

Чернігівський національний технологічний університет

Навчально-науковий інститут будівництва

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**  
з курсу фізики

# **ОСНОВИ** **ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ**

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК**  
для студентів інженерних спеціальностей  
напрямів підготовки  
192 “Будівництво та цивільна інженерія”,  
193 “Геодезія та землеустрій”  
за освітньо-кваліфікаційним рівнем “бакалавр”

Чернігів, 2018

УДК 537.8(075.8)

ББК В33я73

С 41

**Рецензенти:**

**Завацкий С.В.** – кандидат фізико-математичних наук,  
доцент кафедри промислового і цивільного будівництва  
Навчально-наукового інституту будівництва  
Чернігівського національного технологічного  
університету;

**Шенета О.М.** – кандидат фізико-математичних наук,  
доцент кафедри фізики та астрономії  
Національного університету  
“Чернігівський колегіум”

**Ситников О.П.**

**С 41 Основи електродинаміки.** Конспект лекцій : навчальний посібник для студентів інженерних спеціальностей напрямів підготовки 192 “Будівництво та цивільна інженерія”, 193 “Геодезія та землеустрій” за освітньо-кваліфікаційним рівнем “бакалавр”. Чернігів: ЧНТУ, 2018. 82 с.  
ББК В33я73  
УДК 537.8(075.8)

Навчальний посібник призначений для студентів вищих навчальних закладів напряму підготовки 192 “Будівництво та цивільна інженерія”, 193 “Геодезія та землеустрій” за освітньо-кваліфікаційним рівнем “бакалавр”. Він містить 10 лекцій та запитання для самоконтролю, які охоплюють навчальний матеріал, передбачений діючими навчальними планами та програмами для підготовки названої категорії студентів. Посібник орієнтований на дистанційну форму навчання.

Рекомендовано рішенням кафедри промислового і цивільного будівництва Навчально-наукового інституту будівництва Чернігівського національного технологічного університету (протокол №7 від 11 січня 2018 р.)

© Ситников О.П., 2018

## ЗМІСТ

<b>ЕЛЕКТРОСТАТИКА.....</b>	<b>5</b>
1. Предмет вивчення електродинаміки, електростатики. Електричний заряд. Типи зарядів. Мікроскопічні та макроскопічні носії електричного заряду. Властивості електричних зарядів: взаємодія, дискретність, інваріантність. Електризація через дотик, електризація через вплив. Закон збереження електричного заряду. Закон взаємодії зарядів (закон Кулона).	
2. Електричне поле. Напруженість електричного поля. Принцип суперпозиції. Лінії напруженості електричного поля. Графічні зображення електричних полів. Електричний диполь.	
3. Робота сил електричного поля по переміщенню пробного заряду. Потенціальний характер електростатичного поля. Потенціал. Різниця потенціалів. Еквіпотенціальні поверхні. Зв'язок між напруженістю і потенціалом для однорідного електростатичного поля.	
4. Провідники в електростатичному полі. Розподіл зарядів у провіднику. Електростатична індукція. Еквіпотенціальність поверхні провідника. Електростатичний захист.	
5. Діелектрики в електростатичному полі. Поляризація діелектриків. Діелектрична проникність. Сегнетоелектрики, електрети, п'єзоелектрики, піроелектрики.	
6. Електроємність провідника. Конденсатор. Електроємність конденсатора. З'єднання конденсаторів. Енергія електростатичного поля.	
<b>ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ.....</b>	<b>38</b>
1. Електричний струм. Основні характеристики електричного струму: сила струму, густина струму. Закон Ома для ділянки кола в інтегральній формі. Електричний опір провідника. Закон Ома в диференціальній формі.	
2. Сторонні сили. Джерело електричного струму. Гальванічний елемент. Електрорушійна сила. Закон Ома для неоднорідної ділянки й повного кола. Правила Кірхгофа для розгалуженого кола.	

**МАГНІТНЕ ПОЛЕ ПОСТІЙНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ.....55**

1. Магнітне поле як форма існування матерії. Досліди Ерстеда. Дія магнітного поля на провідник із струмом. Закон Ампера. Характеристики магнітного поля. Лінії магнітної індукції.
2. Сила Ампера. Робота сили Ампера по переміщенню провідника із струмом у магнітному полі. Магнітний потік.
3. Закон Біа-Савара-Лапласа та його застосування для розрахунку найпростіших магнітних полів.

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНА ІНДУКЦІЯ.....65**

1. Досліди Фарадея. Електрорушійна сила індукції. Правило Ленца. Сила Лоренца. Явище електромагнітної індукції. Закон електромагнітної індукції. Вихрові струми. Скін-ефект.
2. Самоіндукція. Електрорушійна сила самоіндукції. Індуктивність контура. Закон самоіндукції. Енергія магнітного поля.

**ЛІТЕРАТУРА.....81**

## Лекція №1

**Електростатика**

1. Предмет вивчення електродинаміки, електростатики. Електричний заряд. Типи зарядів. Мікроскопічні та макроскопічні носії електричного заряду. Властивості електричних зарядів: взаємодія, дискретність, інваріантність. Електризація через дотик, електризація через вплив. Закон збереження електричного заряду. Закон взаємодії зарядів (закон Кулона).

**1. Електродинаміка** – це розділ фізики, в якому вивчаються закони руху і взаємодії електричних зарядів. **Електростатика** – це розділ електродинаміки, в якому вивчаються закони взаємодії нерухомих електричних зарядів. Взаємодія нерухомих зарядів передається через електричне поле, яке в електростатиці називають **електростатичним**. Матерія, яка є філософським поняттям об'єктивної реальності, існує у вигляді речовини і поля. **Електричний заряд** – це така частинка речовини, яка крім маси, розмірів та інших властивостей має ще додаткову властивість створювати навколо себе електричне поле й взаємодіяти через це поле з іншими електричними зарядами. Кількісною мірою такої властивості частинки речовини є фізична величина, яка також називається зарядом. Одиницею вимірювання заряду є *кулон (Кл)*.

Електричні заряди умовно поділяють на два типи – позитивні та негативні. За **позитивні** приймають такі заряди, які збираються на скляному стержні під час натирання його шовком. За **негативні** приймають такі заряди, які збираються на бурштиновому стержні під час натирання його хутром.

Розрізняють мікроскопічні та макроскопічні носії електричного заряду. **Мікроскопічними** носіями заряду є елементарні частинки та йони. Елементарними частинками називають найпростіші елементи матерії, внутрішня будова яких невідома. Тепер налічується близько двохсот елементарних частинок й багато різних йонів. Лише частина елементарних частинок є носіями електричного заряду. Більшість відомих на сьогоднішній день заряджених елементарних частинок мають дуже малий час життя, інколи частку секунди. Стабільними зарядженими елементарними частинками, що мають нескінчений час життя, є лише електрон, протон та їх античастинки – позитрон і антипротон.

**Електрон** є носієм найменшого електричного заряду в природі, який умовилися вважати негативним. Заряд електрона позначається літерою  $e$ . Він дорівнює  $e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл (кулонів)}$ . Також електрон є носієм найменшої в природі маси  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ .

Носієм позитивного заряду є **протон**. За сучасними експериментальними даними заряд протона за абсолютним значенням дорівнює заряду електрона з відносною похибкою  $\sim 10^{-21}$ , тобто, вважається, що заряд протона  $q_p = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл (кулонів)}$ . Протон є більш важкою частинкою ніж електрон  $m_p = 1836 m_e$ . Отже, маса протона  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ .

Накопичення мікроскопічних зарядів на тілах веде до утворення макроскопічних зарядів. Отже, **макроскопічними** носіями зарядів є тіла з величезною кількістю мікроскопічних носіїв заряду.

