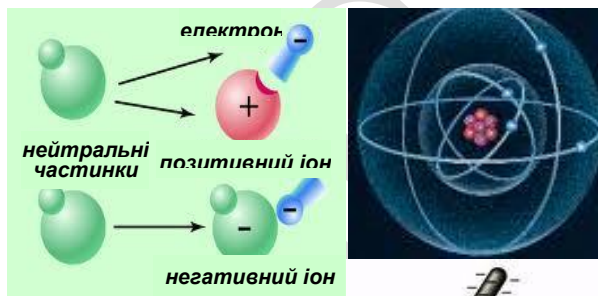
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

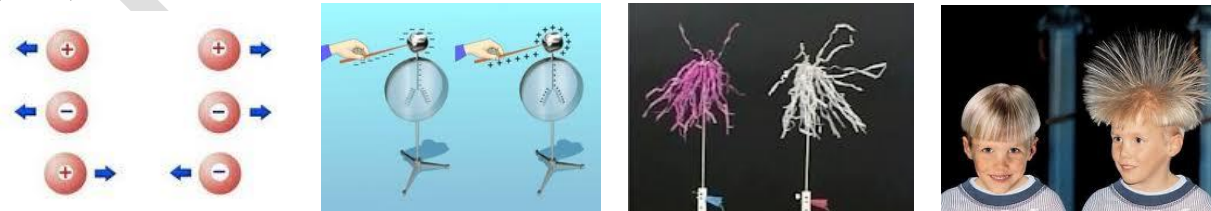


Експериментально встановлено, що в природі існує всього \_\_\_\_\_ види електричних зарядів – \_\_\_\_\_ та \_\_\_\_\_

Одноіменні заряди \_\_\_\_\_, а різноіменні \_\_\_\_\_. Носієм найменшого негативного елементарного заряду, є одна з найпоширеніших елементарних частинок, – \_\_\_\_\_, а найменшого позитивного – \_\_\_\_\_.



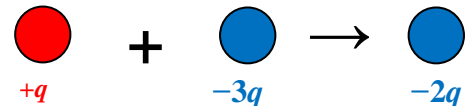
Величина найменшого елементарного заряду  $|q_e| \approx |q_p| =$  встановлена дослідями Р. Міллікеном. Одиниця електричного заряду в СІ – кулон,  $1\text{Кл} =$  \_\_\_\_\_.



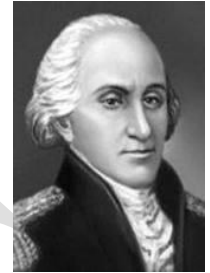
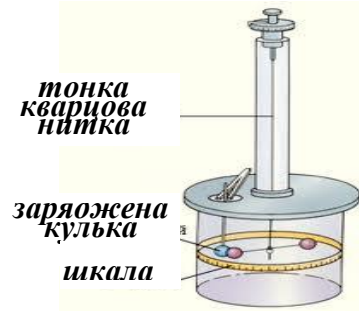
Однією з важливих властивостей елементарного заряду є незалежність його числового значення від стану інерціальних систем відліку, в яких він визначається – \_\_\_\_\_.

Спостереження і експериментальні дослідження свідчать, що \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ – **закон збереження електричного заряду** – це твердження, вперше висловив Б. Франклін і сформулював М. Фарадей. У теоретичній фізиці закон збереження заряду є наслідком інваріантності рівнянь електродинаміки.

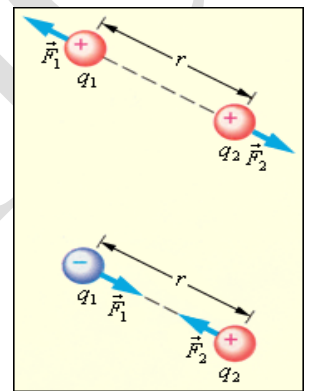


Експериментальні дослідження взаємодії двох нерухомих точкових зарядів виконали незалежно один від одного Г. Кавендліш у 1772 р., результати досліджень якого були опубліковані лише у 1879 р., і Ш. Кулон у 1785 р.



Шарль Огюстен де Кулон

Закон взаємодії нерухомих точкових зарядів у вакуумі називається **законом Кулона**: \_\_\_\_\_

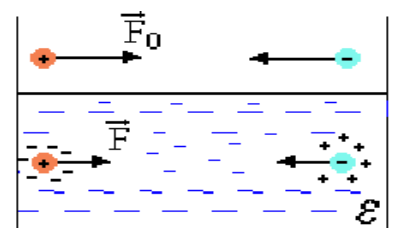


$$F_0 = \frac{k q_1 q_2}{r^2}$$

де  $k = \frac{1}{4\pi \epsilon_0}$

При вміщенні двох точкових зарядів у будь-яке непровідне середовище, сила їх взаємодії зменшується через явище поляризації діелектричного середовища. Явище поляризації полягає у відносному зміщенні заряджених частинок атомів молекул (електронів та ядер) під дією електричного поля зарядів, вміщених у діелектричне середовище. Кількісний вплив середовища на взаємодію між зарядами враховують введенням **відносної діелектричної проникності середовища  $\epsilon$**  –

\_\_\_\_\_ :  
 $\epsilon = \frac{F_0}{F}$   
Діелектрична проникність  $\epsilon$  величиною безрозмірною.



Закон Кулона для взаємодії двох точкових зарядів у середовищі у загальній векторній формі має вигляд:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi \epsilon} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{e}_{12}$$

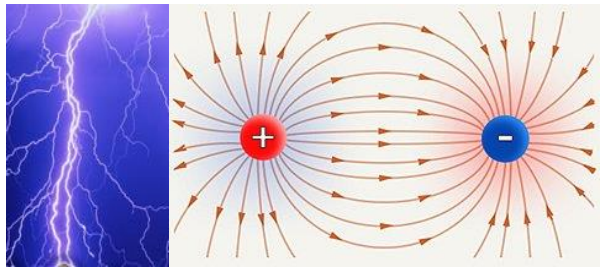
де  $\vec{r}$  – \_\_\_\_\_

### 3. Електричне поле. Напруженість електростатичного поля, принцип суперпозиції електростатичних полів

Експериментально встановлено, що взаємодія між нерухомими зарядами здійснюється не миттєво (теорія далекодії), а зі скінченною

швидкістю  $3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  згідно концепції близькодії через особливий вид матерії – електричне поле.

**Електричне поле** –



Електростатичне поле –

Має дві характеристики: силову –  $\vec{E}$  та енергетичну –  $\varphi$ .

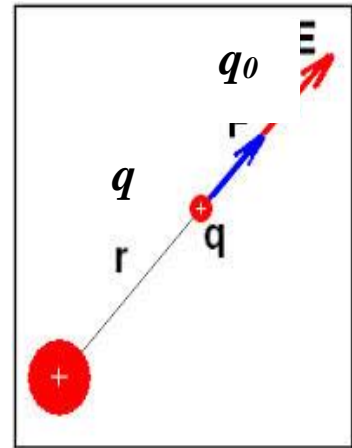
**Напруженість електростатичного поля** –

$$\vec{E} =$$

Одиницею вимірювання напруженості є  $\frac{В}{м}$ , про це свідчать такі перетворення:

$$1 \frac{Н}{Кл} = 1 \frac{В}{м}$$

Пробним зарядом називають



Виходячи із закону Кулона та означення напруженості, одержимо формулу напруженості поля електростатичного поля точкового заряду q на відстані r:

$$\vec{E} =$$

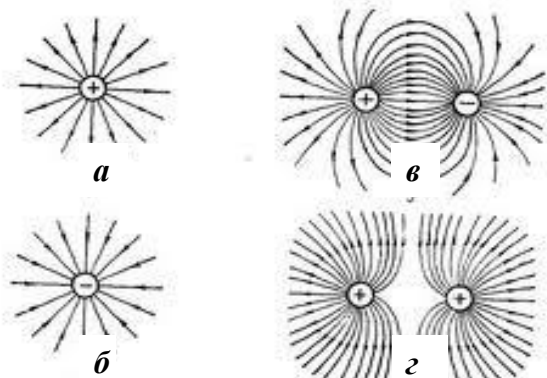
де  $\vec{r}$  –

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



Для графічного зображення картини поля, що оточує заряд чи систему зарядів, використовують **силові лінії**

**Силові лінії електричного поля окремих позитивного (а) і негативного (б) зарядів та систем зарядів – різноіменних (в) і однойменних (г)**

---



---



---



---

Найпростіший вигляд має картина силових ліній електростатичного поля точкових зарядів, силові лінії завжди беруть початок на позитивних зарядах і закінчуються на негативних, та системи двох точкових рівновеликих зарядів, різних за знаками.

Для визначення конфігурації та напруженості електростатичного поля системи точкових нерухомих зарядів використовують **принцип суперпозиції електростатичних полів** —

---



---



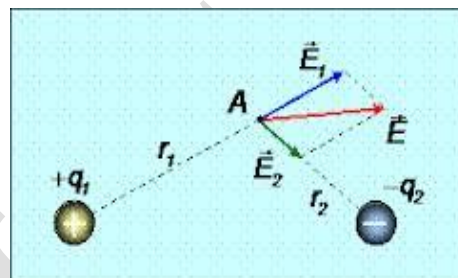
---



---



---



$$\vec{E}_{\text{сум}} = \sum \dots$$

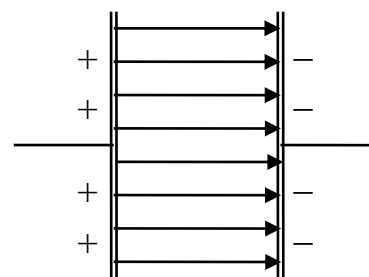
Окремим випадком електростатичного поля є **однорідне електростатичне поле** —

---



---

Прикладом однорідного електростатичного поля є поле плоского зарядженого конденсатора, картина силових ліній якого має вигляд паралельних прямих (рис.). Густина ліній напруженості електростатичного однорідного поля стала, якщо вони прямі та паралельні.



#### 4. Потенціал електростатичного поля. Різниця потенціалів

**Потенціалом** \_\_\_\_\_

---



---



---

$$\varphi = \dots$$

Практичне використання цієї формули ускладнене невизначеністю потенціальної енергії, але якщо зумовити вибір нуля потенціальної енергії на нескінченності  $W_n(\infty) = 0$ , то отримаємо більш практичне визначення.

**Потенціал** \_\_\_\_\_

---



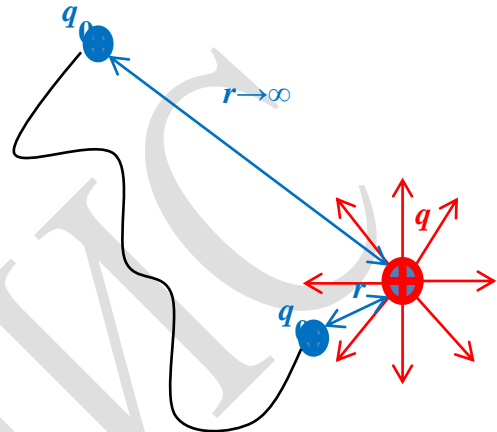
---



---



---



$$\varphi(r) = \dots$$

Відповідно до визначення потенціалу за одиницю його вимірювання прийнято

$$1 \text{ (_____)}: 1 \text{ B} = \dots$$

Потенціал – величина адитивна, тобто \_\_\_\_\_

---



---



---

$$\varphi = \sum \dots$$

Різниця потенціалів між двома точками поля 1 і 2 визначається \_\_\_\_\_

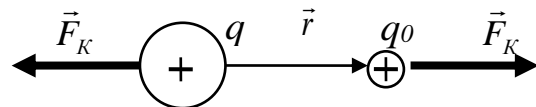
---



---

$$\Delta\varphi_{12} = \dots$$

Визначимо потенціал поля точкового позитивного заряду  $q$  на відстані  $r$  від нього. Згідно визначення, помістимо в точці на відстані  $r$  від заряду  $q$  позитивний пробний заряд  $q_0$  і визначимо роботу сил кулонівського відштовхування зарядів вздовж радіус-вектора  $\vec{r}$  (рис.):



$$A_{r\infty} = \int_r^\infty (\vec{F}_K \cdot d\vec{r}) = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_r^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left( -\frac{1}{r} \right) \Big|_r^\infty = \dots$$

Оскільки  $\varphi_r = A_{r\infty}/q_0$ , потенціал поля точкового позитивного заряду  $q$  на відстані  $r$  від нього:

$$\varphi_r = \dots$$

тобто потенціал поля точкового заряду залежить від відстані і величини заряду, а також діелектричних властивостей середовища.

Різниця потенціалів між двома точками 1 і 2 поблизу точкового заряду буде відповідно дорівнювати:

$$\Delta\varphi_{12} = \frac{A_{12}}{q_0} = \frac{A_{1\infty} - A_{\infty 2}}{q_0} = \varphi_1 - \varphi_2 =$$

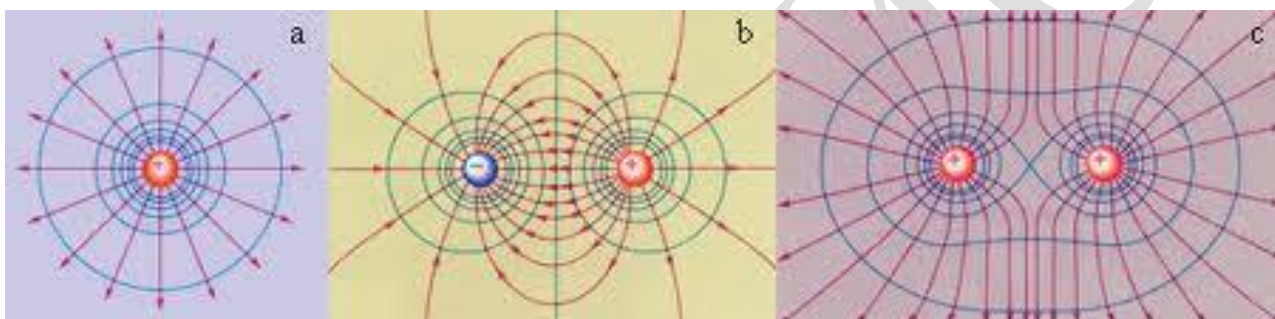
З цієї формули випливає, що різниця потенціалів не залежить від \_\_\_\_\_, а визначається лише \_\_\_\_\_.

Таку властивість мають *потенціальні поля* – тобто такі, робота сил яких \_\_\_\_\_.

До таких полів можна віднести гравітаційне і електростатичне поля. Електростатичне поле – потенціальне.

Графічно картину електростатичного поля можна зобразити за допомогою системи еквіпотенціальних поверхонь. *Еквіпотенціальною поверхнею* називають \_\_\_\_\_.

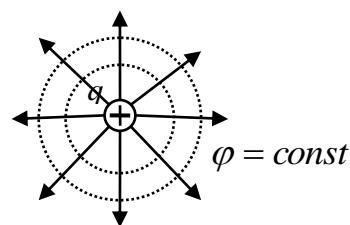
$$\varphi(r) =$$



Для прикладу розглянемо найпростіший випадок – електростатичне поле точкового заряду  $q$ :

$$\varphi(r) = \quad = const ,$$

тобто  $r =$  . Таким чином, еквіпотенціальними поверхнями точкового заряду є концентричні сфери з центром у точці розміщення заряду (див. рис.). Силві лінії напруженості завжди перпендикулярні до еквіпотенціальних поверхонь.

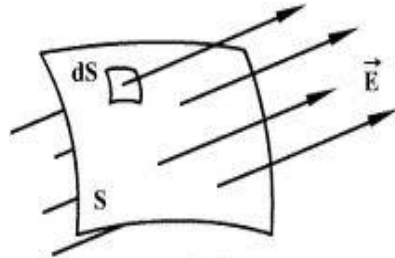


## Лекція № 9 Теорема Гауса

1. Потік вектора напруженості електростатичного поля
2. Теорема Гауса та її застосування
3. Циркуляція напруженості електростатичного поля
4. Зв'язок напруженості з потенціалом

### 1. Потік вектора напруженості електростатичного поля

Потоком вектора напруженості електростатичного поля  $d\Phi_E$  через елементарну поверхню  $dS$  називають \_\_\_\_\_




---



---



---



---

$$d\Phi_E = \dots,$$

де  $\vec{n}$  – \_\_\_\_\_

Якщо поле неоднорідне і поверхня не плоска, то її уявно розбивають на елементи  $dS$ , які наближено можна вважати плоскими, а поле в її межах – однорідним. Тоді повний потік вектора  $\vec{E}$  через поверхню  $S$  обчислюється як поверхневий інтеграл:

$$\Phi_E = \dots,$$

де  $E_n$  – \_\_\_\_\_

### 2. Теорема Гауса та її застосування

Іноді, застосування принципу суперпозиції для визначення напруженості електростатичного поля системи великої кількості точкових нерухомих зарядів, вимагає громіздких математичних розрахунків, у таких випадках доцільно використовувати **теорему Гауса**: \_\_\_\_\_

---



---



---



---

$$\Phi_E = \dots.$$

Теорема Гауса може бути сформульованою і доведеною для вектора електричного зміщення  $\vec{D}$ . Електричне зміщення (індукція електростатичного поля)  $\vec{D}$  – \_\_\_\_\_

---



---

Зв'язок між векторами  $\vec{E}$  і  $\vec{D}$  має вигляд:  $\vec{D} = \epsilon\epsilon_0\vec{E}$ , звідки математичний запис теореми Гауса через вектор електричного зміщення:

$$= \dots.$$

Найчастіше теорему Гауса застосовують для розрахунку напруженості  $\vec{E}$  систем зарядів з певною симетрією у їх відносному розташуванні. Розглянемо кілька прикладів розрахунку напруженості електростатичного поля  $\vec{E}$  із застосуванням теореми Гауса.

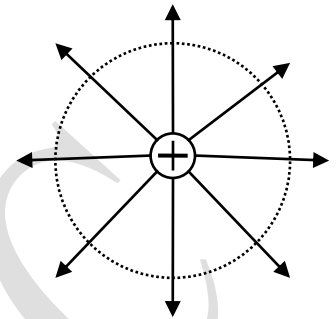
Йоганн Карл Фрідріх Гаус

1777 – 1855



Gauss

**Електричне поле точкового заряду.** Для обчислення  $\vec{E}$  із застосуванням теореми Гауса, в електричному полі необхідно обрати таку замкнену поверхню, щоб задача розв'язувалась найпростіше. Як видно з рис., для поля точкового заряду такою поверхнею є сфера. Обрана сферична поверхня радіуса  $\vec{r}$  із центром у точці розміщення заряду охоплює заряд  $q$ . Потік вектора напруженості  $\vec{E}$  через сферичну поверхню:



$$\Phi_E = \oint_S (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = E(r) \oint_{4\pi r^2} dS =$$

За теоремою Гауса

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i =$$

Прирівняємо праві частини останніх рівнянь:

=

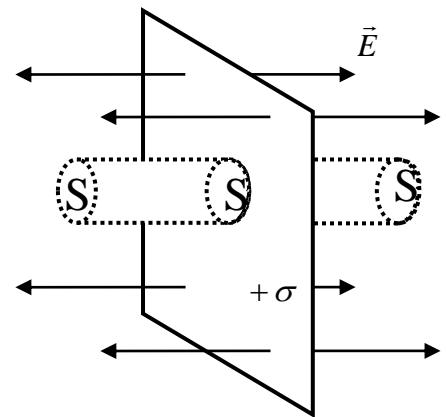
Звідси напруженість поля точкового заряду  $q$  на відстані  $r$ :

$$E(r) =$$

що збігається з виразом, обчисленим за означенням.

**Електричне поле рівномірно зарядженої нескінченної площини.** Площину можна вважати нескінченною, якщо відстанню від точки в якій визначають напруженість електростатичного поля, до площини можна нехтувати порівняно з її геометричними розмірами. Нехай дана площина заряджена рівномірно з поверхневою густиною заряду

$\sigma = \frac{dq}{dS}$ . Для обчислення  $\vec{E}$  за теоремою Гауса,



раціонально обрати замкнену поверхню у вигляді прямого циліндра, розміщеного симетрично відносно зарядженої площини з основами площею  $S$  паралельними їй (див. рис.).

Потік вектора напруженості  $\vec{E}$  через циліндричну поверхню:

$$\Phi_E = \oint_S (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = \int_{S_{\text{бічн. пов.}}} E dS \cos(\vec{E}, \hat{n}) + 2 \int_{S_{\text{основи}}} E dS \cos(\vec{E}, \hat{n}) =$$

За теоремою Гауса

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0} =$$



Прирівняємо праві частини останніх рівнянь:

=

Звідси напруженість поля поблизу рівномірно зарядженої нескінченної площини:

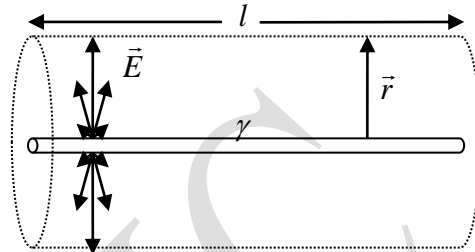
$$E =$$

### Електричне поле рівномірно зарядженого нескінченного провідника.

Нехай даний нескінченний провідник заряджений рівномірно з лінійною

густиною заряду  $\gamma = \frac{dq}{dS}$ . Для

обчислення напруженості поля  $\vec{E}$  провідника, оберемо замкнену поверхню у вигляді прямого циліндра довжиною  $l$  і радіусом  $r$ , розміщеного концентрично відносно зарядженого провідника (див. рис.).



Потік вектора напруженості  $\vec{E}$  через циліндричну поверхню:

$$\Phi_E = \oint_S (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = \int_{S_{\text{бтн. пов.}}} E dS \cos(\vec{E}, \vec{n}) + 2 \int_{S_{\text{основ.}}} E dS \cos(\vec{E}, \vec{n}) = ES_{\text{бтн. пов.}}$$

За теоремою Гаусса

$$\Phi_E = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^N q_i = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0}$$

Прирівняємо праві частини останніх рівнянь:

=

Напруженість поля на відстані  $r$  від рівномірно зарядженого нескінченного провідника:

$$E(r) =$$

### 3. Циркуляція напруженості електростатичного поля

З рівняння повної роботи на шляху 1 – 2

$$A_{12} = \frac{qq_0}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

впливає, що при переміщенні точкового заряду в електричному полі по довільному замкненому контуру ( $r_1=r_2$ ) робота дорівнює нулеві. Математично цю умову, на основі означення роботи електричного поля, можна записати як:

$$A = \oint_L (\vec{F}_K \cdot d\vec{r}) = \oint_L q_0 E \cdot \underbrace{dl \cos\alpha}_{dr} = q_0 \oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0$$

Оскільки  $q_0 \neq 0$ , то

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0$$

Лінійний інтеграл  $\oint_L \vec{E} d\vec{l}$ , обчислений за довільним замкненим контуром

$L$ , називають \_\_\_\_\_

Цей запис потенціальності електростатичного поля є одним із фундаментальних рівнянь електростатики, яке відображає той факт, що

силові лінії електростатичного поля є незамкненими: вони починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних або йдуть у нескінченність (для позитивних зарядів) чи з нескінченності (для негативних). При переміщенні пробного точкового заряду в такому полі по замкненому контуру на одних ділянках шляху виконана робота буде додатною, на інших – від’ємною, але повна робота завжди дорівнюватиме нулеві.