Розглянемо властивості електричних зарядів:

1) електричні заряди *взаємодіють* між собою. Різнойменні заряди притягуються, однойменні заряди відштовхуються;

2) макроскопічні заряди *дискретні*. Це означає, що існує елементарний заряд, якому кратні всі макроскопічні заряди. За елементарний заряд приймають додатне значення заряду електрона, тому що він є найменшим за абсолютним значенням з усіх можливих позитивних і негативних електричних зарядів:

$$|e| = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Тоді математичний запис дискретності макроскопічного заряду має вигляд:

$$q = N |e|,$$

де  $N = 1, 2, 3, \dots$  — кількість елементарних зарядів. Наприклад, макроскопічний заряд  $1 \text{ Кл} = 6,25 \cdot 10^{18} |e|$ . тобто він створюється  $N = 6,25 \cdot 10^{18}$  елементарними зарядами.

3) електричні заряди *інваріантні*. Це означає, що значення електричного заряду не залежить від того, чи рухається цей заряд, чи він знаходиться в стані спокою, тобто його значення не залежить від вибору системи відліку.

**Електризація** являє собою процес перерозподілу електричних зарядів між різнорідними тілами, що торкаються одне одного (електризація через дотик), або процес перерозподілу електричних зарядів вздовж поверхні тіла під впливом зовнішнього електричного поля (електризація через вплив).

*Електризація через дотик* відбувається тому, що під час контакту двох різнорідних тіл електрони, які входять до складу атомів одного тіла, можуть переходити до атомів іншого тіла. Це пояснюється неоднаковою енергією зв'язку валентних електронів з ядром в атомах різних хімічних елементів. У результаті одне тіло втрачає певну кількість електронів і набуває позитивного заряду, а друге тіло приєднує ці електрони і набуває негативного заряду.

*Електризація через вплив* відбувається тому, що зовнішнє електричне поле переміщує електрони вздовж поверхні тіла. При цьому з одного боку тіла виникає надлишок електронів, який створює негативний заряд, а на протилежному боці тіла електронів не вистачає і він набуває позитивного заряду.

Для електричне ізолюваних тіл процес електризації відбувається згідно **закону збереження електричного заряду**, який має таке формулювання: електричні заряди не виникають і не зникають; вони можуть лише передаватися від одного тіла до іншого або перерозподілятися вздовж поверхні одного тіла так, що їх алгебраїчна сума дорівнюватиме нулю.

Закон взаємодії електричних зарядів був відкритий французьким фізиком Кулоном у 1785 році. Згідно цього закону сила взаємодії двох електричних зарядів прямо пропорційна добутку цих зарядів, обернено пропорційна квадрату відстані між ними і напрямлена вздовж прямої, що з'єднує ці заряди:

$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2},$$

де  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$  – коефіцієнт пропорційності,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi(\text{фарад})}{\text{м}(\text{метр})}$  – електрична стала.

Сила взаємодії між зарядами залежить від природи навколишнього середовища, що оточує ці заряди. З урахуванням цього впливу закон взаємодії зарядів має вигляд:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{\epsilon r^2},$$

де  $\epsilon$  – діелектрична проникність середовища. **Діелектрична проникність** середовища – це число, що показує в скільки разів послаблюється сила взаємодії між зарядами у даному середовищі в порівнянні з вакуумом або повітрям. Для вакууму та повітря  $\epsilon = 1$ .

Розглянемо взаємодію двох позитивних електричних зарядів  $q_1$  і  $q_2$  на відстані  $r$  один від одного у вакуумі (рис. 1).

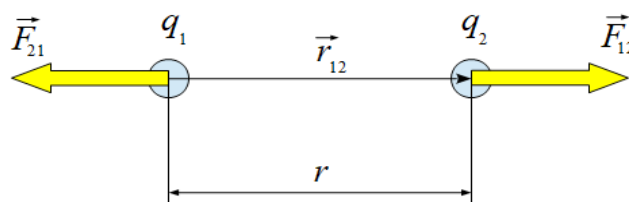


Рис. 1. Модель взаємодії однойменних електричних зарядів

Закон взаємодії цих зарядів у векторній формі має вигляд:

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^3} \cdot \vec{r}_{12}, \quad \vec{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 \cdot q_2}{r^3} \cdot \vec{r}_{21},$$

де  $\vec{r}_{12}$ ,  $\vec{r}_{21}$  – радіус-вектори зарядів. Оскільки  $\vec{r}_{12} = -\vec{r}_{21}$ , то  $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ .

### Запитання для самоконтролю

1. Що є предметом вивчення електродинаміки?
2. Що є предметом вивчення електростатики?
3. Що являє собою електричний заряд?
4. Що є кількісною мірою здатності заряду створювати навколо себе електричне поле?
5. Як відбувається взаємодія електричних зарядів?
6. На які типи поділяють електричні заряди?
7. Що являють собою мікроскопічні носії заряду?
8. Які частинки речовини називаються елементарними?
9. Що являють собою електрон, протон, позитрон, антипротон?
10. Які властивості мають електричні заряди?
11. Що являють собою макроскопічні заряди?
12. Пояснити явище електризації тіл.
13. Як відбувається електризація через дотик?
14. Як відбувається електризація через вплив?
15. Сформулювати закон збереження електричного заряду.
16. За яких умов виконується закон збереження електричного заряду?
17. Сформулювати закон взаємодії електричних зарядів (закон Кулона).
18. Чому дорівнює числове значення електричної сталої?
19. Як впливає навколишнє середовище на взаємодію електричних зарядів ?
20. Дати визначення діелектричної проникності.
21. Записати закон Кулона у векторній та скалярній формі.



## Лекція №2

## Електростатика

2. Електричне поле. Напруженість електричного поля. Принцип суперпозиції. Лінії напруженості електричного поля. Графічні зображення електричних полів. Електричний диполь.

2. Навколо електричних зарядів існує електричне поле, яке оточує ці заряди. Основною ознакою електричного поля є те, що на будь-який заряд внесений в це поле, діє сила. Для дослідження електричних полів використовують заряди, які називаються *пробними*. Пробний заряд мусить бути позитивним і досить малим, щоб його власне електричне поле не спотворювало б досліджуваного електричного поля.

Нехай нерухомий заряд  $q$  створює навколо себе електростатичне поле. У деяку точку цього простору, яка знаходиться на відстані  $r$  від заряду  $q$ , вносимо пробний заряд  $q_{пр}$ . Тоді, згідно закону Кулона, на пробний заряд діє сила:

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q_{пр}}{r^3} \vec{r}.$$

Ця сила залежить не тільки від значень  $q$  і  $r$ , але й від значення пробного заряду  $q_{пр}$ .

Оберемо якусь фіксовану точку простору і будемо вносити в цю точку по черзі різні за значенням пробні заряди  $q_{пр1}, q_{пр2}, q_{пр3}, \dots, q_{прN}$ . Тоді сили, з якими поле діятиме на них, відповідно будуть дорівнювати  $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \dots, \vec{F}_N$ . Ці сили різні за модулем, але мають однаковий напрямок. Виявляється, що для обраної точки поля відношення сили до значення пробного заряду є сталою величиною:

$$\frac{\vec{F}_1}{q_{пр1}} = \frac{\vec{F}_2}{q_{пр2}} = \frac{\vec{F}_3}{q_{пр3}} = \dots = \frac{\vec{F}_N}{q_{прN}} = const.$$

Це відношення є характеристикою електростатичного поля в даній його точці, яка називається **напруженістю** електростатичного поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{пр}}.$$

Отже, напруженість електростатичного поля в даній точці – це векторна фізична величина, яка чисельно дорівнює силі, з якою електростатичне поле діє на одиничний пробний заряд, вміщений в цю точку поля. Саме тому напруженість називається *силовою* характеристикою електростатичного поля.