**Умова потенціальності електростатичного поля (теорема про циркуляцію вектора напруженості електричного поля):** \_\_\_\_\_

#### 4. Зв’язок напруженості з потенціалом

Оскільки напруженість і потенціал є різними за фізичним змістом характеристиками тих самих точок поля, між ними має існувати зв’язок. Для цього визначимо роботу по перенесенню пробного заряду  $q_0$  між точками 1 і 2 однорідного електростатичного поля двома різними способами.

З одного боку, робота  $A_{12}$  по переміщенню заряду  $q_0$  визначається різницею потенціалів:

$$A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) \text{ або } dA_{12} = -q_0 \cdot d\varphi,$$

з іншого боку напруженістю поля:

$$dA_{12} = F_k \cdot dr = q_0 E \cdot dr.$$

Прирівнявши праві частини останніх рівнянь  $-q_0 \cdot d\varphi = q_0 E \cdot dr$ , матимемо:

$$E =$$

або у векторному вигляді:

$$\vec{E} =$$

де  $grad = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$  – оператор градієнта.

Знак мінус вказує на те, що вектор напруженості електростатичного поля направлений у бік зменшення потенціалу.

Для однорідного поля напруженість за абсолютним значенням визначається:

$$E =$$

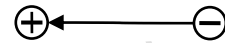
де  $d$  – \_\_\_\_\_

Провідники та діелектрики в електростатичному полі

1. Поведінка диполя в однорідному та неоднорідному електричному полі
2. Полярні та неполярні діелектрики. Поляризація діелектриків, характеристики їх поляризованого стану
3. Провідники в електричному полі
4. Електроємність провідника і конденсатора. З'єднання конденсаторів
5. Енергія електростатичного поля

1. Поведінка диполя в однорідному та неоднорідному електричному полі

Електричним диполем називають \_\_\_\_\_




---



---



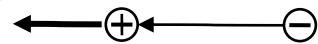
---



---

Основною характеристикою диполя є електричний дипольний момент

$\vec{p}$  – \_\_\_\_\_




---



---



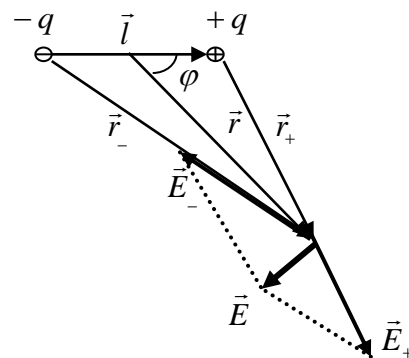
---

$\vec{p} =$  \_\_\_\_\_ .

Одиницею вимірювання електричного дипольного моменту є \_\_\_\_\_

(\_\_\_\_\_).

Диполь – електрично нейтральна система, але навколо нього існує електричне поле. Обчислимо напруженість електричного поля диполя  $E_o$  у довільній точці простору на відстані від центру диполя  $r \gg l$  (див. рис.). Згідно принципу суперпозиції електростатичних полів:



$$E_o = |\vec{E}_+ + \vec{E}_-| = \left| \frac{kq\vec{r}_+}{r_+^3} - \frac{kq\vec{r}_-}{r_-^3} \right| = kq \left| \frac{\vec{r} - \frac{\vec{l}}{2}}{\left(\vec{r} - \frac{\vec{l}}{2}\right)^3} - \frac{\vec{r} + \frac{\vec{l}}{2}}{\left(\vec{r} + \frac{\vec{l}}{2}\right)^3} \right| = kq \left| \frac{2\left(\vec{l} + 3l\vec{r} \cos \frac{\varphi}{2}\right)}{r^3} \right|,$$

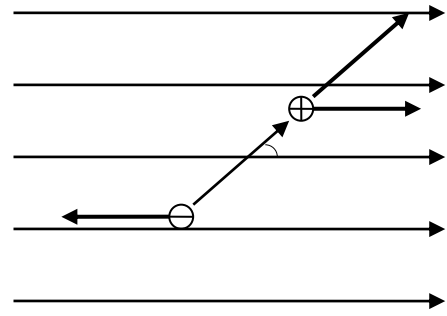
$E_o =$  \_\_\_\_\_ ,

де  $\varphi$  – \_\_\_\_\_

---

Розглянемо поведінку диполя у зовнішньому електричному полі.

Якщо поле однорідне (див. рис.), то сили, що діють на позитивний  $\vec{F}_+$  і негативний  $\vec{F}_-$  заряди диполя, є однаковими за значенням  $|\vec{F}_+|=|F_-|$  і протилежними за напрямом, тобто утворюють пару сил. Їх рівнодійна дорівнює \_\_\_\_\_, тому переміщення диполя вздовж поля ці сили \_\_\_\_\_.



Орієнтація диполя вздовж ліній напруженості поля зумовлюється дією моменту пари сил:

$$M = \left( F_+ \frac{l}{2} + F_- \frac{l}{2} \right) \sin \alpha =$$

або у векторній формі:

$$\vec{M} =$$

Отже, в однорідному електричному полі на диполь діє пара сил, яка

---



---



---

Якщо момент сил дорівнює нулеві, то диполь знаходиться у рівновазі. Існує два положення рівноваги диполя: стійка рівновага (\_\_\_\_\_) і нестійка рівновага (\_\_\_\_\_).

Потенціальна енергія диполя в однорідному електричному полі напруженістю  $\vec{E}$  дорівнює:

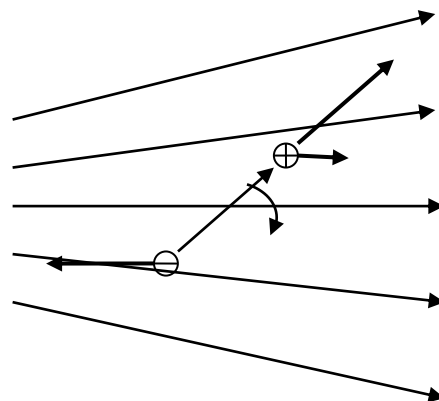
$$W_n = q_+ \varphi_+ + q_- \varphi_- =$$

де  $\varphi_+$  і  $\varphi_-$  – потенціали точок поля, в яких знаходяться позитивний і негативний заряди відповідно.

В загальній формі потенціальна енергія диполя дорівнює скалярному добутку:

$$W_n =$$

Якщо поле неоднорідне (див. рис.), то сили  $\vec{F}_+$  і  $\vec{F}_-$  за значенням є різними  $|\vec{F}_-| > |\vec{F}_+|$  і їхня рівнодійна не дорівнює нулю:



$$F = F_- - F_+ =$$

або у векторному вигляді:

$$\vec{F} =$$

Знак “-” вказує на те, що рівнодійна сил спрямована \_\_\_\_\_

---

Таким чином, у неоднорідному полі на диполь \_\_\_\_\_

Цим пояснюється притягання до наелектризованих тіл дрібних предметів, на яких виникають індуковані заряди, які наближено можна вважати диполями.

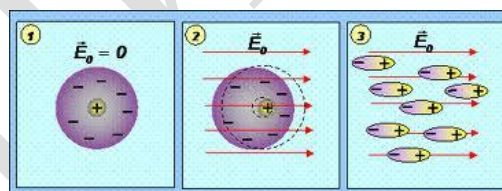


## 2. Полярні та неполярні діелектрики. Поляризація діелектриків, характеристики їх поляризованого стану

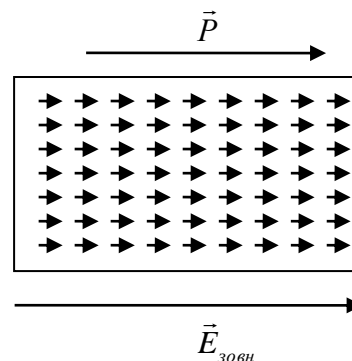
Діелектриком називають \_\_\_\_\_

Діелектрики, по відношенню до впливу на них електричного поля, поділяють на три групи:

- неполярні – \_\_\_\_\_



Після внесення в електричне поле, „центри ваги” зарядів протилежного знаку зміщуються, неполярні молекули діелектрика стають диполями, тобто набувають дипольний момент, направлений вздовж силових ліній поля (див. рис.). \_\_\_\_\_



\_\_\_\_\_ називають *поляризацією*.

Для характеристики поляризації діелектриків в електричному полі вводять *вектор поляризації*  $\vec{P}$ :

$$\vec{P} = \quad ,$$

де  $\sum_i \vec{p}_i$  – \_\_\_\_\_

$\Delta V$  – \_\_\_\_\_

Вектор поляризації пов'язаний із напруженістю зовнішнього поля формулою:

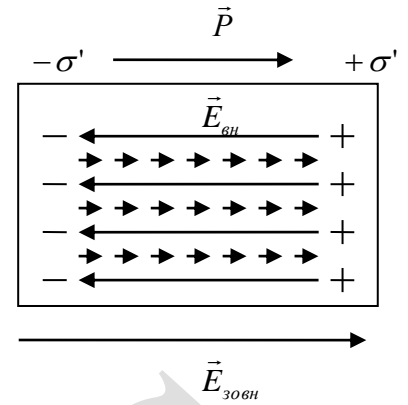
$$\vec{P} = \quad ,$$

$K$  – \_\_\_\_\_

Оскільки в електричному полі зміщуються переважно електрони через малу масу порівняно з масою ядер молекул, то механізм

поляризації неполярних діелектриків називають (іноді індукційним, оскільки дипольний момент наводиться, індукується зовнішнім полем).

Зовнішнє електростатичне поле напруженістю  $\vec{E}_{зовн}$  сприяє наведенню надлишкового заряду поверхневою густиною  $+\sigma'$  на одному боці діелектрика і  $-\sigma'$  на протилежному (див. рис.). Всередині діелектрика встановлюється власне електростатичне поле напруженістю  $\vec{E}_{вн}$ , що послаблює зовнішнє поле, тому напруженість електричного поля всередині неполярного діелектрика внесеного у зовнішнє поле:



$$\vec{E} = \vec{E}_{зовн} + \vec{E}_{вн} \quad E_{зовн}, \quad \frac{\vec{E}_{зовн}}{\vec{E}} = \epsilon - 1.$$

До таких діелектриків відносять  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  тощо.

- *полярні* – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

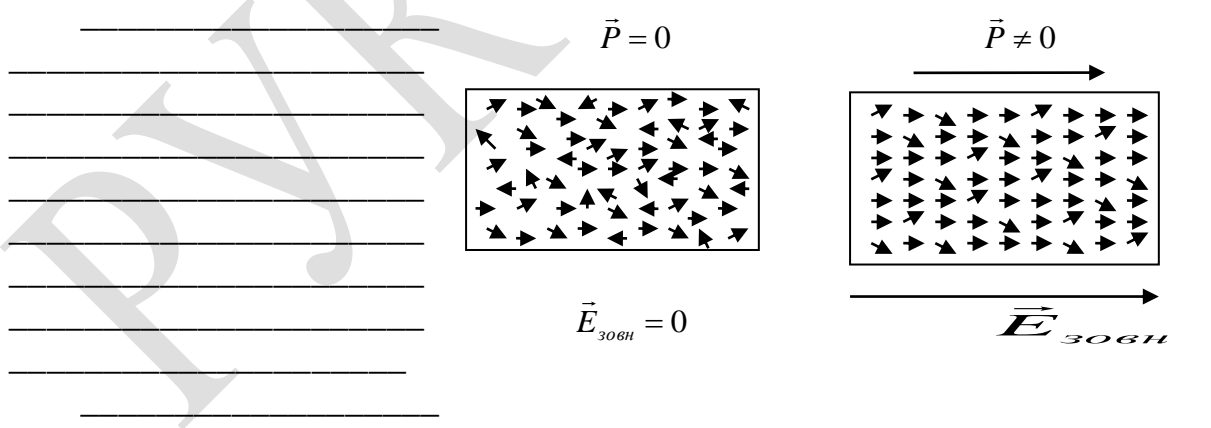
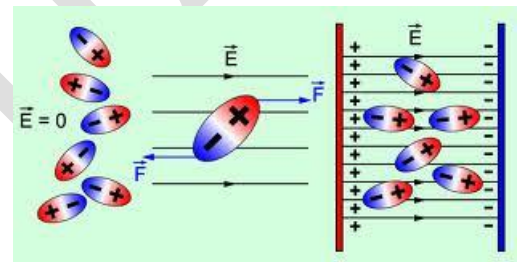
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



\_\_\_\_\_, такий механізм поляризації називають *дипольною* або *орієнтаційною поляризацією*.

Зовнішнє поле аналогічно, як і у неполярних діелектриках сприяє наведенню надлишкового поверхневого заряду, тому всередині діелектрика встановлюється власне поле. Напруженість електричного поля всередині полярного діелектрика внесеного у зовнішнє поле:

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{зовн}} + \vec{E}_{\text{вн}} \quad E_{\text{зовн}}, \quad \frac{E_{\text{зовн}}}{E} = \varepsilon - 1.$$

До таких діелектриків відносяться  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}$  та інші.

- *спонтанно поляризовані* – \_\_\_\_\_

(наприклад,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{KBr}$  та інші). Під дією електричного поля всі позитивні іони зміщуються у напрямку вектора напруженості поля  $\vec{E}_{\text{зовн}}$ , а всі негативні іони – у протилежному напрямку. При цьому всередині кристалу у кожній одиниці об'єму знаходиться однакова кількість позитивних і негативних іонів, а на кожній із двох протилежних граней обмеженого кристалу, перпендикулярних вектору  $\vec{E}_{\text{зовн}}$ , знаходяться іони якого-небудь одного знаку. Такий вид поляризації називають *іонною поляризацією*. До спонтанно поляризованих діелектриків належать так звані:

- піроелектрики – \_\_\_\_\_

Широко використовуються як індикатори і приймачі випромінювання у пристроях теплового бачення, наприклад, для визначення теплоємності і тепловтрат стін та стель будівель;

- п'єзоелектрики – \_\_\_\_\_

, використовуються для виготовлення п'єзодатчиків, призначених для перетворення механічних коливань в електричні, та акустичних генераторів – для перетворення електричних змін у звукові коливання. З них виготовляють адаптери для відтворення звуку, різні прилади для вимірювання частоти й амплітуди вібрацій двигунів, генераторів, будівельних конструкцій тощо; елементи п'єзоелектричних сейсмографів для реєстрацій коливань земної кори при геодезичних дослідженнях, датчики для реєстрацій коливань при використанні ударно-віброуючих будівельних механізмів; датчиків акселерометрів (пристроїв вимірювання прискорень) для фіксації та регулювання швидкості підйомних механізмів; п'єзоелектричні манометри (датчики тиску) – використовують при зведенні та експлуатації мостових конструкцій, а також у лабораторних експертизах будівель;

Макроскопічні ділянки кристалу в межах яких спостерігається поляризація з однаковою орієнтацією диполів називають \_\_\_\_\_

(від фр. domains – ділянки, області однорідної спонтанної поляризації). У межах домену молекули мають однакову орієнтацію дипольних моментів.

Дипольний момент окремого домену відмінний від нуля  $\vec{p}_i \neq 0$ , але сумарний дипольний момент сегнетоелектрика дорівнює нулю

$\vec{P} = \sum_{i=1}^n p_i = 0$  (див. рис.), оскільки орієнтація

$\vec{p}_i$  у просторі хаотична. При внесенні в електричне поле спонтанно поляризованого діелектрика відбувається переорієнтація дипольних моментів кожного диполя вздовж вектора напруженості зовнішнього поля поляризації діелектрика, за рахунок деформації кристалічної решітки (див. рис.).

Надлишкові заряди, що утворюються на поверхні сегнетоелектрика мають густину, значно більшу, ніж у звичайних діелектриків. Власне поле напруженістю  $\vec{E}_{вн}$  значно послаблює зовнішнє поле напруженістю  $\vec{E}_{зовн}$  (див. рис.):

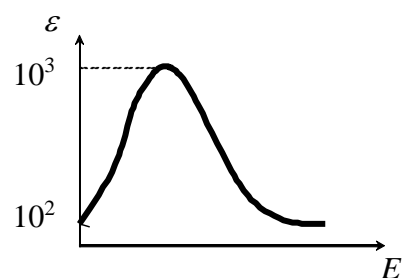
$$\vec{E} = \vec{E}_{зовн} + \vec{E}_{вн} \quad E_{зовн}, \quad \frac{\vec{E}_{зовн}}{\vec{E}} = \varepsilon - 1, \quad \varepsilon = \dots$$

До сегнетоелектриків належать сегнетова сіль  $NaKC_4H_4O_4 \cdot 4H_2O$ , яка дала назву всій групі, кварц, титанат барію  $BaTiO_3$  та ін.

Особливі властивості сегнетоелектриків експериментально дослідили ще у 1931 році І. В. Курчатова і П. П. Кобеко:

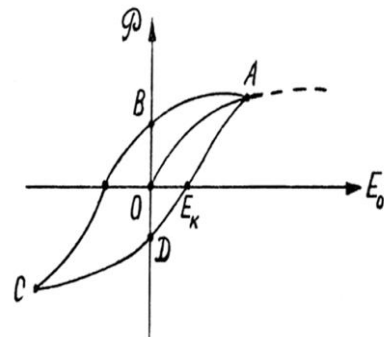
1. Сегнетоелектрики мають нелінійну залежність  $\varepsilon$  від величини напруженості поля  $E$  (див. рис.).
2. Залежність вектора поляризації сегнетоелектрика від вектора напруженості зовнішнього електричного поля  $\vec{P} = P(\vec{E})$  є нелінійною і залежить від

напруженості поля у попередній момент (див. рис.) – явище діелектричного гістерезису (від грец. “запізнювання”). Із збільшенням напруженості зовнішнього поля  $E$ , поляризованість сегнетоелектрика  $\vec{P}$  зростає і досягає насичення у т. А. Зменшення  $\vec{P}$  із зменшенням  $E$  здійснюється по кривій АС, і при  $E = 0$





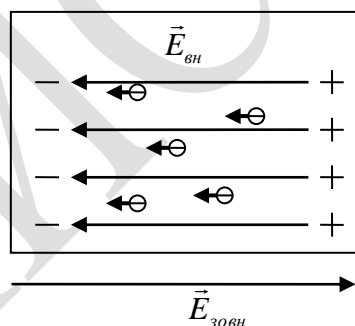
сегнетоелектрик зберігає залишкову поляризованість. Для її усунення, необхідно прикласти електричне поле зворотного напрямку. Напруженість  $E_k$  при  $P=0$  називається коерцитивною силою (від лат. “утримання”) – напруженість поля, необхідна для ліквідації залишкової поляризованості. Криву  $OABCD$  називають *петлею гістерезису*.



### 3. Провідники в електричному полі

Провідники – \_\_\_\_\_

При внесенні провідника в електричне поле,

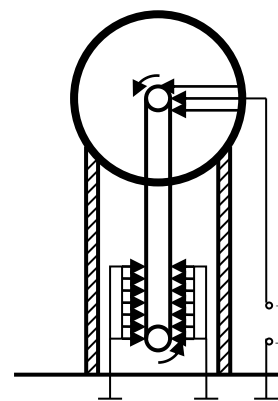


Надлишковий заряд у провіднику, як і наведені заряди в діелектрику, завжди знаходиться у дуже тонкому поверхневому шарі товщиною порядку міжатомної відстані. Це легко довести застосовуючи теорему Гаусса до будь-якого нескінченно малого об'єму провідника, враховуючи, що напруженість у ньому тотожно дорівнює нулю  $\vec{E} = 0$ .

Всередині провідника електричне поле відсутнє  $\vec{E} = 0$ . Враховуючи зв'язок напруженості поля з його потенціалом  $\vec{E} = -\text{grad}\varphi$ , матимемо, що  $\varphi = \text{const}$ . Це означає, що весь провідник, включаючи і його поверхню, має однаковий потенціал. Провідник являє собою екіпотенціальну поверхню, тому вектор напруженості електричного поля провідника спрямований перпендикулярно до його поверхні.

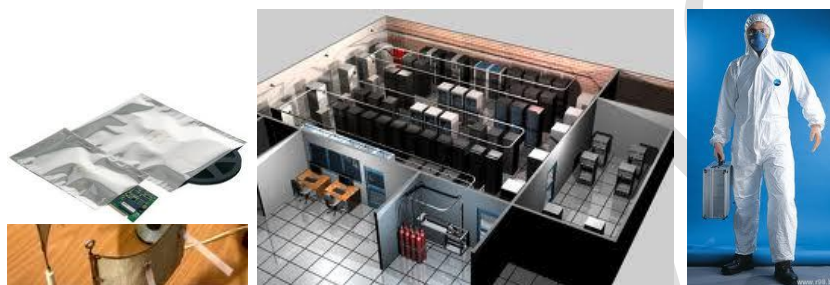
Властивість зарядів розташовуватися на зовнішній поверхні провідника використовується в *електростатичних генераторах* (генераторах Ван-де-Граафа) – пристроях, призначених для накопичення великих зарядів і отримання різниці потенціалів у декілька мільйонів вольт. Схематично, електростатичний генератор являє собою велику металеву сферу всередину якої заходить частина рухомої замкнутої діелектричної стрічки (див. рис. ). Одна система щіток надає стрічці заряду, а через іншу систему щіток, цей заряд стікає на сферу.

Оскільки у стані електростатичної рівноваги всередині провідника заряди відсутні, то створення всередині нього порожнини не вплине на конфігурацію



розташування зарядів і тим самим на електростатичне поле. У середині порожнини поле буде відсутнє.

Якщо провідник з порожниною заземлити, то потенціал у всіх точках порожнини буде рівним нулю, тобто порожнина повністю ізольована від впливу зовнішніх електростатичних полів. На цьому принципі засноване явище *електростатичного захисту* об'єктів – екранування тіл від впливу зовнішніх електростатичних полів. На практиці суцільні провідники замінює щільна металева сітка, яка є ефективною при захисті не лише статичних але й змінних електричних полів. Електростатичного захисту потребують чутливі електроприлади та проводка, тому приміщення в яких вони будуть знаходитись (щитові, лабораторії тощо), на стадії будівництва додатково армують добре провідними заземленими сітками. Електростатичним захистом забезпечують висотні крани, місця проведення електрозварювальних, висотних монтажних та оздоблювальних робіт.



#### 4. Електроємність провідника і конденсатора. З'єднання конденсаторів

Якщо провіднику надати заряд  $q_1$ , то заряд розподілиться по поверхні провідника і створить на поверхні провідника електричне поле з потенціалом  $\varphi_1$ . При зміні заряду провідника до  $q_i$ , потенціал провідника зміниться до  $\varphi_i$ , але для даного провідника відношення його заряду до потенціалу є величиною сталою:

$$\frac{q_1}{\Delta\varphi_1} = \frac{q_i}{\Delta\varphi_i} =$$

*Електричною ємністю провідника* називають \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

$$C = \quad , [C] =$$

Одиницею ємності є  $1 \text{ Ф}$  (фарад), тобто ємність такого провідника,

\_\_\_\_\_

$$1 \text{ Ф} =$$

Ємність окремих тіл невелика, так, наприклад, у Землі  $C = 6,4 \cdot 10^{-4} \text{ Ф}$ , тому на практиці використовують  $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ ,  $1 \text{ нФ} = 10^{-9} \text{ Ф}$  і  $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$ .

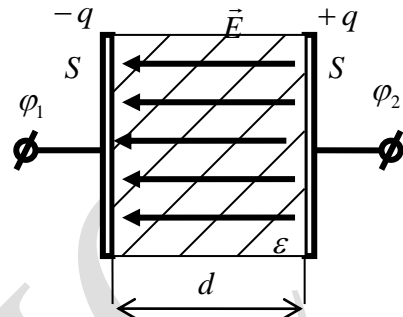
Для сферичного провідника радіусом  $R$ , що знаходиться у середовищі з діелектричною проникністю  $\epsilon$ , за визначенням ємність становитиме:

$$C = \frac{dq}{d\varphi} = \frac{dq}{\frac{dq}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R}} =$$



\_\_\_\_\_ , яку називають **конденсатором**.

Ємність конденсатора (або взаємна електроємність провідників) чисельно дорівнює



$$C =$$

*Плоским конденсатором* називають систему, що складається з

Ємність плоского конденсатора можна обчислити за його параметрами:

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} = \frac{q}{E \cdot d} = \frac{\sigma S}{\frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0} d} =$$



де  $S$  – \_\_\_\_\_

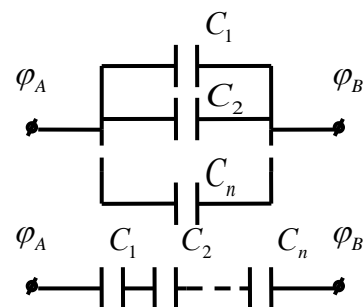
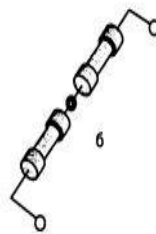
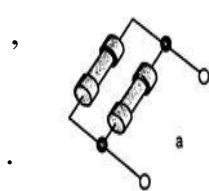
$d$  – \_\_\_\_\_

$\epsilon$  – \_\_\_\_\_

Ємність системи паралельно або послідовно з'єднаних конденсаторів (див. рис. ) визначають за формулами:

$$C_{пар} =$$

$$\frac{1}{C_{посл}} =$$



## 5. Енергія електростатичного поля

Процес зарядки конденсатора можна представити у вигляді процесу послідовного перенесення нескінченно малих порцій заряду  $dq$  з однієї пластини на іншу, в результаті чого одна пластина конденсатора буде заряджатися позитивно, а інша – негативно і між ними буде виникати різниця потенціалів  $\varphi = \frac{q}{C}$ . Роботу, яку необхідно буде виконати у наступний момент проти сил поля, дорівнюватиме:

$$dA = \varphi dq = \frac{1}{C} q dq.$$

Повна робота по зарядженню пластин конденсатора від 0 до заряду  $q$ :

$$A = \int_0^q \frac{1}{C} q dq = \frac{1}{2C} q^2.$$

Виконана робота змінює енергію системи. Перерозподіл заряду утворює появу електричного поля, тобто енергія системи збільшується на значення енергії електричного поля, що виникло у конденсаторі.

Таким чином, енергія поля зарядженого конденсатора:

$$W_{\text{конд}} = \frac{1}{2} q \varphi = \frac{1}{2} C \varphi^2.$$

Об'ємну густину енергії електростатичного поля  $\varpi$  можна обчислити, прийнявши до уваги, що поле конденсатора однорідне і зосереджене між його обкладками:

$$\varpi = \frac{W}{V} = \frac{C \Delta \varphi^2}{2 \cdot S d} \cdot \frac{d}{d} = \frac{C d}{2 S} \cdot \left( \frac{\Delta \varphi}{d} \right)^2 = C \cdot \frac{d}{2 S} \cdot E^2 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d} \cdot \frac{d}{2 S} \cdot E^2,$$

і тоді

$$\varpi = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{2} E^2.$$

Якщо відома напруженість поля в кожній точці, то повну енергію електричного поля системи зарядів знаходять інтегруванням по об'єму, що займає поле:

$$W_e = \int_V \varpi dV = \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{2} V \int E^2 dV.$$

Очевидно, що повна енергія поля завжди є величиною додатною, оскільки  $E^2 \geq 0$ .

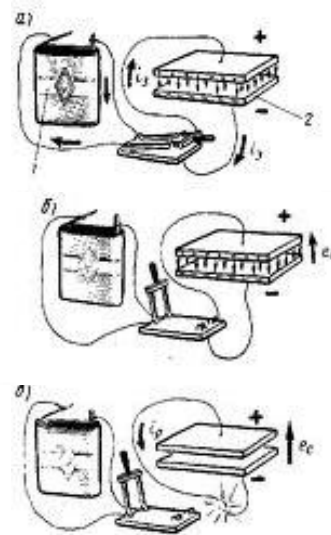
На відміну від повної енергії поля, енергія взаємодії окремих зарядів може бути як додатною, так і від'ємною. Розглянемо систему двох зарядів  $q_1$  і  $q_2$ , що знаходяться на відстані  $r_{12}$ . Потенціальну енергію взаємодії, визначимо через роботу по розведенню зарядів на нескінченність:

$$W_{12} = A_{12} = \int_{r_{12}}^{\infty} F_{12} dr_{12} = \frac{q_1 q_2}{4 \pi \varepsilon_0 r_{12}}.$$

Очевидно, що у випадку різнойменних зарядів  $W_{12}$  від'ємна.

Окрім енергії взаємодії між зарядами, кожен з них має власну енергію, затрачену зовнішніми джерелами на створення цього заряду. Енергія зарядженого тіла (провідника):

$$W = \frac{1}{2} q \varphi = \frac{1}{2} C \varphi^2.$$



# Лекція № 11

## Постійний електричний струм

1. Постійний електричний струм, умови його існування
2. Сила та густина струму
3. ЕРС джерела струму. Опір провідників
4. Закони Ома
5. Розгалужені кола. Правила Кірхгофа

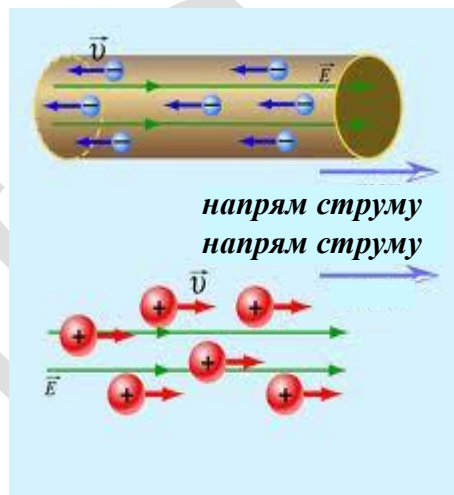
### 1. Постійний електричний струм, умови його існування

*Електричним струмом* називають \_\_\_\_\_

У даному розділі розглядатимемо струми провідності. *Струмом провідності* називають \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ називають *конвекційними*, а \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ – *струмами поляризації*.



За напрям струму прийнято напрям руху \_\_\_\_\_

У металах напрям струму є \_\_\_\_\_ до напрямку направлено руху електронів.

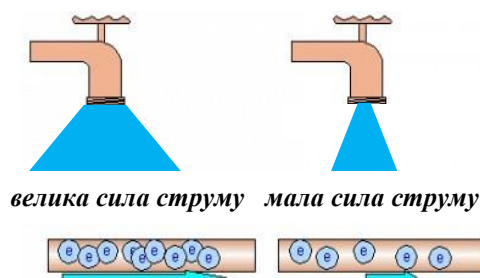
Основними умовами виникнення струму у провіднику є:

- 1) \_\_\_\_\_
- 2) \_\_\_\_\_

### 2. Сила та густина струму

Кількісною мірою електричного струму є сила струму і його густина.

*Сила струму* – \_\_\_\_\_



*Андре Марі Ампер*

$$I = \dots$$

Сила струму вимірюється в \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_).

$I$  Ампер – це \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

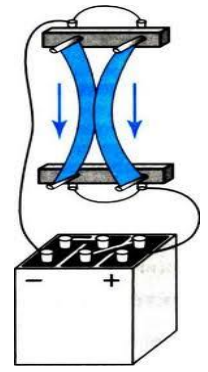
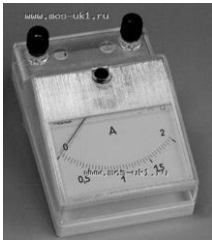
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



**Густина струму** – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

$$\vec{j} =$$

або ж:

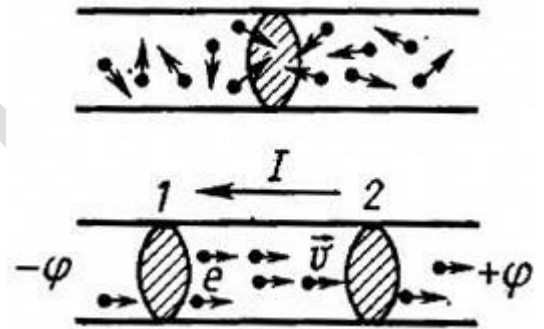
$$\vec{j} =$$

де  $dS$  – \_\_\_\_\_

$n_0$  – \_\_\_\_\_

$v_{др}$  – \_\_\_\_\_

$\vec{n}$  – \_\_\_\_\_



Гуστину струму вимірюють в \_\_\_\_\_.

*Постійним електричним струмом* називають такий струм, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

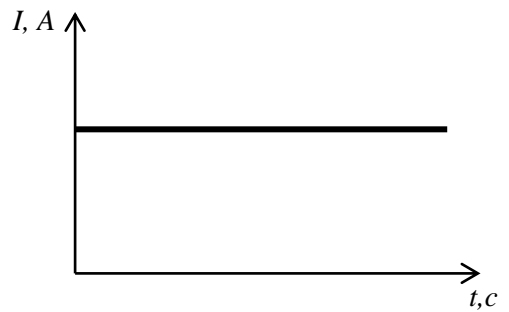
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

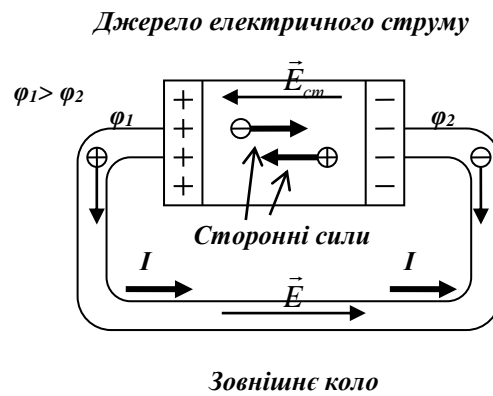
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



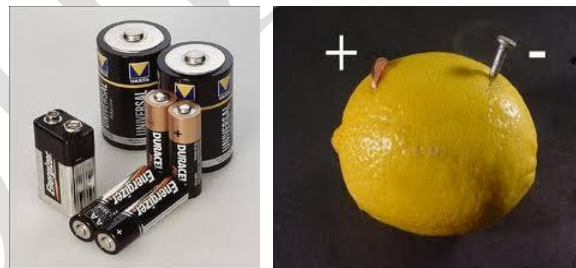
### 3. ЕРС джерела струму. Опір провідників

Переміщення позитивних і негативних зарядів у зовнішній частині електричного кола відбувається за рахунок кулонівських сил поля у напрямі їх компенсації, тобто негативно заряджені частинки рухаються до позитивного полюсу джерела струму, а позитивні – до негативного. Всередині джерела струму (внутрішній частині кола) негативні частинки необхідно перемістити від позитивного полюсу до негативного, а позитивні – від негативного до позитивного, що здійснюється за рахунок сторонніх сил.



**Сторонніми силами** називають \_\_\_\_\_

Природа і механізми виникнення сторонніх сил різні у різних джерелах струму – механічна (генератори постійного струму), хімічна (гальванічні елементи), дифузія носіїв заряду в неоднорідному середовищі (термопара), освітлення поверхні деяких речовин короткохвильовим випромінюванням (сонячна батарея) тощо.



Таким чином, у колі постійного струму окрім електростатичного поля зовнішнього кола напруженістю  $\vec{E}_k$  існує електростатичне поле сторонніх сил напруженістю  $\vec{E}_{cm}$  всередині джерела струму. Значення напруженості поля сторонніх сил визначається силою, що діє з боку сторонніх сил на позитивний одиничний заряд у колі:

$$\vec{E}_{cm} = \dots$$

Результуюча сила, що діє на заряд у колі постійного струму:

$$\vec{F} = \dots$$

Якщо напруженість результуючого поля  $\vec{E}$  у провіднику буде дорівнювати нулю, настане рівновага, тобто направлений рух зарядів буде відсутнім і струм дорівнюватиме нулю.

Сторонні сили характеризують роботу, яку вони виконують при переміщенні зарядів по колу або на ділянці кола. **Електрорушійною силою (ЕРС) джерела струму  $\mathcal{E}$  називають** \_\_\_\_\_

де  $\mathcal{E} =$  \_\_\_\_\_ ,  
 $A_{em} =$  \_\_\_\_\_ .

Значення ЕРС, що діє у замкненому колі:

$\mathcal{E} =$  \_\_\_\_\_ ,  
тобто дорівнює \_\_\_\_\_

На ділянці кола між довільними точками 1 і 2 ЕРС:

$$\mathcal{E}_{12} = \dots$$

**Напругою (спадом напруги)  $U$  на ділянці кола 1–2 називають** \_\_\_\_\_

$U =$  \_\_\_\_\_ ,  
де  $\varphi_1 - \varphi_2 =$  \_\_\_\_\_

Отримана формула зв'язує поняття напруги, ЕРС та різниці потенціалів для неоднорідної ділянки кола.

**Неоднорідною ділянкою кола називають** \_\_\_\_\_

**Електричний опір провідника – це** \_\_\_\_\_

Наявність опору у металевих провідників першого роду пов'язана із

\_\_\_\_\_

Цей опір інакше називають *активним* або *омічним*, оскільки виділяють ще реактивний (індуктивний і ємнісний) опір у колах змінного струму.





Опір провідника залежить від \_\_\_\_\_

$$R = \quad \text{(для провідника циліндричної форми),}$$

$$R_{t,^{\circ}C} = \quad ,$$

де  $\rho$  – \_\_\_\_\_

$\ell$  – \_\_\_\_\_

$S$  – \_\_\_\_\_

$\alpha$  – \_\_\_\_\_

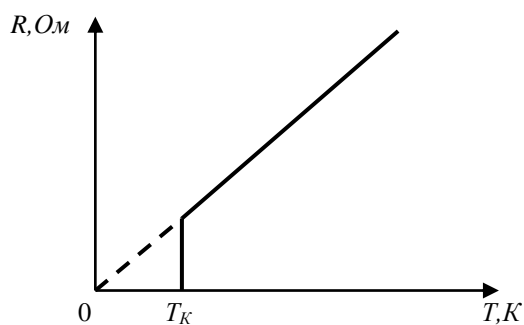
Матеріали з низьким питомим опором широко використовують в електротехніці, оскільки вони є гарними провідниками електричного струму – срібло ( $1,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ), мідь ( $1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ), алюміній ( $2,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ). Через економічні чинники срібло використовується лише при виготовленні дорогокоштовних та високоточних приладів. У радянські часи при будівництві промислових і житлових будівель в основному використовували алюмінієву проводку. В останні десятиліття через значне збільшення енергоспоживання побутовою, аудіо-, відео- і комп'ютерною технікою у житлових приміщеннях, вентиляційно-кліматичними, охоронними, автоматизовано-управлінськими, ліфтопідйомними системами у промислових будівлях фінансово обґрунтованим стало використання мідної проводки з точки зору зменшення енерговитрат та збільшення енергопропускних спроможностей за сталих перерізів провідників.

Величину, обернено пропорційну питомому опору  $\rho$

$$\sigma =$$

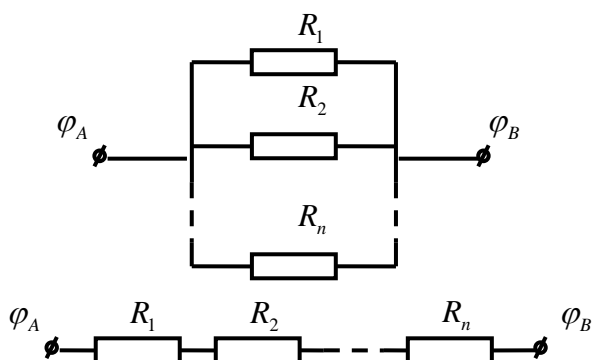
називають \_\_\_\_\_,  
вимірюється вона у \_\_\_\_\_

З підвищенням температури збільшуються амплітуда і частота коливань вузлів кристалічної решітки провідника (основної фізичної причини опору), це веде до збільшення ймовірності зіткнень носіїв заряду з вузлами, чим й пояснюється зростання опору провідника (рис.). При дуже низьких температурах ( $T \leq T_K$  – критична температура) спостерігається явище повного зникнення опору – явище \_\_\_\_\_



\_\_\_\_\_ , виявлене вперше Г. Камерлінг-Оннесом для ртуті у 1911 р. Пояснення механізму виникнення явища надпровідності дає квантова фізика.

На залежності електричного опору металів від температури базується дія *термометрів опору*, які дозволяють вимірювати температуру з точністю до тисячних часток кельвіна



Використання у якості робочої речовини термометрів опору напівпровідників, виготовлених за спеціальною технологією, – *термісторів* – дозволяє фіксувати зміни температури у мільйонні частки кельвін.

Опір системи паралельно або послідовно з'єднаних провідників (рис.) визначається за формулами:

$$\frac{1}{R_{\text{парал}}} = \dots,$$

$$R_{\text{посл}} = \dots.$$

#### 4. Закони Ома.

*Закони Ома* – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Названі закони на честь німецького фізика Г. Ома, який експериментально встановив залежність сили струму в однорідному провіднику від напруги на кінцях цього провідника. Розглянемо закони Ома для різних частин електричного кола.



*Георг Ом*

*Закон Ома для неоднорідної ділянки кола*, тобто ділянки, яка \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ джерело струму – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

$$I =$$

або

$$I = \dots,$$

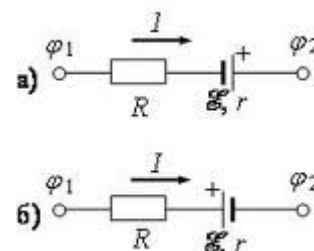
де  $\varphi_1 - \varphi_2$  – \_\_\_\_\_

$\varepsilon$  – \_\_\_\_\_

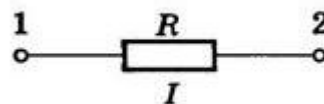
(знак ЕРС залежить від знаку роботи, яку виконують сторонні сили. Якщо ЕРС сприяє руху позитивно заряджених частинок в обраному напрямку 1–2, то  $\varepsilon > 0$ ; якщо ЕРС перешкоджає руху позитивно заряджених частинок у даному напрямку, то  $\varepsilon < 0$ );

$r$  – \_\_\_\_\_

$R$  – \_\_\_\_\_



Закон Ома для однорідної ділянки кола, тобто ділянки, яка \_\_\_\_\_ джерела струму, ( $\varepsilon =$  \_\_\_\_\_,  $r =$  \_\_\_\_\_):



$I =$  \_\_\_\_\_ - в \_\_\_\_\_ формі,

оскільки  $R = \rho \frac{l}{S}$ ,  $I = \frac{U}{R} = \frac{US}{\rho l}$ ,  $\frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{U}{l}$ , то

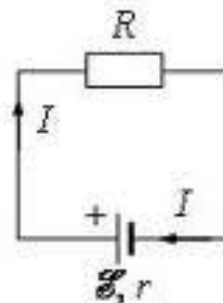
$\vec{j} =$  \_\_\_\_\_ - у \_\_\_\_\_ формі,

де  $\varphi_1 - \varphi_2 =$  \_\_\_\_\_  
 $j =$  \_\_\_\_\_  
 $\sigma =$  \_\_\_\_\_  
 $E =$  \_\_\_\_\_

У такій формі закон Ома застосовний для кожної точки кола.

Закон Ома для замкненого (повного) кола  $\varphi_1 = \varphi_2$ , тобто  $\varphi_1 - \varphi_2 =$  \_\_\_\_\_:

$I =$  \_\_\_\_\_.



### 5. Розгалужені кола. Правила Кірхгофа

Правила Кірхгофа – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Під електричним колом розуміють \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Розгалуженим колом називають коло, в якому \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Ділянкою розгалуженого кола називають \_\_\_\_\_

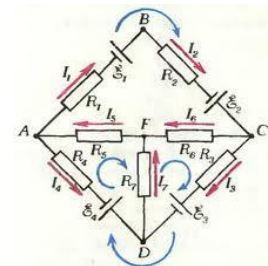
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

По різним ділянкам одного контуру проходять різні струми.