Використовуючи закон Кулона, одержимо формулу для визначення напруженості поля заряду  $q$  в точці, що знаходиться на відстані  $r$  від цього заряду:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q_{np}}{r^3 q_{np}} \vec{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^3} \vec{r},$$

де  $\vec{r}$  – радіус-вектор, проведений від заряду  $q$  до точки, в якій визначається напруженість.

Нехай в просторі знаходяться позитивний електричний заряд  $q_1$  і негативний електричний заряд  $-q_2$ . Визначимо напруженість електростатичного поля в деякій точці  $A$ , що знаходиться поблизу цих зарядів (рис. 2).

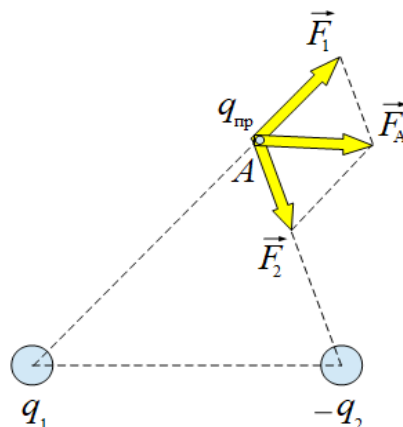


Рис. 2. Ілюстрація до визначення напруженості поля в точці  $A$

Вносимо в точку  $A$  пробний заряд  $q_{np}$ . З боку заряду  $q_1$  на пробний заряд  $q_{np}$  діє сила  $\vec{F}_1$ , а з боку заряду  $-q_2$  на пробний заряд  $q_{np}$  діє сила  $\vec{F}_2$ . Якщо сили прикладені до однієї точки, то їх дія еквівалентна дії рівнодійної сили  $\vec{F}$ , яка прикладена до цієї самої точки і дорівнює векторній сумі сил  $\vec{F}_1$  і  $\vec{F}_2$ :

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2.$$

Якщо  $\vec{F} = q_{np} \vec{E}$ ,  $\vec{F}_1 = q_{np} \vec{E}_1$ ,  $\vec{F}_2 = q_{np} \vec{E}_2$ , тоді  $q_{np} \vec{E} = q_{np} \vec{E}_1 + q_{np} \vec{E}_2 = q_{np} (\vec{E}_1 + \vec{E}_2)$ . Скорочуючи  $q_{np}$  у лівій та правій частині останньої рівності, одержимо:

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

Це правило векторного додавання напруженостей електричних полів виконується для будь-якого числа зарядів. Якщо  $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3, \dots, \vec{E}_N$  – напруженості полів, створюваних окремими зарядами в якійсь точці простору,

то напруженість  $\vec{E}$  результуючого поля в тій самій точці визначається векторною сумою:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_N.$$

Ця рівність є математичним записом **принципу суперпозиції**, який формулюється так: напруженість електростатичного поля, яке створене системою зарядів у даній точці, є *суперпозицією*, тобто векторною сумою, напруженостей полів, створюваних у цій точці кожним із зарядів. Принцип суперпозиції означає, що електростатичні поля окремих зарядів під час накладання не впливають одне на одне.

Електростатичне поле графічно можна зображувати за допомогою ліній напруженості. **Лінії напруженості** – це лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямом вектора напруженості  $\vec{E}$  в цій самій точці. Лініям напруженості приписують напрям, що збігається з напрямом вектора напруженості  $\vec{E}$  у кожній точці цих ліній. Вважається, що лінії напруженості починаються на позитивних зарядах і закінчуються на негативних зарядах або йдуть у нескінченність (рис. 3, 4, 5).

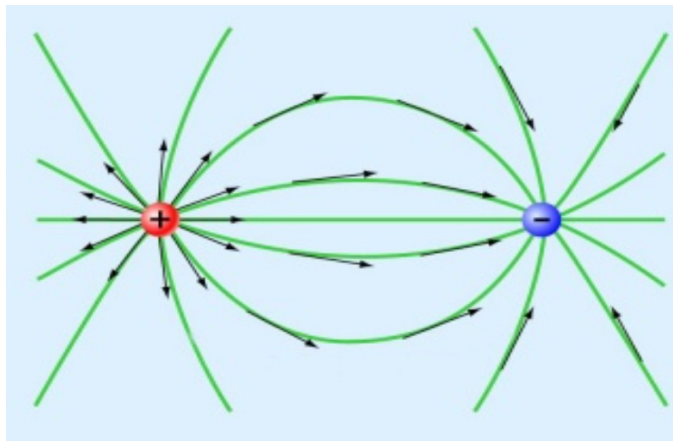


Рис. 3. Лінії напруженості двох близько розташованих різнойменних зарядів

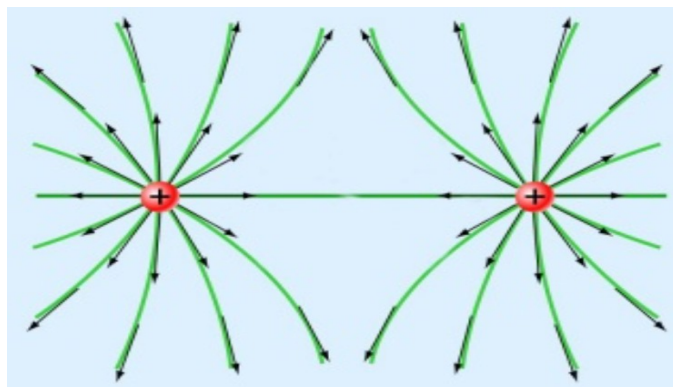


Рис. 4. Лінії напруженості двох близько розташованих однойменних зарядів

Електростатичне поле, для якого модуль і напрям вектора напруженості  $\vec{E}$  є однаковими для будь-яких точок поля, називається *однорідним*. Лінії напруженості такого поля паралельні між собою, розташовані на однаковій відстані одна від одної і мають однаковий напрям. Якщо для будь-яких точок поля модуль і напрям вектора напруженості  $\vec{E}$  є неоднаковими, то таке поле називається *неоднорідним* (приклади на рис. 3, 4, 5).



Рис. 5. Лінії напруженості окремих різнойменних зарядів

Однією з простих систем електричних зарядів є **електричний диполь**. Він являє собою сукупність двох однакових за значенням і протилежних за знаком зарядів, що знаходяться один від одного на малій відстані  $l$ , яка називається *плечем диполя* (рис. 6).

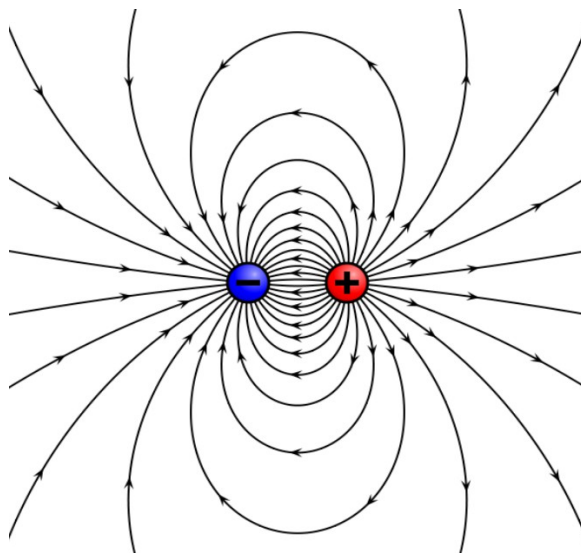


Рис. 6. Лінії напруженості електростатичного поля диполя

Основною характеристикою диполя є *електричний дипольний момент*  $\vec{P}$ , являє собою вектор, що чисельно дорівнює добутку заряду на плече і напрямлений від негативного заряду до позитивного заряду:

$$\vec{P} = q \vec{l},$$

де  $\vec{l}$  – радіус-вектор, який визначає положення позитивного заряду відносно негативного заряду (рис. 7).