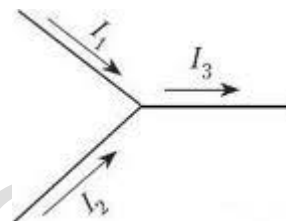
Гюстав Кірхгоф



**Перше правило Кірхгофа** виражає закон збереження заряду і стосується вузлів розгалуженого кола – \_\_\_\_\_

де  $n$  – \_\_\_\_\_

Правило знаків: \_\_\_\_\_



**Друге правило Кірхгофа** є узагальненням закону Ома для довільного контуру розгалуженого електричного кола – \_\_\_\_\_

де  $n$  – \_\_\_\_\_

$m$  – \_\_\_\_\_

Правила знаків: 1) \_\_\_\_\_



2) \_\_\_\_\_



При розв'язуванні задач, в яких розглядають розгалужені кола, варто дотримуватись певної послідовності дій:

1. На усіх ділянках схеми розгалуженого кола довільно позначити стрілками напрями струмів.
2. Записати за першим правилом Кірхгофа  $n-1$  рівняння, враховуючи правило знаків.
3. Довільно обрати напрям кожного простого контуру, наприклад, за рухом годинникової стрілки.
4. Записати за другим правилом Кірхгофа  $p-(n-1)$  рівнянь, враховуючи правило знаків, де  $p$  – кількістю ділянок кола. Обійти кожен контур необхідно двічі, перший раз – записуючи ліву частину рівняння з урахуванням правил знаків, а другий раз – праву частину рівняння.
5. Перевірити, щоб усі електрорушійні сили і опори входили в отриману систему рівнянь, а кількість рівнянь дорівнювала кількості різних струмів, які течуть у розгалуженому колі. Якщо внаслідок обчислення деякі струми будуть отримані зі знаком “-”, то це означає, що їх справжні напрями протилежні напрамам, позначеним на схемі.

**Лекція № 12**  
**Електричний струм у металах, рідинах і газах**

- 1. Робота та потужність постійного електричного струму**
- 2. Електропровідність металів та розчинів електролітів. Застосування електролізу**
- 3. Самостійний газовий розряд, уявлення про плазму**
- 4. Контактні електричні явища та термоелектронна емісія**

**1. Робота та потужність постійного електричного струму**

При перенесенні заряду  $dq$  ділянкою однорідного провідника виконується елементарна робота  $dA$ :

$$dA =$$

або оскільки

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

тоді

$$dA = U I dt.$$

При постійному струмі силою  $I$  за скінченний проміжок часу  $t$  робота електричного струму на зовнішній ділянці кола:

$$A = U I t.$$

На підставі закону Ома для однорідної ділянки кола *робота електричного струму на зовнішній ділянці кола:*

$$A = I^2 R t.$$

Якщо струм з часом змінюється,  $I = I(t)$ , то робота струму за час  $t$ :

$$A = \int_0^t I^2 R dt.$$

Оскільки ЕРС джерела струму чисельно дорівнює роботі, що виконується при перенесенні одиничного заряду по замкненому колу, то при постійному струмі силою  $I$  за час  $t$  *повна робота:*

$$A_{\text{пов}} = E I t.$$

**Потужністю електричного струму називають \_\_\_\_\_**

---

---

$$P = U I.$$

*Корисна потужність у зовнішній частині кола опором  $R$  при постійному струмі:*

$$P = I^2 R,$$

або з урахуванням закону Ома для замкненого кола *повна потужність на зовнішній і внутрішній частинах електричного кола:*

$$P_{\text{пов}} = E I = I^2 (R + r).$$

Потужністю в 1 *ват* (1 *Вт*) характеризують такий струм, \_\_\_\_\_

На практиці використовуються також позасистемні одиниці роботи струму: ват-година (*Вт·год*) і кіловат-година (*кВт·год*). 1 *Вт·год* – це робота електричного струму потужністю 1 *Вт* протягом 1 *год*:

$$1 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 3600 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 3,6 \cdot 10^3 \text{ Дж},$$
$$1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 1 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$$

Коефіцієнт корисної дії джерела струму визначають \_\_\_\_\_

$$\eta =$$

При проходженні струму по нерухомому провіднику, в якому не відбуваються хімічні перетворення, робота струму перетворюється у внутрішню енергію провідника. Це положення експериментально встановив Дж. Джоуль у 1841 р. і на дослідах підтвердив Е. Ленц у 1842 р, тому воно формулюється як **закон Джоуля-Ленца** –



Джеймс Джоуль

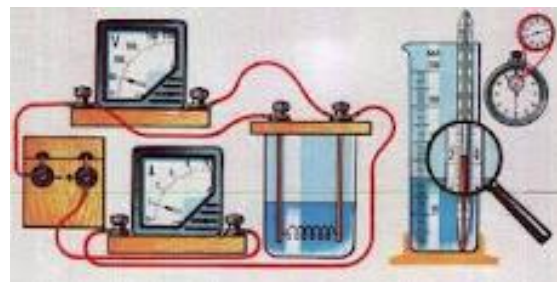


Еміль Ленц

$$Q =$$

Якщо струм змінюється з часом, то

$$Q =$$



Ці формули виражають сумарну (інтегральну) кількість теплоти, що виділяється у провіднику опором  $R$ .

Виразимо кількість теплоти, яка виділяється на окремих ділянках провідника через локальні характеристики провідника та електричного поля в ньому, виділивши всередині провідника елементарний об'єм у вигляді циліндра:

$$dQ = I^2 dR dt = (jdS)^2 \rho \frac{dl}{dS} dt = j^2 \rho dV dt.$$

---

---

називають **питомою потужністю струму**:

$$\bar{w} =$$

Звідси, використовуючи закон Ома для однорідної ділянки кола у диференціальній формі, одержимо вираз *закону Джоуля-Ленца* у диференціальній формі:

$$\bar{w} =$$

Теплову дію електричного струму використовують у лампах розжарювання, побутових нагрівних приладах (нагрівачах води, обігрівачах, плитах, прасках, чайниках, пральних машинах), запобіжниках, промислових муфельних пічках, при контактному електрозварюванні.

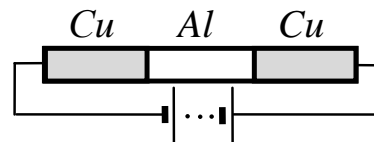




## 2. Електропровідність металів та розчинів електролітів. Застосування електролізу

Численні експерименти, виконані різними вченими в XIX ст., дали багатий матеріал для створення науково обґрунтованої теорії електричної провідності металів.

Перші досліди із з'ясування механізму електропровідності металів виконав Е. Рікке. В електричне коло постійного струму було увімкнено три послідовно з'єднані циліндри з хімічно чистих алюмінію і міді, які щільно притискувались один до одного (рис.). Через коло протягом року пропускали електричний струм. За весь час через циліндри пройшов електричний заряд, що дорівнює  $3,5 \cdot 10^6 \text{ Кл}$ . Проте ніяких ознак перенесення речовини (Cu, Al) не було виявлено. Це було експериментальним доказом того, що \_\_\_\_\_




---

---

---

---

---

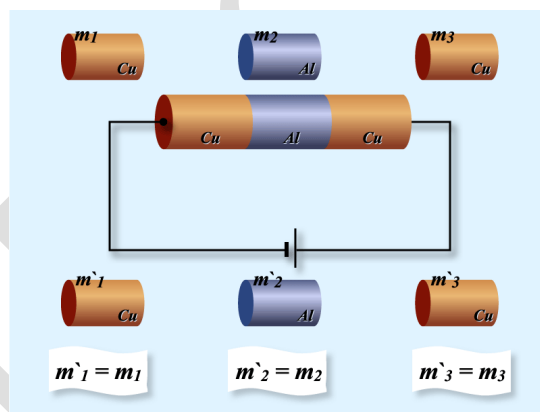
---

---

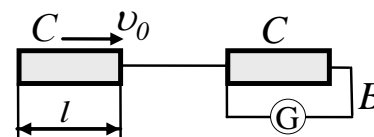
---

---

---



Для вивчення природи носіїв струму в металі Г. Лоренц запропонував такий дослід. Металевий стержень  $C$  рухався поступально з швидкістю  $v_0$  (рис.). Внаслідок взаємодії з кристалічною ґраткою носії струму в провіднику теж рухались з швидкістю  $v_0$ . Стержень різко гальмувався і в момент гальмування замикався нерухомим металевим провідником  $B$  на гальванометр. Носії струму, які не зв'язані жорстко з кристалічною ґраткою, продовжували рухатись за інерцією доти, доки взаємодія з іонами ґратки не зупинить їх. У замкненому колі проходив короточасний струм, який можна виявити за допомогою гальванометра  $G$ . За напрямком струму визначають знак рухомих зарядів. Цей дослід дав змогу визначити \_\_\_\_\_



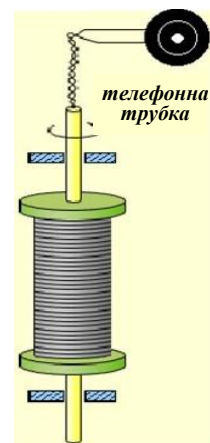

---

---

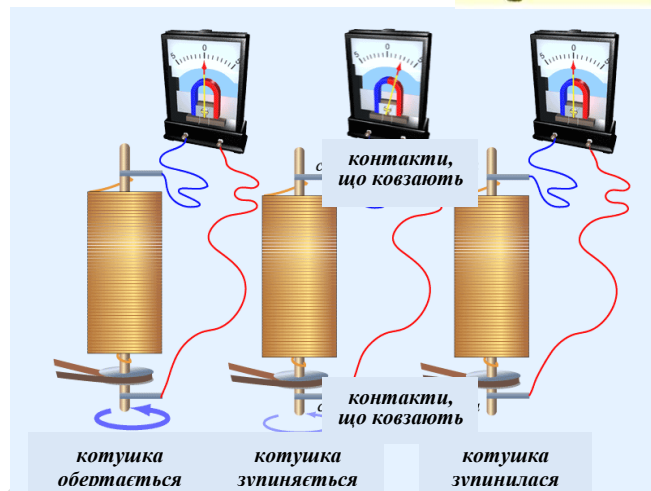
$$\frac{|q|}{m} = \frac{lv_0}{QR}$$

де  $Q$  – \_\_\_\_\_

Л. Мандельштам і Н. Папалексі виконали такий дослід. Вони взяли котушку з намотаним на неї дротом, кінці якої були з'єднані з нерухомою телефонною трубкою. При швидких крутильних коливаннях котушки навколо її осі в колі виникав змінний струм, що викликав тріск в телефонній трубці. Цей дослід підтвердив \_\_\_\_\_



Т. Стюарт і Р. Толмен удосконалили цей дослід, замінивши телефон чутливим гальванометром. Дослід показав, що \_\_\_\_\_



Отже, було експериментально доведено, що носіями струму в металах насправді є електрони.

**Класичну електронну теорію провідності** металів створив П. Друде, а розвинув у своїх працях Г. Лоренц, вона **ґрунтується на таких фундаментальних положеннях:**

- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_



$$n = \quad ,$$

де  $\rho$  – \_\_\_\_\_ ,

$\mu$  – \_\_\_\_\_ .

Середня швидкість теплового (хаотичного) руху електронів електронного газу складає порядку

$$\langle v \rangle = \dots$$

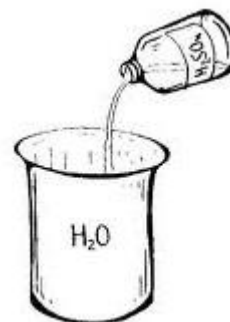
При дії зовнішнього електричного поля в металевому провіднику, окрім теплового руху електронів, виникає ще й направлений рух, який спричинює електричний струм. Середня швидкість направленої руху електронів

$$\langle u \rangle \approx \dots$$

Отже,  $\langle u \rangle \ll \langle v \rangle$ , незначна величина пояснюється \_\_\_\_\_

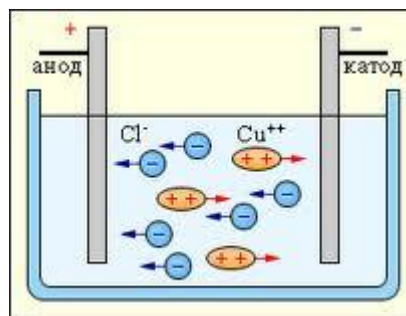
Швидкість поширення електромагнітного поля вздовж провідника дорівнює  $c \approx 3 \cdot 10^8 \frac{M}{c}$ . Направлений рух електронів під дією зовнішнього електричного поля виникає \_\_\_\_\_

**Електроліти** – \_\_\_\_\_



Електролітами можуть бути розчини (найкраще водні)

**Електроліз** – \_\_\_\_\_



При електролізі позитивно заряджені іони (катіони) рухаються до \_\_\_\_\_.  
На катоді відбувається \_\_\_\_\_

Негативно заряджені іони (аніони) рухаються до \_\_\_\_\_. На аноді відбувається \_\_\_\_\_

**Закони Фарадея** – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_



**Перший закон Фарадея** – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

$$m = \quad ,$$

де  $k$  – \_\_\_\_\_

**Другий закон Фарадея** – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

$$k = \quad ,$$

де  $\frac{A}{z}$  – \_\_\_\_\_

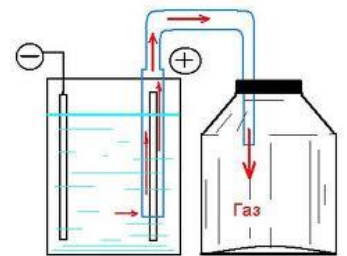
$A$  – \_\_\_\_\_

$z$  – \_\_\_\_\_

$F$  = \_\_\_\_\_

Електроліз широко застосовуються в різних галузях сучасної техніки, в аналітичній хімії, біохімії і т. д.

У *хімічній промисловості* електролізом одержують хлор і фтор, луги, хлорат і перхлорат, надсірчану кислоту і персульфати, хімічно чисті водень і кисень і т. д. При цьому одні речовини одержують шляхом відновлення на катоді, інші – електроокисненням на аноді.



Електроліз в *гідрометалургії* є однією з стадій переробки металовмісткої сировини, що забезпечує отримання товарних металів. У *кольоровій металургії* електроліз використовується для добування металів з руд та їх очищення. Електролізом з розплавлених середовищ отримують алюміній, магній, титан, цирконій, уран, берилій та ін. Для рафінування (очищення) металу електролізом з нього відливають пластини і поміщають їх як аноди в електролізер. При пропусканні струму метал, що підлягає очищенню, піддається анодному розчиненню, тобто переходить у розчин у вигляді катіонів. Потім ці катіони металу розряджаються на катоді, завдяки



чому утворюється компактний осад вже чистого металу. Домішки, що знаходяться в аноді, або залишаються нерозчинними, або переходять в електроліт і видаляються.

Гальванотехніка \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

У гальванотехніці використовують гальваностегію і гальванопластику.

Гальваностегія – це \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Металевий предмет при цьому виступає у ролі катоду, розміщеного у розчині солі того металу, покриття з якого необхідно отримати. В якості анода використовують пластинка з металу-покриття. Способом гальваностегії можна покрити деталь тонким шаром золота або срібла, хрому або нікелю. За допомогою електролізу можна наносити найтонші металеві покриття на різні металеві поверхні. При



такому способі нанесення покриттів, деталь використовують як катод, який міститься у розчині солі того металу, покриття з якого необхідно отримати. Як анод використовується пластинка з того ж металу.

Гальванопластика – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

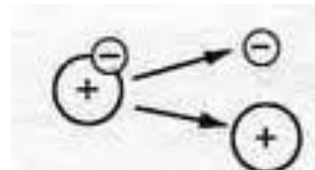
Гальванопластику використовують при виготовленні статуй, бюстів; для анодування – отримання оксидних захисних плівок на металах; для поліровки металів; при електрохімічному фарбуванні металів; в очищенні води – видаленні з неї розчинних домішок; для електрохімічної заточки ріжучих інструментів (хірургічних скальпелів, бритв і тощо).



### 3. Самостійний газовий розряд, уявлення про плазму

Гази складаються з електрично нейтральних атомів і молекул, тобто не мають вільних зарядів (електронів та іонів), здатних під дією електричного поля здійснювати направлений рух. Отже, при нормальних умовах гази є ізоляторами. Газ стає провідником, якщо частина його молекул іонізується.

**Іонізацією газу** називають \_\_\_\_\_



Для іонізації атома або молекули необхідно \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ – **роботу іонізації**  $A_i$ .

Робота іонізації залежить від \_\_\_\_\_

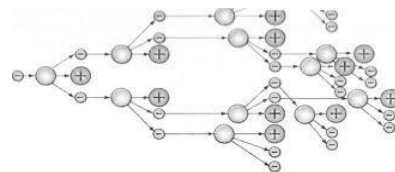
Найслабше зв'язані з ядром зовнішні (валентні) електрони атома. Через те, щоб вирвати валентний електрон з атома, треба виконати меншу роботу, ніж для виривання будь-якого іншого електрона. Після того як з атома вирвали один електрон, зміцнюється зв'язок з ядром інших електронів

\_\_\_\_\_ називають **газовим розрядом**.

**Несамостійним газовим розрядом** називають \_\_\_\_\_

Несамостійний газовий розряд зникає відразу після припинення дії іонізатора.

**Самостійним газовим розрядом** називають \_\_\_\_\_



Розрізняють такі **види самостійного розряду**:

**1. Тліючий розряд.** \_\_\_\_\_

Основними частинами тліючого розряду є (рис.):

I – катодний темний простір (відбувається сильне прискорення позитивних іонів, які вибивають електрони з катода, і електронів, які вилетіли з катода);



II – різко відділене від катодного простору тліюче свічення, яке поступово переходить в область III (електрони спричиняють інтенсивну ударну іонізацію молекул газу і втрачають свою енергію. Тут утворюються позитивні іони, необхідні для того, щоб підтримувати розряд. Тліюче свічення в цій області є результатом рекомбінації електронів та іонів);

III – область фарадеєвого темного простору (область, куди не долітають швидкі електрони);

IV – додатний позитивний стовп – стовп газу, який світиться



і який визначає оптичні властивості газу (світиться за рахунок переходу молекул із збудженого стану в основний і за рахунок рекомбінації).

Тліючий розряд викорис-товують в лампах денного світла, стабілізаторах напруги, реклам-них газорозрядних трубках, плазмових телевізорах тощо.

2. *Іскровий розряд.* Іскровий розряд – \_\_\_\_\_

---

---

---

Іскровий розряд має вигляд пучка яскравих зигзагоподібних розгалужених тонких ниток (рис.), які пронизують розрядний проміжок, швидко гаснуть і замінюються новими. У природних умовах іскровий розряд спостерігається у вигляді блискавки.



Це явище вико ристовують в електроіскровому методі різання, свердління та інших видах точної обробки металу. Іскровий проміжок застосовують як запобіжник від перенапруг в електричних лініях передач.



3. *Коронний розряд* – \_\_\_\_\_

---

---

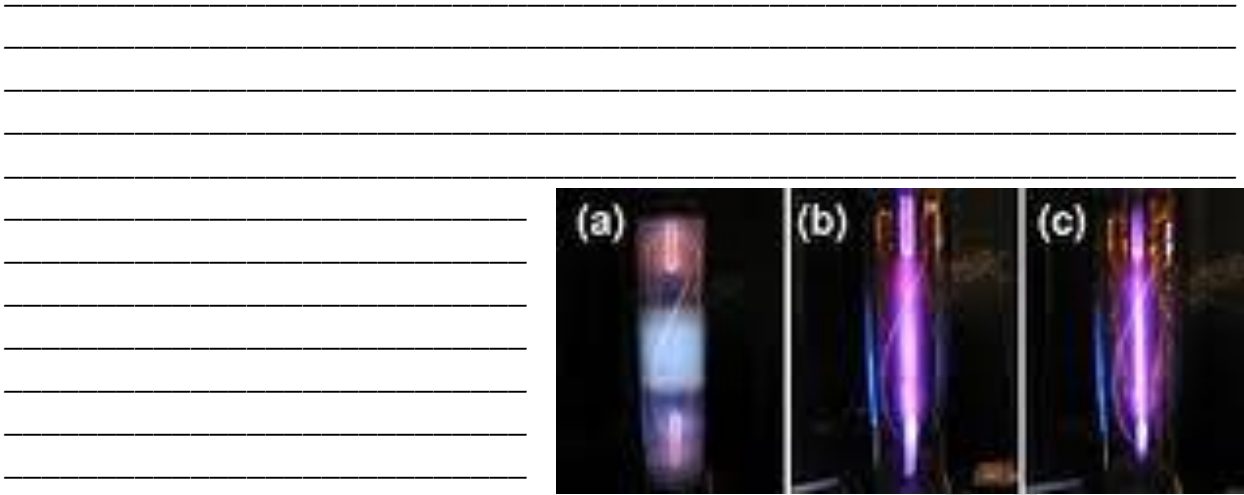
---

---

---

У лініях високовольтних передач коронний розряд спричиняє шкідливі витоки струму і втрати електричної енергії. Щоб зменшити коронування, проводи високовольтних ліній беруть досить великого діаметра, а їхні поверхні виготовляють гладкими





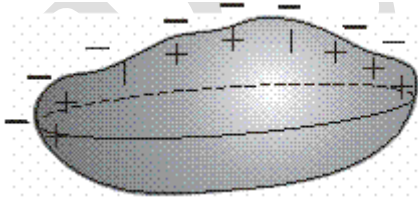
Дуговий розряд використовують як джерело світла, для зварювання і різання металів, в дугових печах для виплавки сталі, чавуну, отримання карбіду кальцію, оксиду азоту.



#### 4. Контактні електричні явища та термоелектронна емісія

Електрон провідності може вилетіти з будь-якого металу тоді, коли його кінетична енергія перевищує роботу виходу електрона з металу.

Відповідно до класичної електронної теорії металів, у них існує велика кількість вільних носіїв заряду, які у випадку відсутності електричного поля поводять себе подібно атомам (молекулам) ідеального газу. Як поводять себе вільні електрони, чи можуть вони покинути поверхню металу?



Метал в цілому – електрично-нейтральний. Електрони в ньому рухаються з різними швидкостями і знайдуться такі, що навіть при нормальних умовах, маючи значну кінетичну енергію, вириваються з металу. Але ж при цьому металодночасово заряджається позитивно. При певних температурах над металом може утворитись електронна хмара (рис.), в якій встановиться термодинамічна рівновага між кількістю електронів, які вириваються з металу та тими, що в нього повертаються, втративши кінетичну енергію. Товщина цього шару, як звичайно, становить декілька міжатомних відстаней, характерних для даного металу. Різниця потенціалів між електронною хмариною та металом називається *поверхневим стрибком потенціалу* ( $\Delta U$ ). Саме її виникнення протидіє подальшому вириванню електронів, оскільки їм треба долати різницю потенціалів, яка виникла на межі контакту метал–повітря.



Для хімічно чистих металів  $\Delta U$  має досить різні значення: Cu – 4,47 В, Pt – 6,278 В, Zn – 3,74 В та інші. Отже, для виходу електрона з металу повинна виконуватись робота проти сил затримуючого електричного поля біля поверхні металу:  $A = e \Delta U$ . Робота, яку треба виконати, щоб перевести електрон із металу в навколишній простір, називається *роботою виходу електрона з металу*. Зрозуміло, що  $A$  – досить різна для різних металів, крім того залежить від стану поверхні металу. Так, бруд, волога, наявність окислів – збільшують роботу виходу.