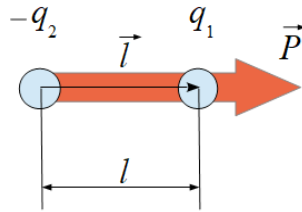


Рис. 7. Модель електричного диполя

В електричному полі диполь завжди орієнтується так, що б його дипольний момент був напрямлений вздовж ліній напруженості електростатичного поля.

### Запитання для самоконтролю

1. Що є ознакою наявності в просторі електростатичного поля?
2. Яке призначення пробних зарядів?
3. Що називається напруженістю електростатичного поля?
4. Яку роль виконує напруженість електростатичного поля?
5. Записати формулу для визначення напруженості в будь-якій точці електростатичного поля, створюваного нерухомим електричним зарядом.
6. Сформулювати принцип суперпозиції.
7. Яким є математичний запис принципу суперпозиції?
8. Що означає принцип суперпозиції?
9. Що являють собою лінії напруженості?
10. Яке призначення ліній напруженості?
11. Які електростатичні поля називаються однорідними? Навести приклади.
12. Які електростатичні поля називаються неоднорідними? Навести приклади.
13. Що являє собою електричний диполь?
14. Яка характеристика диполя є основною?
15. Якою є поведінка диполя у зовнішньому електростатичному полі?

## Лекція №3

## Електростатика

3. Робота сил електричного поля по переміщенню пробного заряду. Потенціальний характер електростатичного поля. Потенціал. Різниця потенціалів. Еквіпотенціальні поверхні. Зв'язок між напруженістю і потенціалом для однорідного електростатичного поля.

3. Нехай електростатичне поле створюється позитивним точковим зарядом  $q$ . *Точковим* називається такий заряд, розмірами носія якого в порівнянні з відстанню, на якій розглядається електростатична взаємодія, можна нехтувати. Точковий заряд є абстракцією, яка вводиться для спрощення опису поля зарядженого тіла або системи тіл. Саме для точкових зарядів сформульований закон Кулона.

У деяку точку цього поля, яка знаходиться на відстані  $r$  від заряду  $q$ , вносимо пробний заряд  $q_{np}$  (рис. 8).

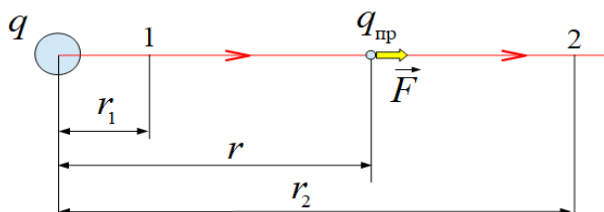


Рис. 8. Пробний заряд  $q_{np}$  в електростатичному полі заряду  $q$

З боку поля заряду  $q$  на пробний заряд  $q_{np}$  діє сила  $\vec{F} = q_{np} \vec{E}$ , яка переміщує пробний заряд вздовж лінії напруженості. Знайдемо елементарну роботу, яку виконує ця сила на елементарному переміщенні  $dr$ :

$$dA = \vec{F} \cdot \vec{dr} = F dr \cdot \cos \alpha = q_{np} E dr = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q_{np}}{r^2} dr,$$

де  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$  – напруженість поля,  $\alpha$  – кут між векторами  $\vec{F}$  і  $\vec{dr}$ ,  
 $\alpha = 0$ ,  $\cos \alpha = 1$ .

Тоді повна робота сили по переміщенню пробного заряду  $q_{np}$  з точки 1 в точку 2 електростатичного поля визначається формулою:

$$A_{12} = \int_1^2 dA = \frac{q \cdot q_{np}}{4\pi\epsilon_0} \int_1^2 \frac{dr}{r^2} = \frac{q \cdot q_{np}}{4\pi\epsilon_0} \left[ -\frac{1}{r_2} - \left(-\frac{1}{r_1}\right) \right] = \frac{q \cdot q_{np}}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Остаточно

$$A_{12} = \frac{q \cdot q_{np}}{4\pi \varepsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (3.1)$$

Таким чином, робота сили електростатичного поля по переміщенню пробного заряду залежить від початкового ( $r_1$ ) і кінцевого ( $r_2$ ) положення цього заряду і не залежить від траєкторії його руху з точки 1 в точку 2. Поля, які задовольняють такій умові, називаються *потенціальними*.

Отже, електростатичне поле є потенціальним. Якщо пробний заряд переміщується в потенціальному електростатичному полі по довільній замкненій траєкторії, то  $r_1 = r_2$  і, згідно формули (3.1), робота сили електростатичного поля дорівнює нулю.

З механіки відомо, що робота сили потенціального поля виконується за рахунок зменшення потенціальної енергії механічної системи:

$$A_{12} = W_{n1} - W_{n2}, \quad (3.2)$$

де  $W_{n1}$ ,  $W_{n2}$  – потенціальна енергія системи в початковому та кінцевому положенні.

Порівнюючи формули (3.1) і (3.2), приходимо до виразу для потенціальної енергії пробного заряду  $q_{np}$  в електростатичному полі заряду  $q$ :

$$W_n = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0} \frac{q \cdot q_{np}}{r} dr. \quad (3.3)$$

Різні пробні заряди  $q_{np1}$ ,  $q_{np2}$ ,  $\dots$ ,  $q_{npN}$  для вибраної точки електростатичного поля будуть мати різну потенціальну енергію  $W_{n1}$ ,  $W_{n2}$ ,  $\dots$ ,  $W_{nN}$ , але відношення

$$\frac{W_{n1}}{q_{np1}} = \frac{W_{n2}}{q_{np2}} = \dots = \frac{W_{nN}}{q_{npN}} = const$$

буде залишатися сталою величиною.

Відношення потенціальної енергії пробного заряду в даній точці електростатичного поля до значення цього заряду називається **потенціалом** поля в даній точці:

$$\varphi = \frac{W_n}{q_{np}}. \quad (3.4)$$

Отже, потенціал – це скалярна фізична величина, яка чисельно дорівнює потенціальній енергії, яку б мав одиничний пробний заряд, вміщений в дану

точку поля. Потенціал є енергетичною характеристикою електростатичного поля. Одиницею вимірювання потенціалу є *вольт* ( $B$ ).

Одержимо формулу для визначення потенціалу електростатичного поля, яке створюється точковим зарядом  $q$  на відстані  $r$  в точці, де знаходиться пробний заряд  $q_{np}$ :

$$\varphi = \frac{W_n}{q_{np}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q \cdot q_{np}}{r q_{np}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}.$$

Остаточно 
$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}. \quad (3.5)$$

З формули (3.5) бачимо, що коли  $r \rightarrow \infty$ , тоді  $\varphi_\infty = 0$ , тобто потенціал точок поля, нескінченно віддалених від точкового заряду  $q$ , дорівнює нулю.

Потенціали точок поля позитивного заряду вважаються додатними, потенціали точок поля негативного заряду вважаються від'ємними. За принципом суперпозиції потенціал поля системи точкових зарядів в даній точці дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів полів, створюваних в даній точці кожним із зарядів:

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i.$$

Враховуючи, що  $W_n = q_{np}\varphi$ , формулу для визначення роботи електростатичного поля по переміщенню пробного заряду запишемо у вигляді:

$$A_{12} = W_{n1} - W_{n2} = q_{np}\varphi_1 - q_{np}\varphi_2 = q_{np}(\varphi_1 - \varphi_2) = q_{np}U_{12},$$

де  $\varphi_1, \varphi_2$  – потенціали точок поля 1 і 2,  $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$  – різниця потенціалів або електрична *напруга*. Напруга, як і потенціал, вимірюється у вольтах ( $B$ ).

Фізичний зміст різниці потенціалів (електричної напруги) – це робота сил електростатичного поля по переміщенню одиничного пробного заряду  $q_{np}$  з точки поля, потенціал якої  $\varphi_1$ , в точку поля з потенціалом  $\varphi_2$ .

Якщо пробний заряд  $q_{np}$  переміщується в електростатичному полі заряду  $q$  з будь-якої точки 1 на нескінченність, тоді робота по переміщенню цього заряду дорівнює:

$$A_{1\infty} = q_{np}(\varphi_1 - \varphi_\infty) = q_{np}\varphi_1, \quad \text{оскільки } \varphi_\infty = 0.$$

Звідки 
$$\varphi_1 = \frac{A_{1\infty}}{q_{np}},$$

тобто потенціалом електростатичного поля в заданій точці називається скалярна фізична величина, що чисельно дорівнює роботі сили поля по переміщенню одиничного пробного заряду  $q_{np}$  з даної точки поля на нескінченність.



З формули (3.5) бачимо, що рівновіддалені від заряду  $q$  точки поля мають однакові потенціали. Геометричне місце точок поля з однаковими потенціалами називається **еквіпотенціальною поверхнею**. За допомогою еквіпотенціальних поверхонь, як і за допомогою ліній напруженості, графічно зображують електростатичні поля. На рисунку їх проводять у вигляді ліній так, щоб під час переходу від однієї до сусідньої еквіпотенціальної поверхні зміна потенціалу була однаковою  $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi_2 = \dots = \Delta\varphi_N = \text{const}$  (рис. 9).

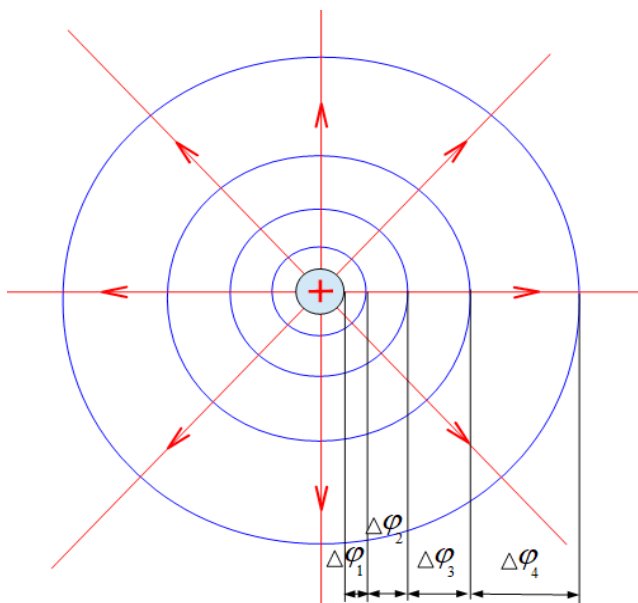


Рис. 9. Графічне зображення електростатичного поля точкового позитивного заряду лініями напруженості та еквіпотенціальними поверхнями (колові лінії)

Знайдемо роботу сили електростатичного поля по переміщенню пробного заряду  $q_{np}$  вздовж еквіпотенціальної поверхні:

$$A_{12} = q_{np}(\varphi_1 - \varphi_2) = q_{np} \int_1^2 E dr \cos \alpha = 0,$$

оскільки  $\varphi_1 = \varphi_2$ . Звідки  $\cos \alpha = 0$ , а це означає, що  $\alpha = 90^\circ$ . Отже,  $\vec{E} \perp \vec{dr}$ , тобто лінії напруженості перпендикулярні дотичним до еквіпотенціальних поверхонь, тому що вектор  $\vec{dr}$  напрямлений по дотичній до кожної точки еквіпотенціальної поверхні.

Напруженість і потенціал є різними за фізичним змістом характеристиками електростатичного поля в даній точці простору, тому між ними повинен існувати взаємозв'язок. Знайдемо його для випадку однорідного електростатичного поля.

Нехай пробний заряд  $q_{\text{пр}}$  переміщується в однорідному полі з точки 1 в точку 2 під дією сили  $\vec{F}$  (рис. 10). Проведемо через ці точки екіпотенціальні поверхні у вигляді паралельних ліній, які перпендикулярні до ліній напруженості. З боку електростатичного поля на пробний заряд  $q_{\text{пр}}$  діє сила  $\vec{F}$ .

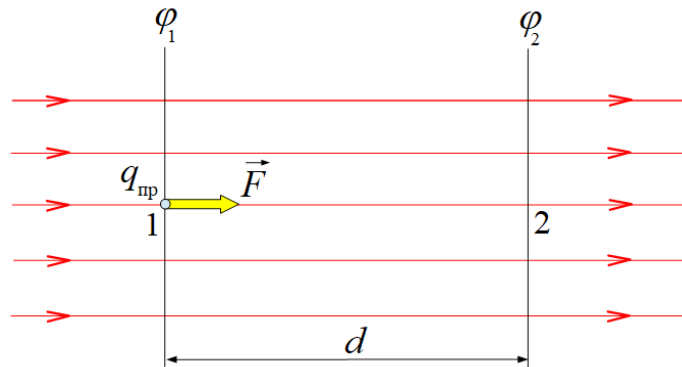


Рис. 10. Пробний заряд в однорідному електростатичному полі

Якщо відстань між точками 1 і 2 дорівнює  $d$ , тоді роботу цієї сили по переміщенню пробного заряду можна визначити за формулами:

Порівнюючи праві частини обох формул, маємо:

$$q_{\text{пр}} E d = q_{\text{пр}} (\varphi_1 - \varphi_2).$$

Звідки 
$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}. \quad (3.6)$$

Отже, напруженість і потенціал електростатичного поля зв'язані між собою формулою (3.6). З цієї формули бачимо, що напруженість вимірюється в одиницях  $\frac{B \text{ (вольт)}}{m \text{ (метр)}}$ .

### Запитання для самоконтролю

1. Які електричні заряди називаються точковими?
2. Яка роль точкових зарядів у електростатиці?
3. За якою формулою визначається робота сили електростатичного поля по переміщенню пробного заряду в цьому полі?
4. Чому електростатичне поле є потенціальним?
5. Чому робота сили по переміщенню пробного заряду в електростатичному полі по замкненій траєкторії дорівнюватиме нулю?
6. За якою формулою визначається потенціальна енергія пробного заряду в електростатичному полі?
7. Що називається потенціалом електростатичного поля?
8. Яка роль потенціалу в електростатиці?
9. В яких одиницях вимірюється потенціал?
10. За якою формулою визначаються потенціали в точках електростатичного поля, створеного точковим зарядом  $q$ ?
11. Чому потенціал нескінченно віддалених точок поля від точкового заряду  $q$  дорівнюватиме нулю?
12. Як визначається потенціал поля системи точкових зарядів в даній точці цього поля?
13. За якою формулою визначається робота сили електростатичного поля по переміщенню пробного заряду в цьому полі з використанням поняття потенціалу?
14. Що називається електричною напругою?
15. Яким є фізичний зміст електричної напруги?
16. Сформулювати визначення потенціалу електростатичного поля через поняття роботи сили поля по переміщенню пробного заряду з даної точки поля на нескінченність.
17. Що називається еквіпотенціальною поверхнею?
18. Як графічно зображуються електростатичні поля за допомогою еквіпотенціальних поверхонь?
19. Як орієнтовані лінії напруженості електростатичного поля до еквіпотенціальних поверхонь?
20. Як зв'язані між собою потенціал і напруженість в даній точці однорідного електростатичного поля?