Експериментально встановлено, що коли привести в дотик два незаряджених метали різної природи, то в місці контакту виникає різниця потенціалів, яку називають *контактною різницею потенціалів*. Величина контактної різниці потенціалів залежить від хімічного складу металів та їхньої температури. У цьому полягає **перший закон Вольта**, відкритий в кінці XVIII ст. При цьому один метал заряджається позитивно, інший – негативно. Досліджуючи контакти різних металів, Вольта склав ряд, в якому кожний попередній метал у місці контакту з наступним, наелектризується позитивно, а кожний наступний – негативно:

Al+	Zn+	Pb+	Sn+	Sb+	Bi+	Hg+	Fe+	Cu+	Ag+	Au+	Pt+	Pd
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	----

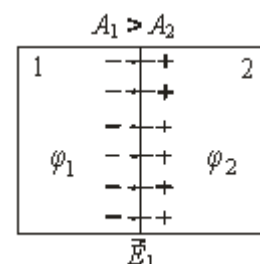
У цьому ряді кожний попередній метал має меншу роботу виходу, ніж наступний, тому електрони переходять від металу з меншою роботою до металу з більшою роботою виходу.

**Другий закон Вольта:** якщо послідовно скласти декілька різних металевих провідників при однакових температурах, то різниця потенціалів між крайніми – не залежить від хімічних властивостей проміжних провідників, а тільки від початкового та кінцевого. Це не складно довести. Нехай маємо ланцюжок із чотирьох різних металів, що володіють відповідно потенціалами  $\varphi_1 \dots \varphi_4$  (рис.). Тоді

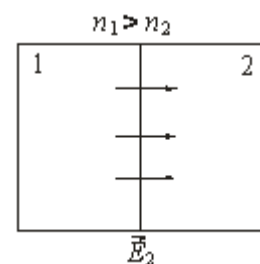


$$U_{14} = U_{12} + U_{23} + U_{34} = (\varphi_2 - \varphi_1) + (\varphi_3 - \varphi_2) + (\varphi_4 - \varphi_3) = (\varphi_4 - \varphi_1).$$

Причину виникнення контактної різниці потенціалів можна пояснити так. Розглянемо контакт двох різних металів **1** і **2** (рис. а) при сталій температурі. Нехай  $A_1 > A_2$ , тоді електронам легше вирватись із другого металу, ніж з першого. Як наслідок, у **2** не вистачатиме деякої кількості електронів і він зарядиться позитивно, а в **1** їх буде надлишок, тому він зарядиться негативно.



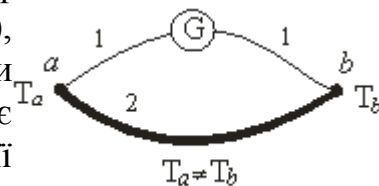
Отже, на стику металів виникає зовнішня контактна різниця потенціалів, а сили електричного поля загальмовують подальший перехід електронів, настає динамічна рівновага. Таким чином, першопричиною виникнення контактної різниці потенціалів є різна робота виходу електронів з металу.



Іншою причиною цього явища є різна густина електронного газу. Розглянемо контакт двох різнорідних металів (рис. б) таких, що концентрація електронів в **1** більша за концентрацію в **2** ( $n_1 > n_2$ ). Тоді тиск електронного газу  $p_1 > p_2$ , тобто потік електронів із **1** у **2** – більший,

ніж зворотній. Як наслідок, метал **2** зарядиться негативно, а **1** – позитивно. Перехід електронів триватиме доти, поки надлишкова сила тиску електронного газу не зрівноважиться силою дії електростатичного поля  $\vec{E}_2$ . А це значить, що між металами виникне контактна різниця потенціалів.

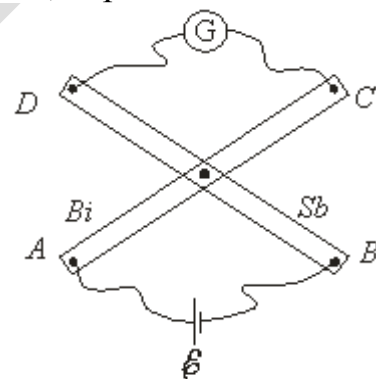
У 1821 р. Зеєбек помітив, що в колі (рис.), утвореному із двох різнорідних металів, контакти яких знаходяться при різній температурі, виникає термоелектрорушійна сила (ТЕРС). Виникнення її пояснюється порушенням термодинамічної рівноваги електронів провідності на контакті двох металів. ТЕРС прямо пропорційна різниці температур контактів:  $\varepsilon = \alpha (T_a - T_b)$ , де  $\alpha$  – величина характерна для різних контактів ( у середньому знаходиться в діапазоні  $10^{-4} \div 10^{-5}$  В/К). До пар металів, в яких функціональна залежність  $\varepsilon = f(T)$  має лінійний характер в значному діапазоні температур відносяться: (Cu, Bi), (Au, Cu), (Pt, Fe) та ін. Отже, у термоелементі теплова енергія безпосередньо перетворюється в електричну.



Аналіз цього явища дає висновок: щоб дістати постійний струм, треба один спай увесь час нагрівати, другий – охолоджувати. Явище термоелектрики використовується і для вимірювання температур (термопара).

ТЕРС виникає також у випадку заміни металів на напівпровідники. Так, термоелектричні перетворювачі виготовляють із величезної кількості (кілька тисяч – десятків тисяч) кремній–германієвих стовпчиків, парні контакти яких щільно прилягають до поверхні нагрівника (наприклад, атомного реактора, доменної печі тощо), а непарні перебувають при нормальних умовах.

1934 року було відкрито ефект Пельтьє, який взагалі кажучи, обернений до розглянутого вище. Його суть наступна: під час проходження електричного струму через коло, що складається із двох різнорідних металів – один спай нагрівається, а другий – охолоджується. Це явище можна продемонструвати відповідно до схеми, поданої на рис.



Явище випромінювання електронів нагрітими тілами називається термоелектронною емісією. Емісія електронів зростає із збільшенням температури.

Якщо розжарений метал зробити катодом вакуумної трубки (прикласти до нього негативний потенціал) та ввести ще один електрод, приклавши до нього позитивний потенціал (анод), то електричне поле між катодом та анодом відтягуватиме електрони від катода, електронна хмаринка навколо нього почне розсіюватись, створяться умови для подальшої емісії електронів. Отже, в трубці, яка одержала назву двохелектродної лампи або діодом створиться термоелектронний струм.

Величина струму з одиничної поверхні катода називається густиною термоелектронного струму  $j$ . Провідність діода не залишається величиною сталою, а залежить від анодної напруги  $U_a$ , температури катода  $T$  та матеріалу, з якого він виготовлений.

Із викладеного зрозуміло, що діод пропускає електричний струм лише в одному напрямку. Ця властивість використовується в лампових випрямлячах.

Для керування рухом електронів між катодом та анодом можуть встановлюватись додаткові електроди – сітки. Залежно від їх кількості розрізняють лампи – тріоди, пентоди тощо. Такі лампи використовують, як і транзистори, для генерування та підсилення електричних коливань.

РУКОПИС

1. Магнітне поле. Вектор магнітної індукції
2. Закон Ампера
3. Контур зі струмом в магнітному полі. Магнітний момент
4. Принцип роботи електродвигунів
5. Сила Лоренца. Прискорювачі заряджених частинок. Магнітні пастки

### 1. Магнітне поле. Вектор магнітної індукції

Магнітні властивості речовини були відомі людству давно, ще понад 2000 років до нашої ери. Стародавні китайці використовували магніти як компас. Глибоке фізичне дослідження магнітів та їх властивостей відбулося лише в XIX столітті.

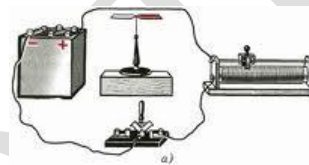


Дослід показує, що магніти мають два неподільні полюси  $N$  і  $S$ , однойменні полюси \_\_\_\_\_, а різнойменні \_\_\_\_\_.

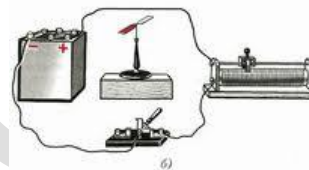


Взаємодія магнітів відбувається через магнітне поле.

У 1820 році датський фізик Х. Ерстед показав, що магнітне поле виникає також навколо \_\_\_\_\_



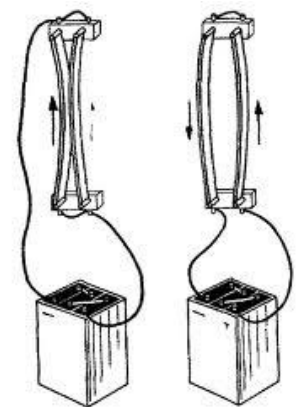
Магнітна стрілка, розташована поряд з провідником, при пропусканні по ньому електричного струму \_\_\_\_\_



Зі зміною напрямку струму у провіднику на протилежний змінюється і напрям дії сили на стрілку. З віддаленням від провідника орієнтуюча дія зменшується.

У цьому ж році А. Ампер встановив, що два паралельні провідники, по яких течуть струми одного напрямку, \_\_\_\_\_, різного напрямку – \_\_\_\_\_.

Слід відмітити, що на відміну від електричного поля, яке діє як на нерухомі, так і на рухомі електрично заряджені частинки і тіла розташовані в ньому, магнітне поле діє лише на \_\_\_\_\_



Магнітне поле – це \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

---

---

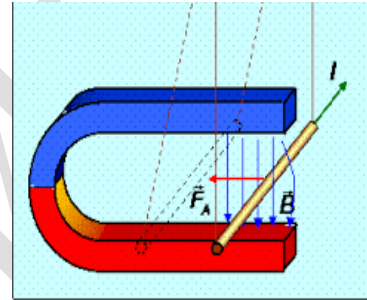
---

Силовою характеристикою магнітного поля є \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_. Означення вектора індукції магнітного поля  $\vec{B}$  може бути дане трьома рівноправними способами:

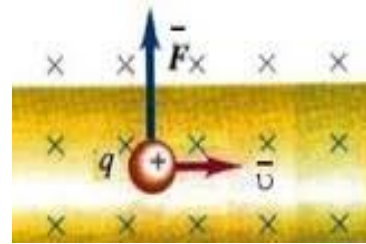
- 1) за дією магнітного поля на елемент струму;
- 2) за дією магнітного поля на рухоми заряджену частинку;
- 3) за обертальною дією магнітного поля на рамку зі струмом.

Отже, індукція магнітного поля  $\vec{B}$  – це \_\_\_\_\_



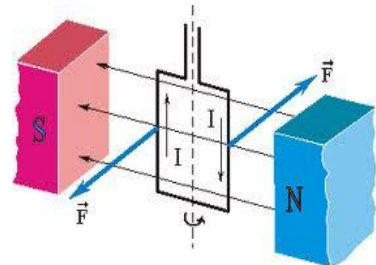
$$|\vec{B}| =$$

Або індукція магнітного поля  $\vec{B}$  – це \_\_\_\_\_



$$|\vec{B}| =$$

Або ж індукція магнітного поля  $\vec{B}$  – це \_\_\_\_\_



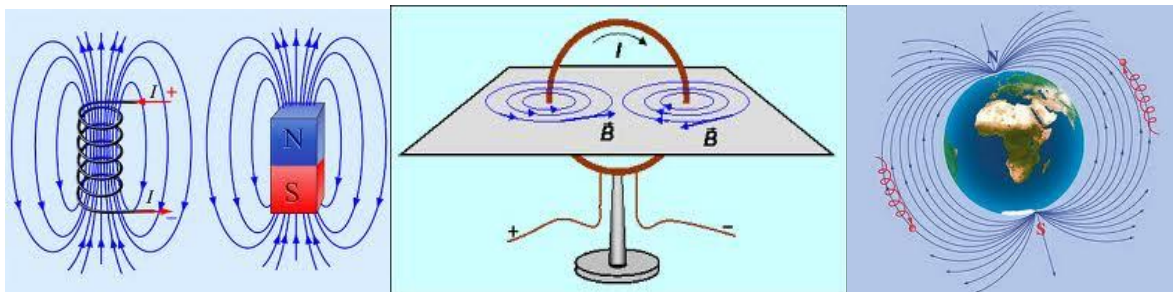
$$|\vec{B}| =$$

Одиницею індукції магнітного поля є 1 \_\_\_\_\_ (\_\_\_\_\_): 1 Тл = \_\_\_\_\_ .

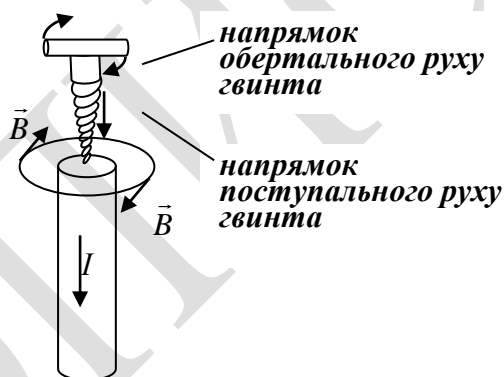
Для графічного зображення магнітного поля користуються лініями магнітної індукції.

*Лінії магнітної індукції (силовими лініями магнітного поля) називають \_\_\_\_\_*

Числове значення вектора  $\vec{B}$  визначає щільність ліній магнітної індукції на одиницю площі. Силкові лінії постійного магніту беруть початок на північному полюсі і закінчуються на південному полюсі. Силкові лінії провідника зі струмом мають вигляд концентричних кіл.

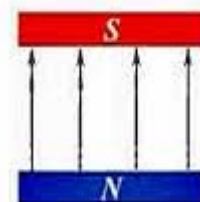


Напрямок ліній магнітної індукції (вектора індукції магнітного поля  $\vec{B}$ ) визначають за **правилом "правого" гвинта (свердлика)**: якщо поступальний рух гвинта з правою нарізкою збігається за напрямом струму, то напрям обертального руху ручки гвинта вкаже напрям ліній магнітної індукції.



Найчастіше розглядають однорідні поля. *Однорідним магнітним полем називають \_\_\_\_\_*

\_\_\_\_\_ Силкові лінії такого поля мають вигляд паралельних прямих з однаковою щільністю.

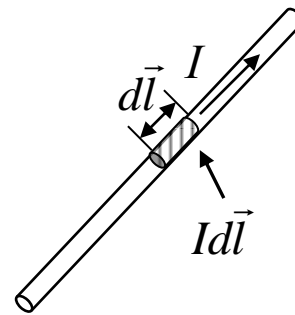


Розділ магнетизму, що вивчає \_\_\_\_\_, називають **магнітостатикою**.

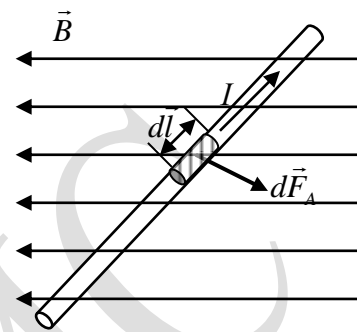
## 2. Закон Ампера.

Основні принципи побудови теорії стаціонарних магнітних полів подібні до принципів побудови електростатики. За аналогією з пробним зарядом  $dq$  в електростатиці, під час вивчення магнетизму вводять абстрактне поняття – пробний елемент струму.

Елементом струму називають \_\_\_\_\_

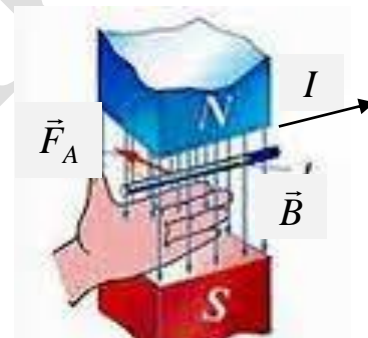


Основним експериментальним законом магнетизму є **закон Ампера**: \_\_\_\_\_



$$d\vec{F}_A =$$

Напрямок сили визначають за правилом векторного добутку. Але для зручності часто використовують **правило лівої руки**: \_\_\_\_\_



Сила, з якою магнітне поле діятиме на весь провідник, розміщений у ньому, буде визначатись інтегруванням виразу значення сили Ампера по всій довжині провідника:

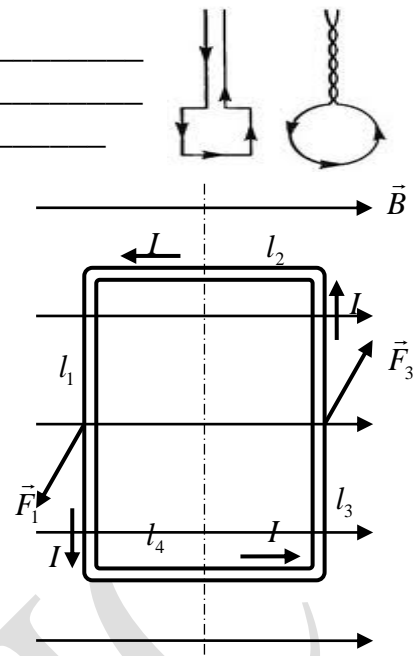
$$\vec{F}_A =$$

### 3. Контур зі струмом в магнітному полі. Магнітний момент

Контуром зі струмом називають \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Розглянемо прямокутний контур з постійним струмом  $I = const$ , розміщений в однорідному магнітному полі паралельно лініям індукції. Магнітне поле діє на кожну сторону рамки, напрями сил Ампера показано на рисунку. Оскільки сторони 2 і 4 розташовані паралельно до ліній індукції магнітного поля, то  $\vec{F}_2 =$  і  $\vec{F}_4 =$ , а сили  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_3$  утворюють пару сил, які створюють \_\_\_\_\_



$$\vec{F}_1 = \vec{F}_3 =$$

де  $l_1 = l_2 =$  \_\_\_\_\_

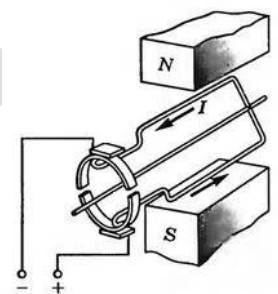
Обертальний момент сил, що діють на контур зі струмом:

$$M = 2F_1 \frac{l_2}{2} \sin \varphi = IB l_1 l_2 \sin \varphi,$$

$$M =$$

де  $S = l_1 l_2 =$  \_\_\_\_\_

$\varphi =$  \_\_\_\_\_

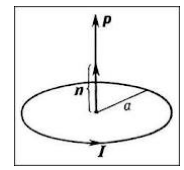


Оскільки магнітним моментом контуру зі струмом називають \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ (напрям вектору  $\vec{n}$  визначають за правилом правого гвинта відносно напрямку струму у контурі):

$$\vec{p}_m =$$



Тоді в загальному вигляді обертальний момент сил, що діють на контур зі струмом:

$$\vec{M} =$$

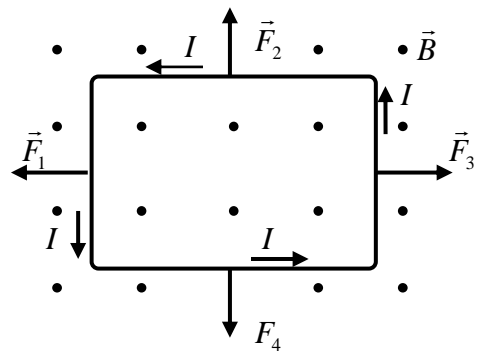
Обертальний момент сил максимальний, якщо  $\vec{p}_m \perp \vec{B}$  (площина рамки розташована вздовж ліній індукції магнітного поля) і дорівнює нулю, коли  $\vec{p}_m \uparrow \vec{B}$ . Вміщений у магнітне поле контур зі струмом під дією обертального моменту буде намагатися прийняти таке положення, щоб \_\_\_\_\_

Таке положення відповідає \_\_\_\_\_ рівновазі.

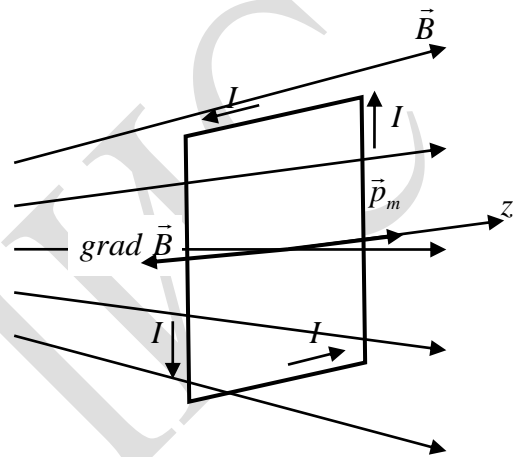


Якщо площина контуру зі струмом перпендикулярна лініям індукції магнітного поля, то  $\vec{p}_m \uparrow \uparrow \vec{B}$  (на рис.

точками позначено напрям вектора  $\vec{B}$  на нас). Сила Ампера, яка у цьому разі діє на кожну сторону контуру зі струмом, лежить у площині контуру і, залежно від взаємного напрямлення  $\vec{B}$  та  $I$ , буде спрямована назовні або всередину контуру. Тобто контур зі струмом під дією цих сил або \_\_\_\_\_, або \_\_\_\_\_, але обертальний момент дорівнюватиме \_\_\_\_\_.



Плоский контур зі струмом у неоднорідному магнітному полі, окрім обертальної дії та деформації зазнає ще й додаткових дій, що зумовлюють переміщення контуру в бік збільшення або зменшення магнітної індукції  $\vec{B}$  залежно від напрямку струму  $I$ . У випадку зображеному на рис., контур буде втягуватиметься в область збільшення індукції  $\vec{B}$  магнітного поля (переміщуватиметься ліворуч). Результуюча сила з якою магнітне поле втягує або виштовхує контур зі струмом:



$$\vec{F} = \nabla W_n$$

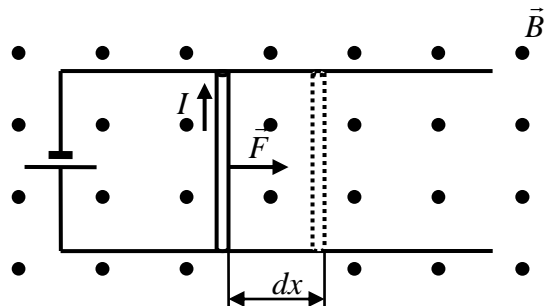
де  $W_n = -(\vec{p}_m \cdot \vec{B}) - \dots$

Контурни зі струмом використовують у приладах для вимірювання індукції  $\vec{B}$  магнітного поля за відомим значенням обертального моменту сил користуючись формулою  $\vec{M} = [\vec{p}_m \cdot \vec{B}]$ .