## Лекція №4

## Електростатика

4. Провідники в електростатичному полі. Розподіл зарядів у провіднику. Електростатична індукція. Еквіпотенціальність поверхні провідника. Електростатичний захист.
5. Діелектрики в електростатичному полі. Поляризація діелектриків. Діелектрична проникність. Сегнетоелектрики, електрети, п'єзоелектрики, піроелектрики.

**4. Провідники** – це речовини, які добре проводять електричний струм. Розрізняють провідники першого та другого роду. Провідниками *першого роду* є метали, провідники *другого роду* – це електроліти (розчини солей, лугів, кислот у воді або інших розчинниках).

У металевих провідниках завжди є *вільні* електрони, які знаходяться у безперервному хаотичному русі в межах цього провідника. Вільними електронами стають валентні електрони, які слабо зв'язані з позитивно зарядженими ядрами атомів і легко відділяються від атомів. Внаслідок цього атоми металів перетворюються на позитивно заряджені йони, а валентні електрони – на вільні електрони.

Якщо металевий провідник внести в зовнішнє електростатичне поле напруженістю  $\vec{E}_0$ , то під впливом сил цього поля  $\vec{F} = e \vec{E}_0$  вільні електрони зміщуються проти напрямку ліній напруженості поля. При цьому на одному боці провідника електрони накопичуються, створюючи негативний заряд, а на протилежному боці провідника електронів не вистачатиме й він буде набувати позитивного заряду. У середині провідника виникає наведене електричне поле, вектор напруженості якого  $\vec{E}'$  напрямлений протилежно до вектора напруженості зовнішнього електростатичного поля  $\vec{E}_0$  (рис. 11, а).

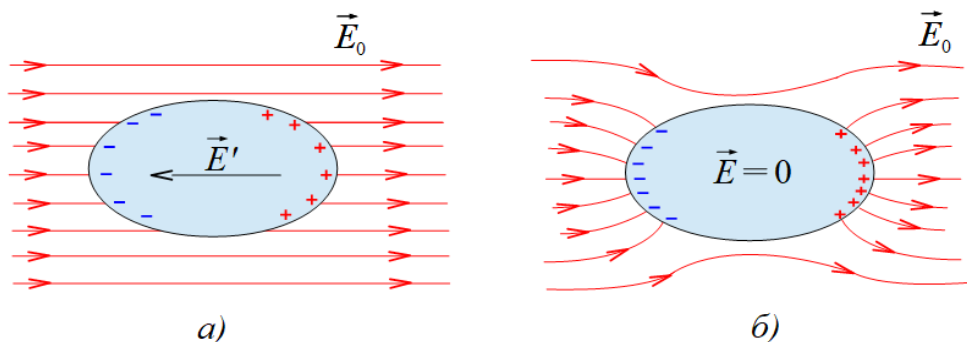


Рис. 11. Металевий провідник у зовнішньому електростатичному полі

Перерозподіл зарядів триватиме до тих пір, поки результуюча напруженість поля всередині провідника не дорівнюватиме нулю  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' = 0$ , де  $\vec{E}' = -\vec{E}_0$ . При цьому частина ліній напруженості розривається провідником, а решта ліній вигинається в бік провідника (рис. 11, б).

Перерозподіл електричних зарядів у металевому провіднику під дією зовнішнього електростатичного поля називається **електростатичною індукцією** або **електризацією через вплив**. Відсутність електричного поля всередині провідника означає, що заряди в цьому місці провідника взаємно компенсуються. Залишаються лише заряди на поверхні провідника. Товщина поверхневого шару, в якому зосереджені заряди, має розміри міжатомної відстані, тому їх розподіл по поверхні провідника характеризується поверхневою густиною зарядів  $\sigma = \frac{q}{A}$ , де

$A$  – площа поверхні провідника.

Напруженість електричного поля біля поверхні металевого провідника, який знаходиться в зовнішньому електростатичному полі, визначається поверхневою густиною зарядів  $\sigma$ , електричними властивостями навколишнього середовища (діелектрична проникність  $\varepsilon$ ) і напрямлена перпендикулярно до цієї поверхні:

$$\vec{E}_n = \frac{\sigma}{\varepsilon \varepsilon_0} \vec{n}, \quad (4.1)$$

де  $\vec{n}$  – одиничний вектор (нормаль), який перпендикулярний дотичній до поверхні провідника.

Відсутність електричного поля всередині провідника також означає, що всі точки поверхні мають однаковий потенціал, тому що рух електронів по поверхні провідника припиняється тоді, коли потенціали усіх точок поверхні зарядженого провідника є однаковими. Таким чином, у випадку рівноваги електричних зарядів поверхня провідника є *еквіпотенціальною*.

Розглянемо електростатичне поле, що створюється позитивними зарядами, навколо металевого провідника складної форми (рис. 12).

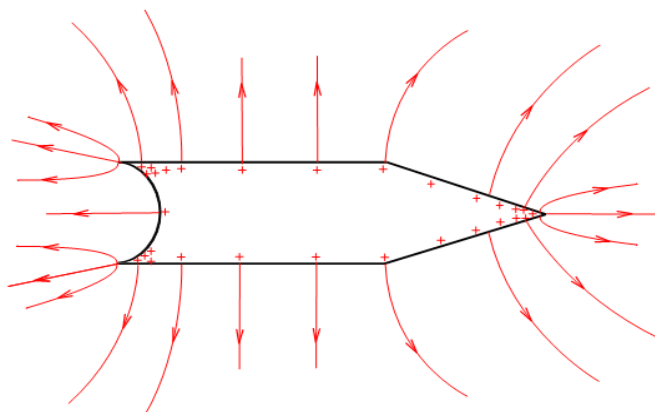


Рис. 12. Лінії напруженості електростатичного поля провідника складної форми

Поблизу виступу лінії напруженості розташовуються більш щільно ніж біля опуклих та вгнутих ділянок поверхні провідника. Це означає, що біля виступу буде більшою напруженість електростатичного поля  $\vec{E}_n$ . Згідно формули (4.1) біля виступу буде більшою й поверхнева густина зарядів  $\sigma$ . Поблизу опуклих та вгнутих ділянок поверхні провідника лінії напруженості розташовуються менш щільно, тому в цих місцях напруженість поля  $\vec{E}_n$  і поверхнева густина зарядів  $\sigma$  будуть меншими. Таким чином, поверхнева густина зарядів  $\sigma$  для даного потенціалу провідника  $\varphi$  залежить ще від кривизни його поверхні.

Найбільшу поверхневу густину зарядів мають вістря провідників. При достатньому потенціалі провідника напруженість електричного поля біля вістря може бути настільки великою, що відбувається іонізація молекул повітря навколо вістря. Іони протилежного знаку, ніж заряд на поверхні провідника, притягуються до провідника й намагаються нейтралізувати заряди провідника. Іони того ж самого знаку, що і заряди на поверхні провідника, починають рухатися від провідника, захоплюючи з собою нейтральні молекули повітря. При цьому виникає рух молекул повітря, який називається “*електричним вітром*”.

Іонізації молекул повітря можна запобігти, якщо металеві поверхні пристроїв, що працюють під високою напругою, зробити більш опуклими або вгнутими, а вістря забезпечити гладенькими кульками.

Оскільки всередині провідника електричне поле відсутнє, то картини деформованого поля будуть однаковими як для суцільного так й для порожнистого провідників. Якщо в середину порожнистого провідника внести будь-яке тіло, то на нього не діятиме зовнішнє електростатичне поле (рис. 13). Так електростатичну індукцію використовують для **електростатичного захисту** чутливих приладів від впливу зовнішніх електростатичних полів. У цьому випадку порожнистий провідник відіграє роль *екрану*, а його захисна дія називається *екрануванням*.

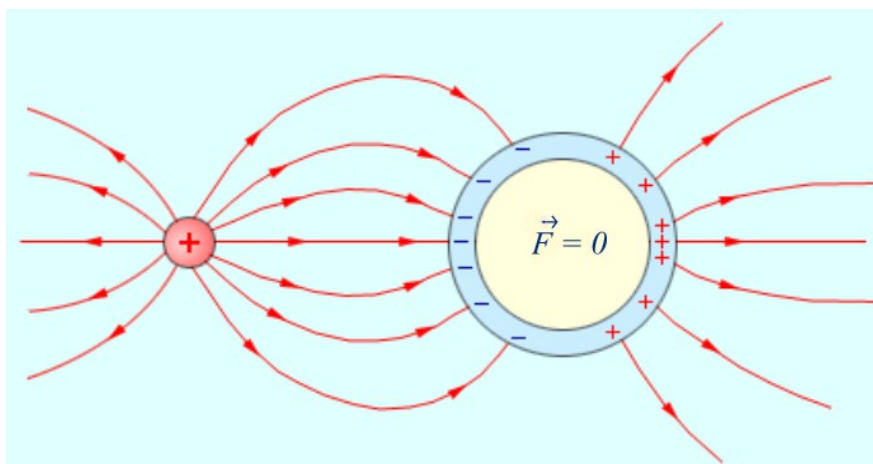


Рис. 13. Електростатичний захист.

Розглянемо, чи екранує порожнистий провідник зовнішній простір від поля зарядів, які знаходяться всередині цього провідника (рис. 14).

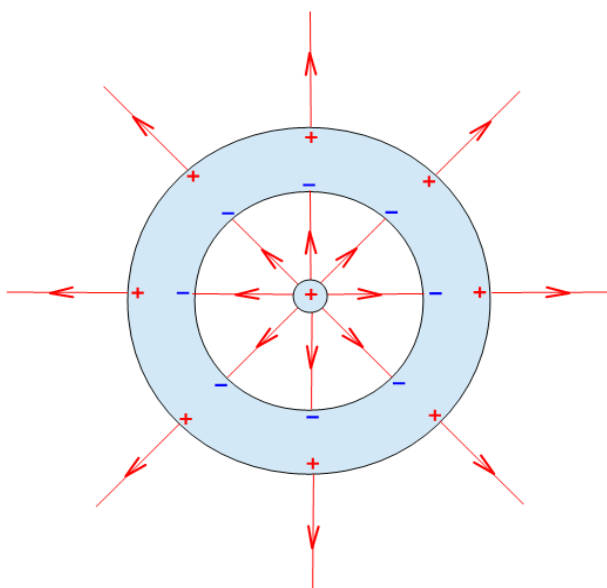


Рис. 14. Позитивний заряд всередині порожнистого провідника

Нехай всередині порожнистого провідника знаходиться позитивний макроскопічний заряд  $q$ . Завдяки явищу електростатичної індукції на внутрішньої поверхні провідника індукується негативний макроскопічний заряд  $-q$ , який за значенням дорівнює макроскопічному заряду  $q$ . На зовнішньої поверхні провідника індукується позитивний макроскопічний заряд  $q$ , який за значенням, згідно закону збереження заряду, дорівнює негативному макроскопічному заряду  $-q$  на внутрішньої поверхні провідника.

Отже, поза порожнистим провідником виникає електростатичне поле, джерелом якого є заряд  $q$ , що знаходиться всередині цього провідника. Це означає, що порожнистий провідник не екранує зовнішнього простору.

З'єднаємо порожнистий провідник із Землею окремим провідником (рис. 15).

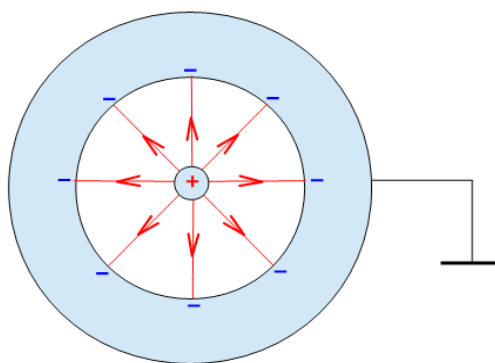


Рис. 15. Заземлення порожнистого провідника

Земля також вважається провідником із нескінченно великою ємністю, потенціал якої дорівнює нулю. Позитивні заряди на зовнішньої поверхні порожнистого провідника нейтралізуються негативними зарядами Землі, а його потенціал зменшується до нуля. Негативні заряди на внутрішньої поверхні порожнистого провідника та макроскопічний заряд  $q$  всередині провідника залишаються, але електростатичне поле, що існувало поза провідником, зникає.

Отже, порожнистий провідник екранує зовнішній простір від поля макроскопічного заряду  $q$ , що знаходиться всередині цього провідника лише тоді, коли його зовнішня поверхня з'єднана із Землею.

Якщо всередині порожнистого провідника знаходиться негативний макроскопічний заряд  $-q$ , тоді під час заземлення потенціал провідника зменшується до нуля, а негативні заряди, що індукуються на зовнішньої поверхні провідника, йдуть у Землю.

**5. Діелектриками** називаються речовини, які не проводять електричний струм, тому що в них відсутні вільні носії заряду. Для діелектриків властиві *зв'язані* заряди. Зв'язаними називаються такі заряди, які зосереджені в атомах і молекулах або знаходяться у вузлах кристалічних решіток іонних кристалів. Під дією зовнішнього електростатичного поля вони зміщуються на дуже малі відстані в межах атомів, молекул, вузлів решіток.

Процес зміщення зв'язаних зарядів під впливом зовнішнього електростатичного поля називається **поляризацією** діелектриків. Таким чином, діелектрики – це речовини, які здатні поляризуватися в зовнішньому електростатичному полі. Поляризація з молекулярної точки зору в різних діелектриках відбувається неоднаково, тому діелектрики поділяються на три типи: полярні, неполярні діелектрики та іонні кристали.

До *полярних* діелектриків відносять такі речовини, в молекулах яких центри позитивних і негативних зарядів не збігаються. Молекули полярних діелектриків мають асиметричну форму, вони подібні до жорстких електричних диполів із сталим дипольним моментом  $\vec{P} = q \vec{l} = const$ , де  $l$  – плече диполя, що відповідає незмінній відстані між центрами позитивних і негативних зарядів. Прикладами полярних діелектриків є  $H_2O$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $NH_3$ ,  $HCl$  та інші речовини.

До *неполярних* діелектриків відносять такі речовини, в молекулах яких центри позитивних і негативних зарядів збігаються. Прикладами неполярних діелектриків є інертні гази He, Ne, Ar, а також  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$  та інші речовини в газоподібному та рідинному станах.

До *іонних кристалів* відносять тверді речовини, у вузлах просторових решіток яких правильно чергуються йони протилежного знаку. Прикладами іонних кристалів є кухонна сіль  $NaCl$  (рис. 16), а також  $LiF$ ,  $KCl$ , нітрати, фосфати та інші солі металів.