#### 4. Принцип роботи електродвигунів

На незакріплений провідник довжиною  $l$  по якому тече струм силою  $I$  (наприклад, одна із сторін контуру може ковзати по двом сусіднім, див. рис.) однорідне магнітне поле індукцією  $\vec{B}$  діє із силою Ампера:



$$\vec{F}_A = \dots$$

Магнітне поле, переміщуючи провідник під дією сили  $\vec{F}$ , на відстань  $dx$ , виконає елементарну роботу

$$dA = \underbrace{F dx \cos(\vec{F}, d\vec{x})}_{=1} = IlB_n dx = IB_n dS = Id\Phi,$$

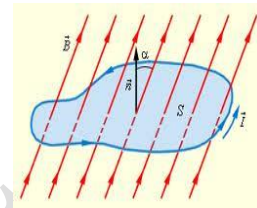
де  $d\Phi$  – \_\_\_\_\_

Магнітним потоком або потоком вектора індукції магнітного поля називають \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

$$\Phi = _____,$$



де  $\alpha$  – \_\_\_\_\_

Одиницею вимірювання магнітного поля є \_\_\_\_ (\_\_\_\_\_):  $1B\text{б} = _____$ .

У разі довільного переміщення провідника зі струмом у магнітному полі повна робота

$$A = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} Id\Phi = I(\Phi_2 - \Phi_1) = _____.$$

тобто чисельно рівна добуткові сили струму на зміну магнітного потоку крізь площу поверхні, яку описує провідник, переміщуючись у магнітному полі.

Обертаючи контур зі струмом  $I$  під дією пари сил на кут  $d\varphi$ , магнітне поле виконає елементарну роботу

$$dA = (\vec{M} \cdot d\vec{\varphi}) = -M \cdot d\varphi,$$

де  $\vec{M} = [\vec{p}_m \cdot \vec{B}]$  – обертальний момент сил, з яким магнітне поле діє на контур зі струмом, намагаючись зменшити кут  $d\varphi$  між вектором нормалі контуру  $\vec{n}$  і вектором індукції магнітного поля  $\vec{B}$ ; знак “-“ вказує на зменшення кута при поверненні контуру у положення стійкої рівноваги.

Повна робота щодо повороту контуру від кута  $\varphi_1$  до кута  $\varphi_2$

$$A = - \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} M \cdot d\varphi = - \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} p_m B \sin \varphi d\varphi = - p_m B (-\cos \varphi) \Big|_{\varphi_1}^{\varphi_2} = \\ = -ISB(\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) = I(BS \cos \varphi_2 - BS \cos \varphi_1) = _____.$$

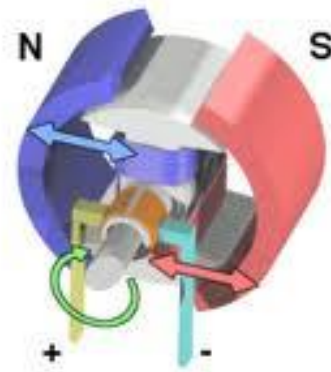
Тобто *робота при переміщенні провідника або контуру зі струмом у магнітному полі завжди може бути обчислена як*

$$A = _____.$$

Якщо магнітний потік, що пронизує замкнутий провідник зі струмом, зростає,  $\Delta\Phi > 0$ , відповідно,  $A > 0$ , тобто робота виконується за рахунок джерела струму контуру – на цьому явищі ґрунтується принцип дії \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_. Якщо  $\Delta\Phi < 0$ ,  $A < 0$ , це означає, що робота виконується за рахунок зовнішніх сил і джерело може накопичувати енергію – принцип дії \_\_\_\_\_.

Складаються з \_\_\_\_\_

Причиною обертання ротора електродвигуна є \_\_\_\_\_



Розрізняють електродвигуни постійного та змінного струму. Електродвигуни постійного струму застосовують в електротягових і підймальних пристроях, в електроприводі з широким діапазоном регулювання швидкості (електрозварювальні установки, електропривод баштових кранів тощо) Електродвигуни змінного струму поділяють на синхронні та асинхронні. Синхронні електродвигуни застосовують у нерегульованому електроприводі промислових установок (насосів, компресорів, повітродувок, млинів різного призначення, прокатних станів, дизель-генераторних установок та ін.). На асинхронні двигуни припадає близько 90-95% від загальної кількості електродвигунів через їх простоту, високу надійність в експлуатації, малі габаритні розміри і низьку вартість. За функціональним призначенням асинхронних електродвигунів розрізняють загальнопромислові, кранові, вибухобезпечні, ліфтові, екскаваторні. Вони є частиною електроприводу побутових приладів, електроінструменту, металорізальних верстатів, ковальсько-пресованих машин, насосів, вентиляторів, компресорів, транспортних та підйально-транспортних засобів (конвеєрів, ескалаторів, будівельних розвантажувальних і навантажувальних машин, кранів, підйомників і люльок, шахтних та ліфтових підймальних установок тощо). Потужність електродвигунів складає від десятих часток до десятків мегават. На рисунку наведені електродвигуни різної потужності у порівнянні з батарейкою «Крона». Електродвигуни мають великі переваги у порівнянні з іншими видами двигунів (паровими, внутрішнього згорання): вони екологічно чисті – при роботі не виділяють шкідливих газів, диму або пари; економічні – не потребують запасу палива і води, легко встановлюються у будь-якому доступному місці (на стіні, під підлогою електротранспорту, у корпусі електроінструментів тощо).



Джерелом механічної енергії електрогенератора можуть бути парова турбіна, потік води, вітер, двигун внутрішнього згорання або навіть сила людини. Електрогенератори поділяють на генератори постійного і змінного струму. Генератори постійного струму використовуються у різноманітних зарядних пристроях, в автомобілях. Бензинові та дизельні генератори змінного струму застосовують для електрифікації будівель, забезпечення електроживленням будівельних майданчиків (при будь-яких дорожніх роботах, зварювальних роботах, алмазному різанні, бурінні свердловин, освітлюванні та обігріванні приміщень, ремонті приміщень) у районах, де немає магістрального енергопостачання; окремих виробничих систем, у промисловості, у сільському господарстві, на повітряних і водних суднах воєнного та цивільного флоту; на об'єктах, де обов'язковим є наявність безперебійного електроживлення (на аеродромах, медичних закладах, фінансових установах тощо). Вітро- та гідрогенератори використовуються як альтернативні джерела енергії на гірській місцевості.



## 5. Сила Лоренца. Прискорювачі заряджених частинок. Магнітні пастки

Елемент струму – це провідник довжиною  $dl$  всередині якого за час  $dt$  через поперечний переріз переноситься  $dN$  електронів. За законом Ампера на даний елемент струму з боку магнітного поля індукцією  $\vec{B}$  діє сила:

$$d\vec{F}_A = \dots$$

у скалярному вигляді:

$$dF_A = \dots$$

де  $v$  – швидкість направленої руху електронів уздовж провідника.

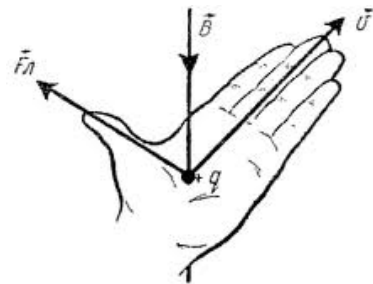
Поділивши ліву і праву частини останнього рівняння на кількість носіїв струму  $dN$ , отримаємо числове значення сили, з якою магнітне поле індукцією  $\vec{B}$  діє на окремий електрон:

$$F = \frac{dF_A}{dN} = \dots$$

називають силою Лоренца:

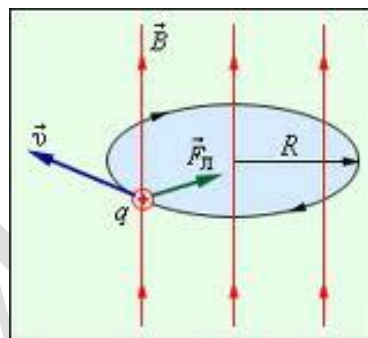
$$\vec{F}_l = \dots$$

напрямок сили Лоренца, визначають за правилом **правило лівої руки**: \_\_\_\_\_



Для визначення напрямку дії сили Лоренца на негативно заряджену частинку, напрям сили, отриманий за правилом лівої руки змінюють на протилежний або використовують праву руку.

Оскільки сила Лоренца завжди направлена перпендикулярно до напрямку швидкості руху зарядженої частинки, то магнітне поле не виконує роботу по її переміщенню, а лише \_\_\_\_\_



\_\_\_\_\_ Абсолютне значення швидкості зарядженої частинки і, відповідно, кінетична енергія при цьому не змінюється.

Якщо на рухому заряджену частинку окрім магнітного поля з індукцією  $\vec{B}$  діє і електричне поле з напруженістю  $\vec{E}$ , то результуюча сила, прикладена до частинки, дорівнює векторній сумі сил – сили, що діє з боку електричного поля, і сили Лоренца:

$$\vec{F} = \dots \quad \text{– формула Лоренца}$$

Швидкість  $\vec{v}$  у цій формулі – це швидкість зарядженої частинки відносно магнітного поля, оскільки при переході від однієї інерціальної системи до іншої змінюються не лише швидкість частинки, але й силові характеристики полів  $\vec{E}$  і  $\vec{B}$ .

Поведінка зарядженої частинки в однорідному постійному магнітному полі залежить від орієнтації швидкості її руху відносно ліній вектора індукції:

1. Якщо вектор швидкості руху частинки збігається з напрямом вектора індукції магнітного поля  $\vec{v} \uparrow \uparrow \vec{B}$ , то частинка \_\_\_\_\_

2. Якщо вектор швидкості руху частинки перпендикулярний до напрямку вектора індукції магнітного поля  $\vec{v} \perp \vec{B}$ , то \_\_\_\_\_

$$F_{\perp} = F_{\text{доц}}, \quad qBv = ma_{\text{доц}}, \quad qBv = \frac{mv^2}{2}.$$

Тобто частинка буде рухатися по колу радіусом:

$$r = \quad ,$$

період обертання

$$T = \quad ,$$

$$T = \quad .$$

не залежить від швидкості руху частинки.

3. Якщо заряджена частинка влітає у магнітне поле під кутом  $\alpha$  до силових ліній,  $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$ , то вектор її швидкості  $\vec{v}$  можна розкласти на дві складові: паралельну до вектора  $\vec{B}$  ( $v_{\parallel}$ ) і перпендикулярну до нього ( $v_{\perp}$ ). Тобто частинка одночасно буде здійснювати поступальний рух вздовж ліній індукції магнітного поля зі сталою швидкістю  $v_{\parallel}$  і рух по колу зі швидкістю  $v_{\perp}$  описуючи гвинтову траєкторію (див. рис. ):

$$v_{\parallel} = \quad ,$$

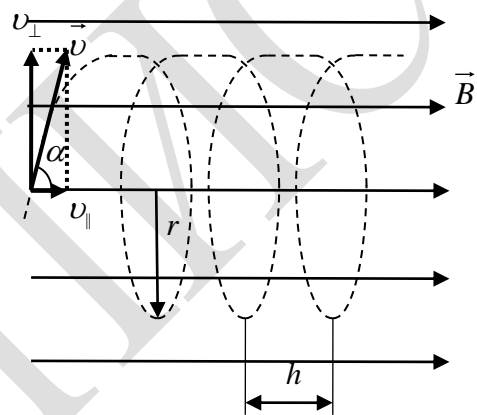
$$v_{\perp} = \quad .$$

Радіус витків гвинтової лінії

$$r = \quad ,$$

а крок гвинтової лінії руху зарядженої частинки

$$h =$$



4. Складнішою є траєкторія руху зарядженої частинки у неоднорідному магнітному полі. Якщо, наприклад, заряджена частинка рухається вздовж напрямку зростання індукції магнітного поля, то з останніх формул видно, що  $r$  і  $h$  будуть \_\_\_\_\_, тобто частинка рухатиметься \_\_\_\_\_. На цьому явищі побудований принцип магнітного фокусування пучків заряджених частинок.

Область фізики і техніки, в якій вивчаються питання \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ називають *електронною оптикою*.

До електронно-оптичних елементів і приладів відносять:

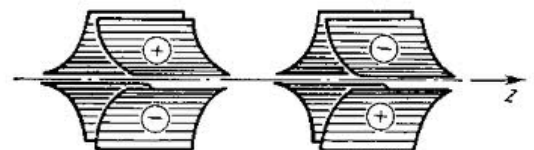
- *магнітні і електронні лінзи*, які призначені \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

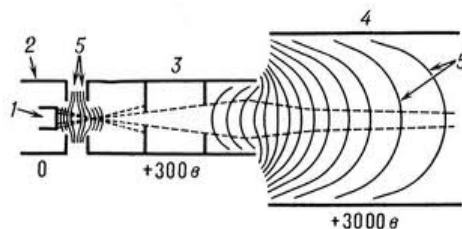
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



Магнітні та електронні лінзи застосовуються для одержання зображень за допомогою електронних та іонних пучків, формування, фокусування і відхилення яких відбувається за допомогою електронних і магнітних полів. Застосовуються в електронно-променевих трубках, електронних мікроскопах, електронних прискорювачах, аналоговому телебаченні та радіолокації;



- *електронний мікроскоп*, призначений для

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



Дає можливість отримувати зображення окремих молекул і важких атомів, досліджувати мікрорельєф поверхонь, розподіл хімічного складу речовини на поверхні об'єкта, здійснювати структурний аналіз;

- *мас-спектрометри* – прилади, призначені для

\_\_\_\_\_ Використовуються в ядерній енергетиці, геології, геохімії для елементарного і структурного молекулярного аналізу тощо;



- *прискорювачі заряджених частинок* – установки, призначені для

---

---

---

---

За типом заряджених частинок, які підлягають прискоренню, розрізняють протонні, електронні та іонні прискорювачі. За формою траєкторій, уздовж яких розганяють частинки, розрізняють лінійні і циклічні прискорювачі (синхрофазотрон, синхротрон, фазотрон, циклотрон, мікротрон, бетатрон). Використовуються у наукових дослідженнях з атомної та ядерної фізики елементарних частинок, у хімії, біофізиці, геофізиці, а також у ряді прикладних галузей (дефектоскопії, променевої терапії тощо).



## Лекція № 14

### Закони магнітостатики

1. Магнітне поле прямого та колового провідників зі струмом
2. Взаємодія струмів
3. Закон повного струму, магнітне поле соленоїда
4. Робота при переміщенні провідника зі струмом в магнітному полі.  
Енергія провідника зі струмом

#### 1. Магнітне поле прямого та колового провідників зі струмом

Досліджуючи магнітне поле провідників зі струмом заданої конфігурації, французькі вчені Ж. Біо і Ф. Савар експериментально встановили, що індукція магнітного поля  $\vec{B}$  складним чином залежить від розмірів і конфігурації провідника, завжди пропорційна силі струму  $I$ , що протікає у ньому та зменшується при віддаленні точки спостереження від провідника ( $\sim \frac{1}{r} \dots \frac{1}{r^2}$ ). Французький астроном, математик і фізик П. Лаплас теоретично узагальнив ці експериментальні факти і отримав математичні формули, розрахунки за якими завжди збігалися з емпіричними вимірюваннями індукції магнітного поля  $\vec{B}$ .



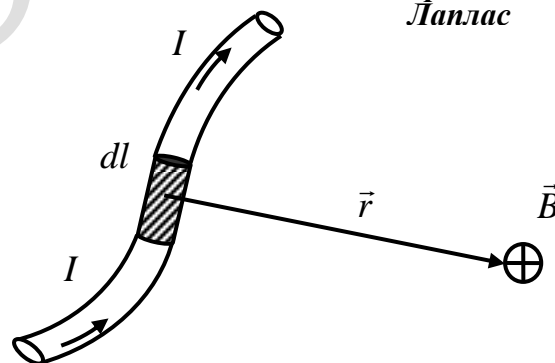
Жан-Батист Біо



Фелікс Савар



П'єр-Сімон Лаплас




---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

отримав назву закону **Біо-Савара-Лапласа**:

$d\vec{B} = \dots$

або у скалярному вигляді

$dB = \dots$

$\vec{r} - \dots$

---

$\alpha - \dots$

$\mu_0 = \dots$

$\mu - \dots$

---



Цей закон дозволяє розрахувати індукцію магнітного поля провідника зі струмом довільної конфігурації при застосуванні *принципу суперпозиції магнітних полів* – \_\_\_\_\_

---



---



---

$$\vec{B} = \quad ,$$

інтегрування здійснюється вздовж усієї довжини провідника.

Для розрахунку індукції магнітного поля  $\vec{B}$  провідників зі струмом різних конфігурацій у довільних точках простору використовують формулу, що об'єднує закон Біо-Савара-Лапласа та принцип суперпозиції магнітних полів:

$$\vec{B} = \quad ,$$

або

$$\vec{H} = \quad ,$$

де  $\vec{H}$  – \_\_\_\_\_

---



---

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}.$$

Одиницею вимірювання напруженості магнітного поля є \_\_\_\_\_

Розглянемо приклади застосування закону Біо-Савара-Лапласа для розрахунку індукції магнітного поля провідників конфігурацій, що зустрічаються найчастіше.

1. Індукція магнітного поля у центрі колового провідника радіуса  $R$ , по якому проходить струм силою  $I$ .

Запишемо закон Біо-Савара-Лапласа у загальному вигляді:

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

враховуючи, що усі ділянки провідника у центрі колового витка створюватимуть елементарні значення індукції магнітного поля  $d\vec{B}$  одного напрямку (див. рис.), перепишемо закон Біо-Савара-Лапласа у скалярному вигляді:

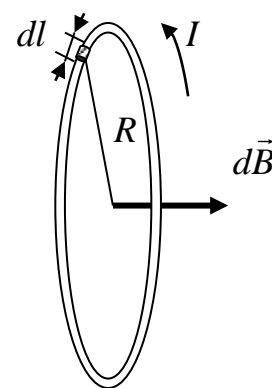
$$B = \int_L \frac{\mu\mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi r^2},$$

де  $dl$  – \_\_\_\_\_

$r$  – \_\_\_\_\_

дорівнює радіусу кола  $r = R$ ,

$L$  – \_\_\_\_\_,  $L = 2\pi R$ ,



$\alpha$  — \_\_\_\_\_,

тому  $\alpha =$  \_\_\_\_\_, а  $\sin \alpha =$  \_\_\_\_\_.

Отже,

$$B = \int \dots$$

Винесемо сталі величини за знак інтегралу та здійснимо інтегрування:

$$B = \text{---} \int \dots \quad \text{або} \quad B = \dots,$$

скоротивши отримаємо:

$$B = \dots$$

2. Індукція магнітного поля на відстані  $a$  від прямолінійного провідника, по якому тече струм силою  $I$ .

Запишемо закон Біо-Савара-Лапласа у загальному вигляді:

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

Щоб визначити індукцію магнітного поля провідника зі струмом у точці  $O$ , розіб'ємо провідник на нескінченно малі ділянки довжиною  $d\vec{l}$ . Вектори індукції магнітного поля у точці  $O$ , що створює кожна елементарна ділянка провідника направлені в один бік вздовж одної прямої перпендикулярно до площини рисунка до нас. Тому результуюча індукція магнітного поля всіх елементів струму  $I dl$  у точці  $O$ :

$$B = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\mu\mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi r^2}.$$

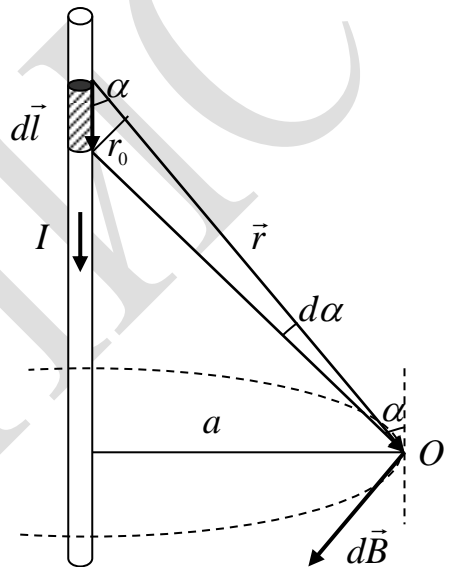
Оскільки відстань від елемента провідника  $r$  до точки  $O$  залежить від кута  $\alpha$ , перейдемо до однієї змінної:

$$r = \dots$$

$$dl = \dots,$$

відстань  $r_0$  замінимо елементом дуги радіуса  $r$ , яка спирається на нескінченно малий центральний кут  $d\alpha$  ( $r_0 \approx r d\alpha$ ):

$$dl \approx \dots$$



Підставимо отримані значення  $r$  і  $dl$  у вираз для знаходження індукції магнітного поля:

$$B = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\mu\mu_0 I \left( \frac{a}{\sin \alpha} \cdot \frac{d\alpha}{\sin \alpha} \right) \sin \alpha}{4\pi \left( \frac{a}{\sin \alpha} \right)^2} = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi a} \cdot \sin \alpha d\alpha.$$

Винесемо сталі величини за знак інтегралу та здійснимо інтегрування:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi a} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha d\alpha,$$

Індукція магнітного поля прямолінійного провідника скінченної довжини:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2).$$

Якщо провідник нескінченно довгий,  $\alpha_1 \rightarrow 0$ , а  $\alpha_2 \rightarrow \pi$ , то індукція магнітного поля нескінченно довгого прямолінійного провідника:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi a}.$$

## 2. Взаємодія струмів

Провідники по яким проходять електричні струми взаємодіють один з одним через власні магнітні поля. Цю силу взаємодії можна визначити поєднуючи закон Біо-Савара-Лапласа із законом Ампера. За законом Біо-Савара-Лапласа елемент струму  $I_1 dl_1$  у точці  $O$ , що знаходиться на відстані  $r$  створює магнітне поле індукцією

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I_1 dl_1 \sin \alpha}{4\pi r^2} \vec{e}_\alpha,$$

На елемент струму  $I_2 dl_2$ , поміщений у точку  $O$ , за законом Ампера, діятиме сила з боку магнітного поля, що створюється елементом струму  $I_1 dl_1$

$$d\vec{F}_{12} = I_2 dl_2 \times d\vec{B},$$

підставивши значення індукції магнітного поля у точці  $O$  в закон Біо-Савара-Лапласа, отримаємо загальний закон Ампера:

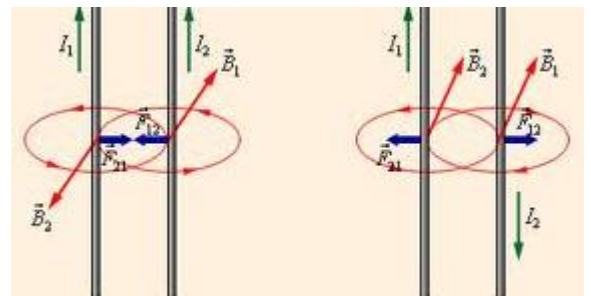
$$d\vec{F}_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2 dl_1 dl_2 \sin \alpha}{4\pi r^2} \vec{e}_\alpha \times \vec{e}_\beta,$$

Застосовуючи закон Ампера для двох нескінченно довгих прямолінійних паралельних провідників, можна отримати силу взаємодії, що припадає на одиницю їх довжини:

$$\frac{d\vec{F}}{dl} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r} \vec{e}_r,$$

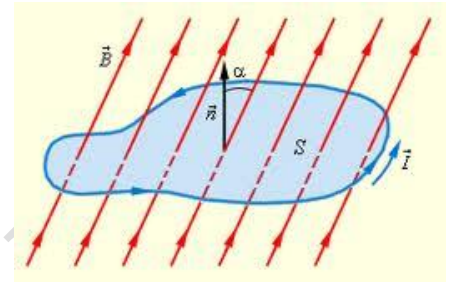
де  $r$  — відстань між провідниками.

Використовуючи правило свердлика та правило лівої руки, можна визначити, що провідники з однаковим напрямом струмів взаємно \_\_\_\_\_, а з різним – \_\_\_\_\_.



### 3. Закон повного струму, магнітне поле соленоїда

Величину  $\oint_l (\vec{B}_n d\vec{l}) = \oint_l B \cdot dl \cdot \cos \alpha$  називають \_\_\_\_\_, де  $\alpha$  – кут між \_\_\_\_\_



Знайдемо циркуляцію вектора індукції магнітного поля прямого провідника зі струмом. Індукція магнітного поля прямого нескінченного провідника із струмом дорівнює:

$$B = \frac{\mu \mu_0 I}{2\pi R},$$

де  $R$  – \_\_\_\_\_

Охопимо провідник колом радіуса  $R$ . Тоді

$$\oint_l B_n dl = \oint_l \frac{\mu \mu_0 I}{2\pi R} dl.$$

Так як  $I$ ,  $\mu$ ,  $\mu_0$  і  $R$  величини сталі, маємо:

$$\oint_l B_n dl = \frac{\mu \mu_0 I}{2\pi R} \int_l dl \quad \text{або} \quad \oint_l B_n dl =$$

$$i \quad \oint_l B_n dl = \mu \mu_0 I.$$

Сформулюємо закон повного струму або теорему про циркуляцію вектора індукції магнітного поля в загальному вигляді, \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

---

---

---

$$\oint_l B_n dl = \mu \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i,$$

де  $\sum_{i=1}^n I_i$  – \_\_\_\_\_

Отже, робота при перенесенні пробного одиничного елемента струму в магнітному полі в загальному випадку не дорівнює нулеві, тому його називають \_\_\_\_\_ або \_\_\_\_\_

Характерною ознакою вихрового поля є замкненість його силових ліній.

При застосуванні закону повного струму необхідно враховувати правило знаків: \_\_\_\_\_

---

---

---

---

---

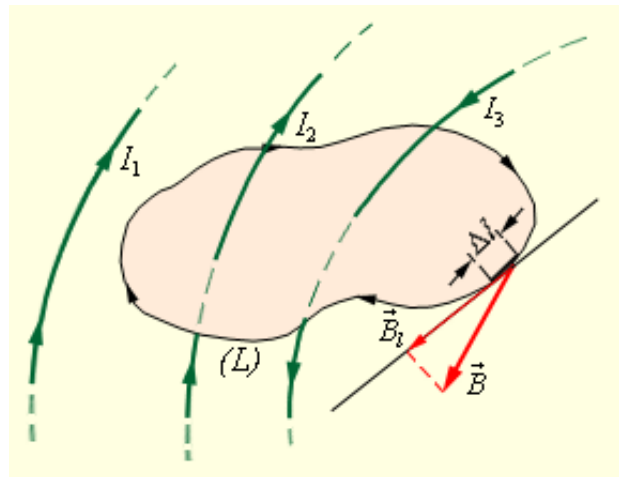
---

---

---

---

---

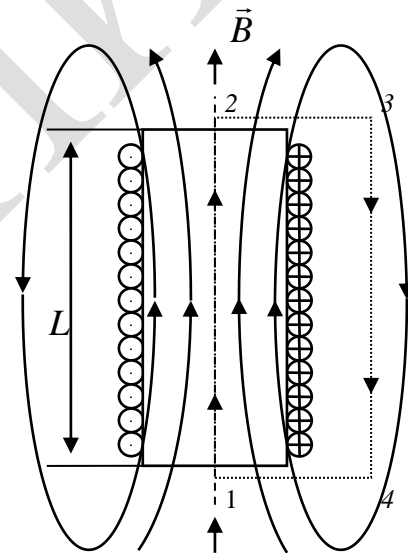


Закон повного струму і закон Біо-Савара-Лапласа використовують для обчислення індукції магнітного поля, що створює система провідників зі струмом.

Закон Біо-Савара-Лапласа застосовують у тому випадку, коли легко провести інтегрування вздовж провідника довжиною  $l$ , в інших випадках застосовують закон повного струму, довільно обираючи контур симетричної форми з метою спрощення інтегрування.

Прикладом застосування закону повного струму є розрахунок індукції магнітного поля на осі довгого соленоїда довжиною  $L$  з кількістю  $N$  витків по яким тече струм силою  $I$  (див. рис.).

Оберемо замкнений контур інтегрування 12341 і запишемо вираз для циркуляції вектора  $\vec{B}$ :



$$\oint_{12341} \vec{B} d\vec{l} = \mu\mu_0 \sum_{k=1}^N I_k,$$

Циркуляцію вектора  $\vec{B}$  по замкненому контуру можна подати у вигляді чотирьох доданків

$$\oint_{12341} \vec{B} d\vec{l} = \int_{12} B dl \cos \underbrace{\left( \vec{B}, \hat{d\vec{l}} \right)}_{=0} + \int_{23} B dl \cos \underbrace{\left( \vec{B}, \hat{d\vec{l}} \right)}_{\approx 90^\circ} + \int_{34 \approx 0} B dl \cos \left( \vec{B}, \hat{d\vec{l}} \right) + \int_{41} B dl \cos \underbrace{\left( \vec{B}, \hat{d\vec{l}} \right)}_{\approx 90^\circ},$$

$$\oint_{12341} \vec{B} d\vec{l} = \int_{12} B dl \cos \underbrace{\left( \vec{B}, \hat{d\vec{l}} \right)}_{=0} = B \int_{12} dl = BL.$$

Оскільки обраний контур охоплює  $N$  витків по кожному з яких тече струм силою  $I$ , то

$$\sum_{k=1}^N I_k = NI.$$

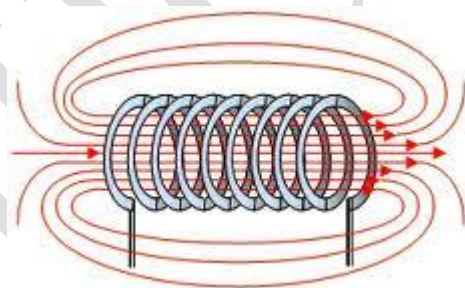
Підставляючи у закон повного струму отримані вирази циркуляції вектора  $\vec{B}$  і суми сил струмів матимемо:

$$= ,$$

тоді індукція магнітного поля на осі довгого соленоїда становитиме

$$B = ,$$

де  $n$  – \_\_\_\_\_



Явище виникнення магнітного поля навколо провідників зі струмом використовують для виготовлення *електромагнітів* – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



Звичайно електромагніт складається з обмотки і феромагнітного осердя, який набуває властивостей магніту при проходженні по обмотці струму (на рисунку наведено найпростіший електромагніт – електропровід в ізоляції намотаний навколо феромагнітного осердя).

У електромагнітах, призначених, перш за все, для створення механічного зусилля також присутній якір (рухома частина магнітопроводу), що передає зусилля. Електромагніти використовуються там, де необхідне магнітне поле, яке можна швидко і легко змінити, наприклад у побутових приладах (телевізор, магнітофон, електробритва), у пристроях техніки зв'язку (телефон, телеграф, радіо), в електричних машинах (електрогенератори та електродвигуни), у пристроях промислової автоматики (пускачі, перемикачі, реле та інше), в електромагнітних сепараторах для очищення механічних сумішей від магнітних предметів.



Широкого застосування електромагніти набули в електромагнітних механізмах, що здійснюють поступально-поворотні рухи чи гальмувальні процеси – вантажопідйомні електромагніти (див. рис.), металорізальні верстати, магнітні замки, релейні та пускові пристрої, механізми автоматичного вимикання, гальмові пристрої тощо.



#### 4. Робота при переміщенні провідника зі струмом в магнітному полі. Енергія провідника зі струмом

При переміщенні провідника зі струмом в магнітному полі виконується робота

$$dA = \dots$$

Енергія магнітного поля замкненого провідного контуру зі струмом  $I$  та індуктивністю  $L$

$$W_m = \dots$$

Енергію магнітного поля визначають за формулою

$$W_m = \dots$$

Якщо врахувати формулу зв'язку вектора індукції магнітного поля  $\vec{B}$  і вектора напруженості магнітного поля  $\vec{H}$

$$\vec{B} = \mu \vec{H},$$

то енергія магнітного поля у даній точці дорівнюватиме

$$W_m = \dots$$

А об'ємна густина енергії магнітного поля в околі кожної точки простору  $\varpi_m = \frac{W_m}{V}$  визначатиметься значеннями векторних характеристик поля:

$$\varpi_m = \dots$$

# Лекція № 15

## Електромагнітні явища

1. Потік вектора магнітної індукції
2. Явище електромагнітної індукції, закон Фарадея, правило Ленца
3. Генератори електричного струму
4. Явище самоіндукції, індуктивність
5. Перехідні процеси у колі з індуктивністю
6. Взаємна індуктивність, трансформатори
7. Рівняння Максвелла

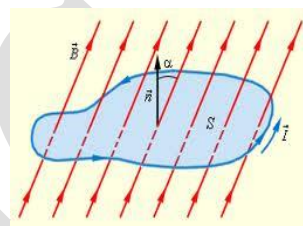
### 1. Потік вектора магнітної індукції

Магнітним потоком або потоком вектора індукції магнітного поля називають \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

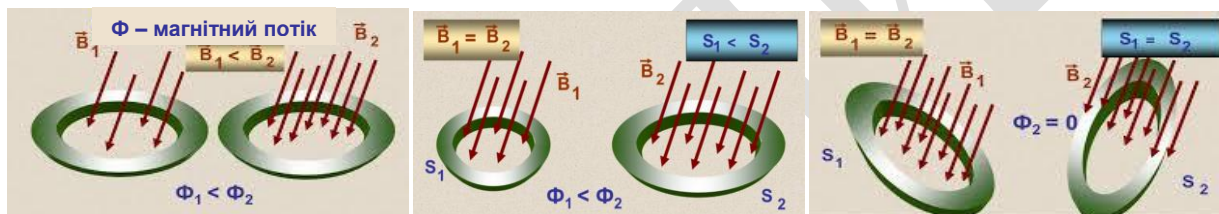
\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



$$\Phi =$$

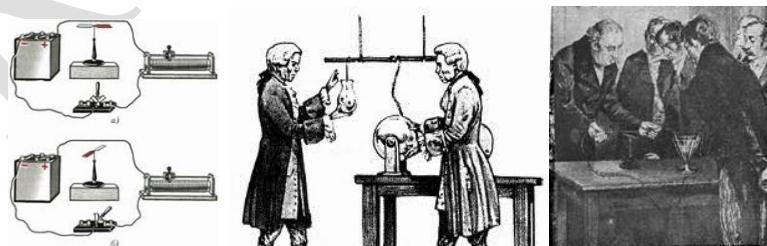
де  $\alpha$  – \_\_\_\_\_



Одиницею вимірювання магнітного поля є \_\_\_\_\_ ( \_\_\_\_\_ ):  $1Вб =$  \_\_\_\_\_ .

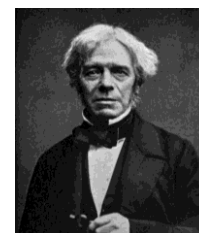
### 2. Явище електромагнітної індукції, закон Фарадея, правило Ленца

Результати дослідів Х. Ерстеда (здатність електричного поля породжувати навколо себе магнітне поле) та А. Ампера (понадмоторна дія магнітного поля на провідники зі струмом), проведені у 1820 році, стали основою припущень про \_\_\_\_\_



Для перевірки цієї гіпотези проводились різноманітні експерименти. Такі як, наприклад, безрезультатні спроби виявлення струму у замкнутому провіднику, розміщеному біля іншого провідника, по якому проходив постійний електричний струм.

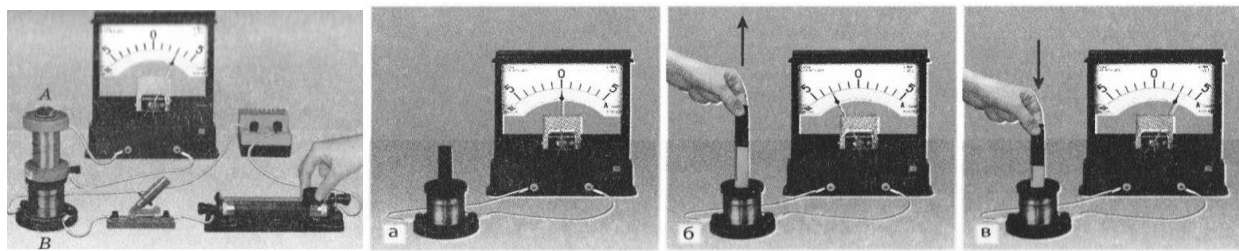
Лише у 1831 році англійський фізик і хімік М. Фарадей звернув увагу на те, що до виникнення короточасних струмів у замкнутому провіднику (коло на першому рисунку) призводить розмикання або замикання ключа електричного кола В з постійним струмом.



**Майкл Фарадей**



Подальші досліди показали, що у замкненому провіднику електричний струм виникає також при піднесенні до нього постійного магніту (див. рис.) або змінненні величини струму у провіднику, що знаходиться поряд.



Відкриття М. Фарадея полягало у тому, що електричний струм у замкненому контурі може виникнути під час \_\_\_\_\_

---



---



---

Експериментальні спостереження М. Фарадея сприяли відкриттю нового закону про зв'язок електричного і магнітного полів: у тих областях, де змінюється магнітне поле, виникає електричне поле, яке саме і спричинює направлений рух електронів у провідному контурі, тобто зумовлює виникнення електрорушійної сили при всякій зміні магнітного потоку.

Явище виникнення \_\_\_\_\_

---



---



---

\_\_\_\_\_ називають **явищем електромагнітної індукції**

Кількісно описується **законом Фарадея для явища електромагнітної індукції** – \_\_\_\_\_

---



---



---

$$\varepsilon_i = \quad ,$$

де  $\varepsilon_i$  – \_\_\_\_\_

$\Phi$  – \_\_\_\_\_

---

$$\Phi = \quad ,$$

“–” – пояснюється тим, що \_\_\_\_\_

---



---



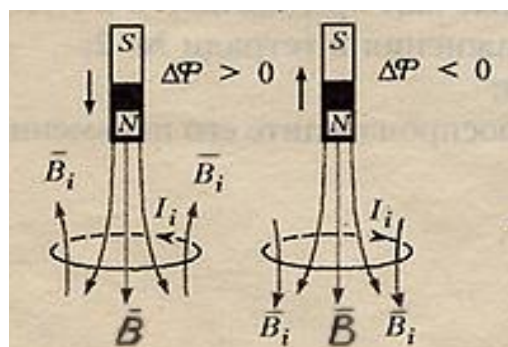
---



---



---



\_\_\_\_\_ – **правило Ленца** (див. рис.).

Принцип правила Ленца сьогодні реалізують у транспортно-будівельній галузі для міжміських пасажирських перевезень. Це потяги на так званій магнітній подушці. Під днищем вагону такого потягу змонтовані потужні магніти, розташовані у декількох сантиметрах від сталевго полотна. При русі потягу магнітний потік, що проходить через контур полотна, постійно змінюється і в ньому виникають сильні індукційні струми, що створюють потужне магнітне поле, яке відштовхує магнітну підвіску потягу. Ця сила настільки велика, що, досягаючи певної швидкості, потяг у буквальному розумінні відривається від полотна на 10-15 сантиметрів і, фактично, летить у повітрі. Потяги на магнітній подушці здатні розвивати швидкість більше 500 км/год, що робить їх ідеальним засобом міжміського сполучення середньої дальності.



**Більш загальне тлумачення явища електромагнітної індукції дав Дж. К. Максвелл:** \_\_\_\_\_

---



---



---



---



---



---

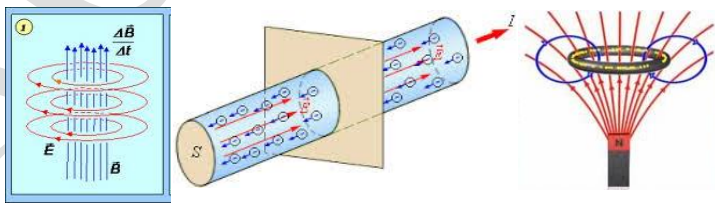


---



---

Виникнення індукційного струму в замкненому провідному контурі – це лише один із проявів виникнення вихрового електричного поля під дією змінного в часі магнітного поля. Вихрове поле напруженістю  $\vec{E}$  може спричинювати й інші дії, наприклад, поляризувати діелектрик, викликати пробій діелектрика між обкладками конденсатора, прискорювати або гальмувати заряджені частинки тощо.



Для вихрового електричного поля циркуляція вектора напруженості  $\vec{E}$  по довільно обраному замкненому контуру  $L$  дорівнює електрорушійній силі, тобто

$$\oint_L (\vec{E} d\vec{l}) = \quad , \quad \varepsilon_i = \quad ,$$

Тому закон електромагнітної індукції в узагальненому Максвеллом вигляді запитується так:

$$= \quad ,$$

або використовуючи теорему Стокса:

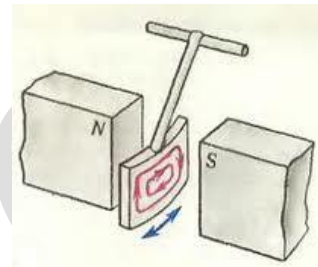
$$= \quad .$$

Якщо в тонких провідниках зі зміною магнітного потоку, що їх пронизує, індуються струми провідності, то в масивних провідниках – індуються замкненні електричні струми, які називають \_\_\_\_\_ або \_\_\_\_\_.

Струми Фуко, як і індукційні струми в лінійних провідниках, підпорядковуються правилу Ленца: їх магнітне поле направлене так, щоб

Так, наприклад, швидко гасяться коливання масивних металевих маятників, розташованих між полюсами магнітів, це явище використовують для заспокоєння (демпфування) рухомих частин приладів.

Якщо у вищеописаному маятнику зробити радіальні вирізи, то вихрові струми слабшають і гальмування майже відсутнє. Вихрові струми також зумовлюють нагрівання провідників. Тому для зменшення втрат на нагрівання якорі генераторів та осердя трансформаторів роблять не суцільними, а



виготовляють із тонких пластин, відокремлених одна від іншої шарами ізолятора, і встановлюють так, щоб вихрові струми були направлені уперек пластин. Джоулеве тепло, що виділяється струмами Фуко, у промисловості використовується в індукційних пічках. Індукційна піч являє собою тигель, який вводять всередину котушки з високочастотним струмом. У металі виникають інтенсивні вихрові струми, здатні розігріти його до плавлення. Такий спосіб дозволяє плавити метали у вакуумі, в результаті чого отримують надчисті матеріали.

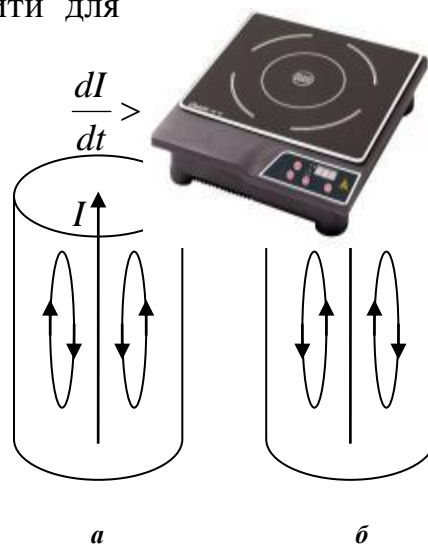


Індукційні плавильні пічки використовуються для розплавлення та отримання сталевих, чавунних відливок високої якості, а також для лиття феросплавів, легуючих та нержавіючих сплавів. Застосовуються у ливарних цехах металургійних заводів, а також у цехах точної виливки, зокрема для виливки кольорових металів (бронзи латуні, алюмінію, міді тощо).



У побуті використовують індукційні плити для приготування їжі. Головна їх відмінність від електричних і газових плит полягає у тому, що тепло генерується безпосередньо на посуді, в якій готується їжа, а не на поверхні самої плити. Відмінність індукційних плит від традиційних полягає у їх енергоефективності, скороченні часу готування, безпечності щодо опіків, значне зменшення нагрівання навколишнього середовища.

Вихрові струми виникають і у провідниках, по яким тече змінний струм. Напрямок цих струмів можна визначити за



правилом Ленца. На рисунку *a* показано напрями вихрових струмів при зростанні первинного струму у провіднику, а на рисунку *б* – при його зменшенні. В обох випадках напрями вихрових струмів такі, що вони

---

---

Таким чином, внаслідок виникнення вихрових струмів швидкозмінний струм виявляється розподілений по перерізу провідника нерівномірно – він нібито витісняється на поверхню провідника. Це явище отримало назву \_\_\_\_\_ (від англ. skin – шкіра) або \_\_\_\_\_. Так як струми високої частоти практично проходять по тонкому поверхневому шару, то проводи для них роблять пустими всередині. Так в дешевих електроприладах провідники виготовляють з пластика, а методом напилювання поверху наносять тонкий шар металу (ремонт такої проводки не підлягає). При проходженні по суцільним провідникам струмів високої частоти, в результаті скін-ефекту, нагріваються лише поверхневі його шари. На цьому заснований метод поверхневого закалювання металів способом зміни частоти поля.

### 3. Генератори електричного струму

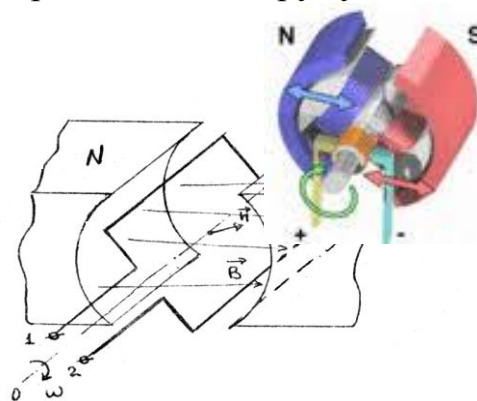
Вперше спосіб практичного використання явища електромагнітної індукції запропонував Фарадей.

Пристрої, \_\_\_\_\_

---

---

\_\_\_\_\_, називають **електричними генераторами**. Схему генератора змінного струму подано на рисунку: між полюсами постійного магніту обертається рамка, у якій, згідно закону М. Фарадея виникає електрорушійна сила.



#### 4. Явище самоіндукції, індуктивність

Навколо провідника зі струмом виникає магнітне поле, яке створює певний потік вектора індукції через власний контур провідника. Якщо по замкнутому провіднику тече змінний струм, то навколо провідника існує змінне магнітне поле, тобто через замкнутий контур провідника з часом виникає зміна магнітного потоку вектора індукції. Зміна магнітного потоку з часом через контур, за законом Фарадея, спричинює індукційний струм. Струм, що індукується у контурі провідника, по якому тече змінний струм, називають \_\_\_\_\_.

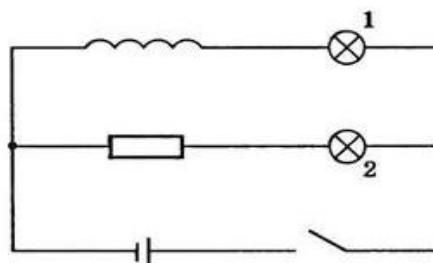
Явище \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



\_\_\_\_\_ називають **самоіндукцією**.

Величина електрорушійної сили самоіндукції була визначена американським фізиком Дж. Генрі:

$$\mathcal{E}_{si} =$$

Порівнюючи закон Генрі та закон Фарадея:

можна зробити висновок, що магнітний потік, зумовлений зміною струму в провіднику  $\Phi$ , пропорційний силі струму:

$$\Phi =$$

де  $L$  – \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Оскільки

$$L =$$

то фізичний зміст індуктивності провідника полягає у тому, що: **індуктивність** – це \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Визначимо індуктивність довгого соленоїда завдовжки  $l$ , з площею перерізу  $S$  і кількістю витків  $N$ . Для цього застосуємо закон Генрі:

$$\mathcal{E}_{si} =$$

де  $\Phi$  – \_\_\_\_\_

Для довгого соленоїда потік вектора індукції магнітного поля крізь поверхню площею  $S$ , яку охоплює один виток

$$\Phi_0 = \dots$$

Повний потік крізь усі  $N$  витків

$$\Phi = \dots$$

Тоді

$$\mathcal{E}_{si} = \dots,$$

порівнюючи останнє рівняння із законом Генрі

$$\mathcal{E}_{si} = \dots,$$

одержуємо

$$L = \dots$$

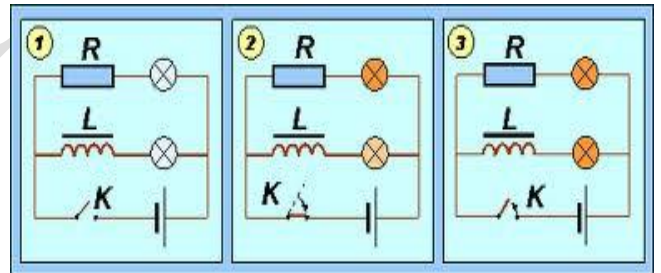
Оскільки  $Sl = V$ , то формулу індуктивності довгого соленоїда можна записати так:

$$L = \dots \quad \text{або} \quad L = \dots$$

## 5. Перехідні процеси у колі з індуктивністю

При розмиканні або замиканні електричних кіл сила струму в них різко змінюється, що призводить до виникнення струмів самоіндукції, які називають \_\_\_\_\_

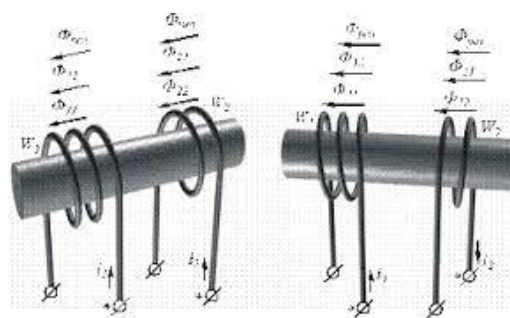
Якщо електричне коло містить котушки з великими значеннями індуктивності  $L$ , то *екстраструми розмикання* в таких колах можуть значно перевищувати струми в колі від джерела. Часто це стає причиною яскравого спалаху лампочок і плавлення запобіжників при розмиканні електричних кіл споживачів. Великі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



При вмиканні джерела струму через котушку індуктивності проходить наростаючий стум, тому у витках котушки виникає струм самоіндукції, направлений за правилом Ленца проти зростаючого основного струму, що й спричиняє інерційність зростання останнього. Чим більша індуктивність  $L$  і менший опір  $R$ , тим повільніше зростатиме значення сили струму  $I$  в колі, наближаючись асимптотично до значення  $\mathcal{E}_0/R$ . Струм самоіндукції, який виникає при вмиканні джерел струму в електричне коло з індуктивністю  $L$ , називають *екстраструмом замикання*.

## 6. Взаємна індуктивність, трансформатори

Якщо провідні контури чи котушки зі струмами розміщені так, що магнітні потоки кожної з них хоча б частково перетинають витки сусідніх, то, окрім струмів самоіндукції, в кожному контурі буде виникати струм обумовлений зміною потоку вектора індукції магнітного поля, створюваною струмом сусідніх контурів, такий струм називають \_\_\_\_\_.



\_\_\_\_\_ називають **явищем взаємної індукції**.

Контури зі змінними струмами, в яких виникає явище взаємоіндукції через взаємне перетинання магнітних потоків, мають *індукційний зв'язок*. Електрорушійні сили  $\mathcal{E}_i$ , що виникають при взаємоіндукції, пропорційні швидкостям змін струмів в індуктивно зв'язаних контурах:

$$\mathcal{E}_{i1} = \dots,$$

і навпаки

$$\mathcal{E}_{i2} = \dots.$$

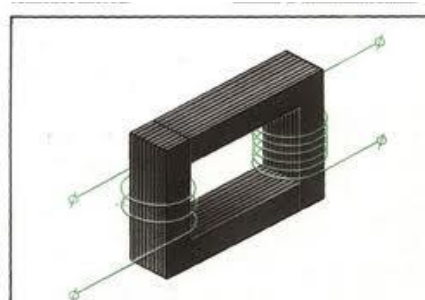
$L_{12}$  і  $L_{21}$  дорівнюють один одному  $L_{12} = L_{21}$  і носять назву \_\_\_\_\_.

Коефіцієнти взаємоіндукції є мірою \_\_\_\_\_.

Взаємна індуктивність  $L_{12}$ , як і індуктивність окремого контуру, вимірюється у \_\_\_\_\_.

На практиці для збільшення значення  $L_{12}$  обидва контури насаджують на залізне осердя ( $\mu \gg 1$ ).

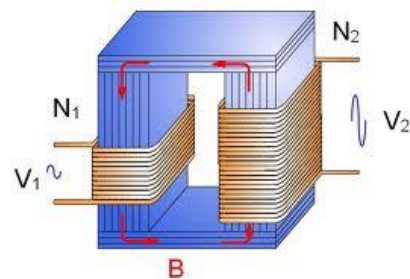
Явище взаємної індукції лежить в основі роботи **трансформатора** – пристрою для \_\_\_\_\_.



Трансформатор складається з \_\_\_\_\_.

Якщо первинна обмотка має  $N_1$  витків, а змінна вхідна напруга  $U_1$ , у вторинній обмотці, яка має  $N_2$  витків, вихідна напруга  $U_2$ , то відношення

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = k$$



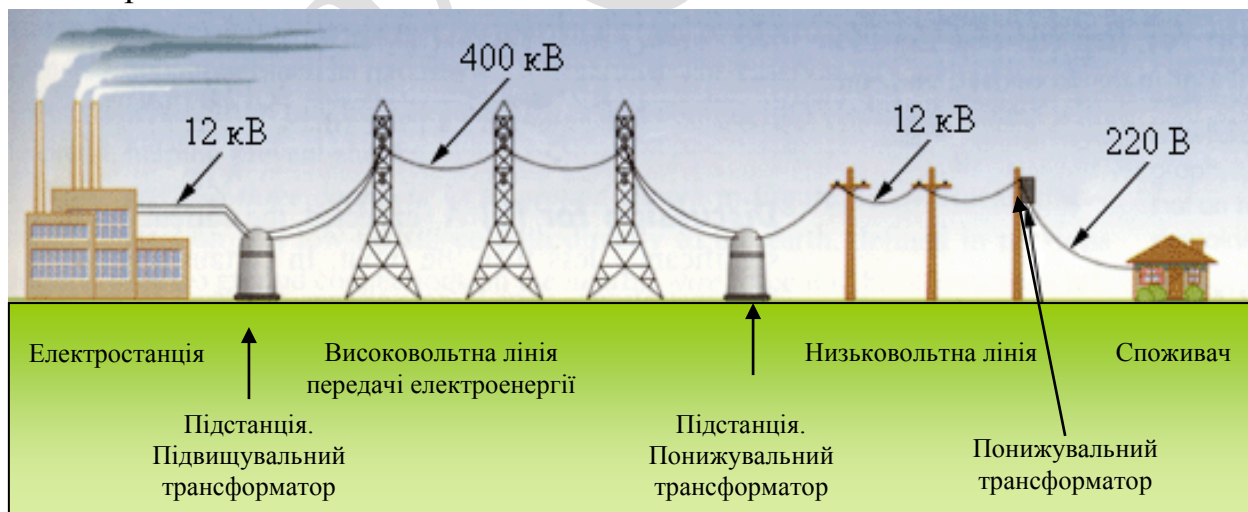
Називають \_\_\_\_\_

*Коефіцієнт трансформації* чисельно рівний \_\_\_\_\_

Якщо  $k > 1$ , то трансформатор підвищує напругу і його називають \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ а при  $k < 1$  трансформатор є \_\_\_\_\_.

Електричну енергію, що зазвичай виробляється електростанціями, необхідно передавати на сотні і тисячі кілометрів до загальної енергетичної системи, промислових підприємств або безпосередньо до споживачів. При проходженні струму по проводах ліній електропередач відбуваються втрати електроенергії на їх нагрівання. Оскільки кількість теплоти, що виділяють проводи, прямо пропорційна до квадрату сили струму і опору, то для обмеження втрат електроенергії необхідно або збільшувати переріз проводів, що є дуже економічно не вигідним та технічно неможливим, або зменшити силу струму за рахунок підвищення напруги. Для підвищення напруги на початку лінії електропередачі встановлюють підвищувальні трансформатори, а на кінці – знижувальні. На рисунку наведена умовна схема високовольтної лінії передач.





У наш час трансформатори застосовують практично в усіх промислових галузях, зокрема на підприємствах будівельної індустрії та безпосередньо у процесі будівництва. Трансформатори різняться за призначенням, розмірами, типами і видами в залежності від потреб конкретних споживачів електричного струму (рис.). Трансформатори є основними елементами систем енергопостачання, електромашин, електрообладнання, електроустановок та їх деталей для отримання потрібної для них напруги живлення. Зокрема можна виділити трансформатори для зварювальних апаратів, апаратів для прогріву бетону, ґрунту і труб, трансформатори для компресорів, транспортерів, бетономішалок, електроприводів будівельних машин, насосних и компресорних установок, гідродинамічні трансформатори для будівельних і транспортних машин, трансформатори для освітлення будівельних майданчиків, ручних електричних машин та інших споживачів енергії.



## 7. Рівняння Максвелла

Система рівнянь Максвелла є узагальненим математичним записом основних експериментальних законів електромагнітних явищ у довільному середовищі, вони встановлюють співвідношення між векторними характеристиками електромагнітного поля  $\vec{E}$ ,  $\vec{B}$ ,  $\vec{D}$  і  $\vec{H}$  та розподілом у просторі їх джерел: електричних зарядів і струмів.

В основі теорії Максвелла лежать чотири рівняння, які доповнюються матеріальними рівняннями.

**Перше рівняння Максвелла** – це узагальнення закону Біо-Савара-Лапласа і є більш узагальненою формою закону повного струму, який відображає той експериментальний факт, що \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_:

– в інтегральній формі,

– у диференціальній формі.

**Друге рівняння Максвелла** є математичним записом експериментального закону електромагнітної індукції Фарадея. Узагальнений фізичний зміст його полягає в тому, що \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

– в інтегральній формі,

– у диференціальній формі.

**Третє рівняння Максвелла** відображає експериментальний факт відсутності в природі магнітних зарядів, тобто \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ :

– в інтегральній формі,

– у диференціальній формі.

**Четверте рівняння Максвелла** є узагальненням на основі теореми Гаусса закону Кулона і фізично вказує на \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ :

– в інтегральній формі,

– у диференціальній формі.

**Матеріальні рівняння** враховують властивості середовища і зв'язують між собою окремі характеристики електромагнітного поля:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E},$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H},$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E},$$

де  $\epsilon$  – \_\_\_\_\_

$\epsilon_0 =$  \_\_\_\_\_

$\mu$  – \_\_\_\_\_

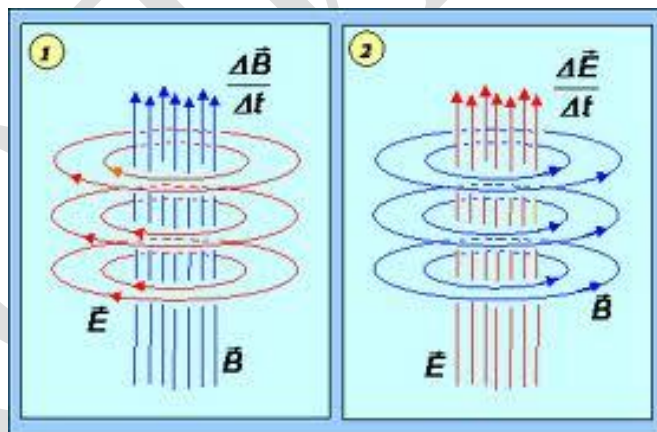
$\mu_0 =$  \_\_\_\_\_

$\sigma$  – \_\_\_\_\_

Рівняння Максвелла разом із матеріальними рівняннями становлять повну замкнену систему рівнянь, яка дає можливість розв'язати будь-яку задачу макроскопічної електродинаміки: \_\_\_\_\_

З рівнянь Максвелла випливає, що змінне магнітне поле завжди пов'язане із створюваним ним електричним полем, а змінне електричне поле завжди пов'язане із створюваним ним магнітним полем, тобто електричні і магнітні поля нерозривно пов'язані одне з одним створюючи єдине \_\_\_\_\_

Теорія Максвелла являє собою узагальнення основних законів електричних і магнітних явищ, тому змогла пояснити як вже відомі експериментальні факти, так і передбачити нові. Одним із важливих висновків цієї теорії виявилось існування магнітного поля струмів зміщення, що дозволило Максвеллу передбачити існування *електромагнітних хвиль* –



Цей висновок і теоретичні дослідження властивостей електромагнітних хвиль привели Максвелла до створення електромагнітної теорії світла, згідно якої світло також являє собою електромагнітні хвилі.

### Підручники та навчальні посібники:

1. Загальний курс фізики: Навч. посібник для студ. вищих техн. і пед. закладів освіти. В 3 т. /За ред. І.М.Кучерука. – К.: Техніка, 1999.
2. Фізика в будівництві: навчальний посібник/ В.І. Клапченко, І.О. Азнаурян, Н.Б. Бурдейна та ін.. – К.: КНУБА, 2012. – 252 с.
3. Фізика. Лабораторний практикум: Базовий цикл. Навчальний посібник. – 3-те вид., випр. і доп. /В.І. Клапченко, І.О. Азнаурян та ін. /За ред. В.І. Клапченка. – К.: КНУБА, 2012. - 228 с.
4. Фізика. Збірник задач: навчальний посібник для студентів усіх спеціальностей/ В.І. Клапченко, І.О. Азнаурян та ін.; за заг. ред. В.І. Клапченка. – К.: КНУБА, 2009. – 252 с.
5. Чолпан П.П. Фізика: Підручник. – К.: Вища шк., 2003.
6. Азнаурян І.О. Фізика та фізичні методи дослідження: Навчальний посібник. – К.: КНУБА, 2008. – 250 с.
7. Фізика. Практичний курс: Навчальний посібник для студентів заочної форми навчання всіх спеціальностей /Автори: В.І. Клапченко, Г.Д. Потапенко, І.О. Азнаурян та ін. – К.: КНУБА, 2005, - 256 с.
8. Бурдейна Н.Б., Глива В.А, Петруньок Т.Б., Бірук Я.І. Фізика. Протоколи лабораторних робіт. Частина І: Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм / Навчально-методичний посібник – К.: КНУБА, 2022. – 100 сБурдейна Н.Б.
9. Бурдейна Н.Б. Фізика. Лабораторний зошит. Ч II. Молекулярна фізика і термодинаміка. Коливальні та хвильові процеси. Оптика. Квантова фізика. Фізика атома і ядра / Навчально-методичний посібник для студентів спеціальності «Будівництво та цивільна інженерія» – К.: КНУБА, 2020. – 88 с. – Видання 2-ге, перероблене та доповнене.

### Конспекти лекцій:

1. Бурдейна Н.Б., Панова О.В., Петруньок Т.Б., Бірук Я.І. Фізика. Конспект лекцій студента: Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм / Навчально-методичний посібник – К.: КНУБА, 2021. – 144 с.
2. Бурдейна Н.Б., Панова О.В., Петруньок Т.Б., Бірук Я.І. Фізика. Конспект лекцій студента: Молекулярна фізика і термодинаміка. Коливальні та хвильові процеси. Оптика. Квантова фізика. Фізика атома і ядра / Навчально-методичний посібник – К.: КНУБА, 2022. – 168 с.

### Інформаційні ресурси:

<https://org2.knuba.edu.ua/course/view.php?id=48>

## Теми практичних занять у I семестрі

*Практичне заняття № 1.* Елементи кінематики поступального руху і обертального руху

*Практичне заняття № 2.* Динаміка поступального і обертального руху

*Практичне заняття № 3.* Електростатика.

*Практичне заняття № 4.* Постійний електричний струм

*Практичне заняття № 5.* Закони магнітостатики. Електромагнітні явища

*Практичне заняття № 6.* Основи молекулярно-кінетичної теорії речовини

*Практичне заняття № 7.* Основи термодинаміки

*Практичне заняття № 8.* Коливальні та хвильові процеси

*Практичне заняття № 9.* Оптика.

*Практичне заняття № 10.* Хвильові властивості матерії. Фізика атома і ядра

## Теми лабораторних робіт у I семестрі

### Змістовий модуль 1. Фізичні основи механіки

*Лабораторна робота № 1.1.* «Визначення залежності моменту інерції системи від розподілу її маси відносно осі обертання»

*Лабораторна робота № 1.2.* «Визначення динамічної в'язкості рідини методом Стокса»

*Лабораторна робота № 1.3.* «Вивчення закономірностей руху маятника Максвелла та визначення його моменту інерції»

*Лабораторна робота № 1.4.* «Вимірювання пружних характеристик матеріалів»

*Лабораторна робота № 1.6.* «Визначення швидкості кулі за допомогою балістичного маятника»

### Змістовий модуль 2. Електрика та магнетизм

*Лабораторна робота № 3.2.* «Визначення опору провідника за допомогою амперметра та вольтметра»

*Лабораторна робота № 3.4.* «Градування термометри»

*Лабораторна робота № 3.5.* «Визначення горизонтальної складової індукції та напруженості магнітного поля Землі»

*Лабораторна робота № 3.6.* «Вивчення магнітного поля короткого соленоїда»

*Лабораторна робота № 3.8.* «Визначення ККД трансформатора»

## Приклади тем і змісту рефератів з розділу «Фізичні основи механіки»

### 1. Умови та види рівноваги у будівництві

- 1) Умови рівноваги твердих тіл
- 2) Центр ваги. Види рівноваги
- 3) Стійкість будівельних конструкцій
- 4) Стійкість будівельних машин та обладнання

### 2. Виконання законів збереження механіки у будівництві

- 1) Закони збереження в механіці
- 2) Виконання закону збереження імпульсу у будівельній галузі
- 3) Застосування закону збереження моменту імпульсу у будівництві
- 4) Закон збереження енергії та його виконання у будівельній галузі

### 3. Деформації у будівельній галузі

- 1) Типи та види деформацій. Закон Гука
- 2) Деформації будівельних конструкцій та споруд
- 3) Деформації деталей будівельних машин та обладнання

### 4. Рух рідин та газів в будівельних комунікаційних мережах

- 1) Види течій. Циркуляція рідин та газів
- 2) Рівняння неперервності та рівняння Бернуллі для стаціонарної течії
- 3) Рух рідин та газів в будівельних комунікаційних мережах
- 4) Будівельне обладнання, принцип роботи якого ґрунтується на законах механіки рідин та газів

ББК 22.3я7  
УДК 53(075)  
Ф 50

РУКОПИС

Підписано до друку. Формат 60×84/16. Папір офсет. № 1.  
Гарнітура Тип Таймс. Друк офсет. 5,07 ум. друк. арк.  
Обл.-вид. арк. Наклад 100 пр.



**Бурдейна Наталія Борисівна** – кандидат педагогічних наук, доцент, професор кафедри фізики Київського національного університету будівництва і архітектури,.

Автор більше 100-та навчальних та навчально-методичних посібників, патентів та наукових праць з теорії та методики навчання фізики, а також моніторингу та нормалізації рівнів фізичних факторів, технологій створення будівельних матеріалів для захисту від небезпечних природних і техногенних впливів.



**Глива Валентин Анатолійович** – завідувач кафедри фізики Київського національного університету будівництва і архітектури; доктор технічних наук, професор, професор кафедри фізики.

Автор більше 300-т наукових публікацій, навчальних посібників і патентів з безпеки фізичних факторів, моніторингу та дослідження фізичних факторів виробничих середовищ, технологій створення будівельних матеріалів для захисту від небезпечних природних і техногенних впливів.



**Петруньок Тетяна Броніславівна** – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри фізики, завідувач відділення довузівської підготовки Київського національного університету будівництва і архітектури. Автор більше 30-ти навчальних та навчально-методичних посібників, наукових праць з теорії та методики навчання фізики.



**Бірук Яна Ігорівна** – асистент кафедри фізики, завідувач сектору профорієнтаційної роботи, фахівець відділення довузівської підготовки Київського національного університету будівництва і архітектури

Автор біля 30-ти навчальних та навчально-методичних посібників, наукових праць та патентів з методики навчання фізики та технологій створення будівельних матеріалів для екранування техногенних полів.