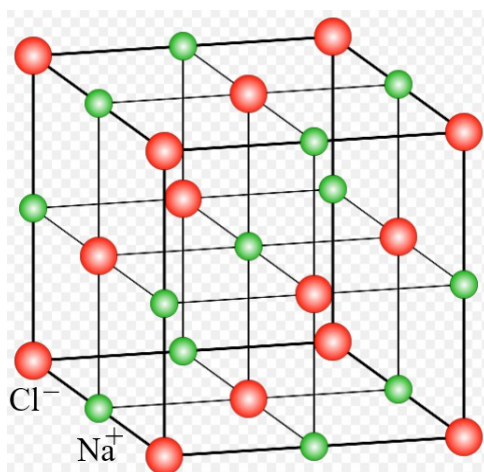


Рис. 17. Модель кристалічної решітки NaCl

Відповідно до трьох видів діелектриків існують три види поляризації: орієнтаційна, електронна та іонна.

*Орієнтаційна* поляризація характерна для полярних діелектриків. Якщо на такий діелектрик не впливає зовнішнє електростатичне поле, то внаслідок хаотичного руху полярні молекули орієнтовані безладно. При цьому векторна сума дипольних моментів усіх молекул в довільному об'ємі діелектрика дорівнюватиме нулю:  $\vec{P} = \sum_{i=1}^N \vec{P}_i = 0$ . Такий стан відповідає неполяризованому діелектрику (рис. 18, а).

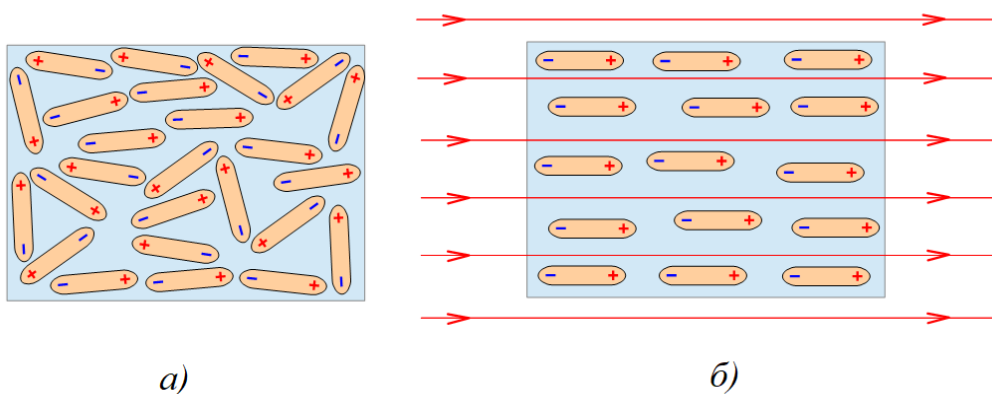


Рис. 18. Модель орієнтаційної поляризації полярних діелектриків

Якщо полярний діелектрик внести у зовнішнє електростатичне поле, то його молекули орієнтуються в об'ємі діелектрика так, щоб вектори їх дипольних моментів встановились у напрямку ліній напруженості зовнішнього електростатичного поля. При цьому сумарний дипольний момент буде відмінним

від нуля:  $\vec{P} = \sum_{i=1}^N \vec{P}_i > 0$ . Такий стан відповідає поляризованому діелектрику (рис. 18, б).

*Електронна* поляризація характерна для неполярних діелектриків. Якщо внести такий діелектрик у зовнішнє електростатичне поле, то відбувається деформація електронних орбіт, яка приводить до зміщення центра негативних зарядів відносно центра позитивних зарядів. Так виникає індукований диполь, який зникає разом із зовнішнім електростатичним полем. Деформація електронних орбіт подібна до зміщення частинок речовини під час пружної деформації, тому індуковані диполі називаються пружними на відміну від жорстких диполів полярних діелектриків.

*Іонна* поляризація характерна для іонних кристалів. Будову просторової решітки іонного кристала можна уявити як дві решітки з йонами протилежного знаку, вставлених одна в одну. В зовнішньому електростатичному полі відбувається зміщення решіток одна відносно одної. Так виникає поляризований стан діелектрика.

Розглянемо поляризований діелектрик у зовнішньому електростатичному полі. Якщо всередині діелектрика виділити будь-який об'єм, то він залишається електрично нейтральним, тому що близько розташовані різноміненні заряди диполів взаємно компенсуються. Інша картина буде в тонких шарах біля поверхні поляризованого діелектрика. Незалежно від виду поляризації на поверхні діелектрика, в яку входять лінії напруженості зовнішнього електростатичного поля, збільшується концентрація негативних зарядів, а на протилежній поверхні діелектрика, з якій виходять лінії напруженості зовнішнього електростатичного поля, збільшується концентрація позитивних зарядів (рис. 19).

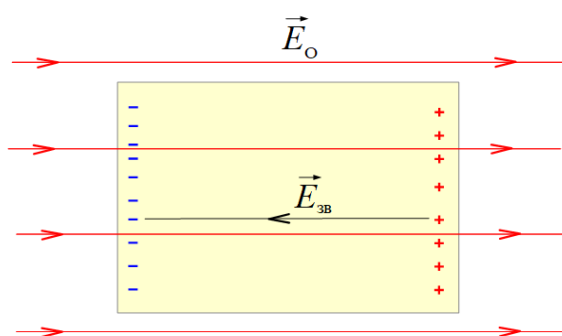


Рис. 19. Поляризація діелектрика

Таким чином, всередині поляризованого діелектрика поверхневі зв'язані заряди створюють внутрішнє електричне поле з напруженістю  $\vec{E}_{зв}$ , яке напрямлене протилежно зовнішньому електростатичному полю з напруженістю  $\vec{E}_0$ .

Кількісною характеристикою електричних властивостей діелектрика є **діелектрична проникність**. Вона являє собою число, що показує в скільки

разів послаблюється зовнішнє електростатичне поле в діелектрику в порівнянні з вакуумом або повітрям:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E_0 - E_{зв}}$$

Діелектрики з дуже великими значеннями діелектричної проникності називаються **сегнетоелектриками**. Таку назву вони дістали від типового представника цієї групи – сегнетової солі, діелектрична проникність якої в інтервалі температур від  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $22,5^{\circ}\text{C}$  досягає значення 10000. Великі значення діелектричної проникності сегнетоелектриків пов'язані з виникненням в них в певному температурному інтервалі спонтанно поляризованих областей, які називаються *доменами*. У зовнішньому електростатичному полі дипольні моменти доменів орієнтуються вздовж лінії напруженості цього поля, сегнетоелектрик поляризується й зберігає значення  $\varepsilon \sim 10000$  у згаданому температурному інтервалі. Поза межами цього інтервалу спонтанна поляризація доменів послаблюється, тому діелектрична проникність істотно зменшується.

Існують діелектрики, які здатні довгий час зберігати поляризований стан – від кількох діб до багатьох років. Такі діелектрики називаються **електретами**. Усі електрети мають стабільний поверхневий заряд, тому вони використовуються як джерела постійного електричного поля й є аналогами постійних магнітів. Електрети виготовляють із воску (канаубський віск, бджолиний віск, парафін) і смол, з полімерів (полівінілхлорид, полікарбонат), із скла.

Діелектрики, які набувають поляризованого стану в процесі механічної деформації, називаються **п'єзоелектриками**. Найбільш поширеним у природі п'єзоелектриком є кварц. П'єзоелектриками можуть бути тільки іонні кристали, для яких електричний дипольний момент виникає під час зміщення вузлів кристалічної решітки від своїх положень рівноваги. Крім кварцу до п'єзоелектриків належать турмалін, хлорид натрію, сегнетова сіль, титанат барію та багато інших мінералів.

**Піроелектрики** – це діелектрики, які мають спонтанну поляризацію незалежно від зовнішнього впливу. Зазвичай заряди на поверхні піроелектрика нейтралізуються зарядами з повітря. Із зміною температури концентрація некомпенсованих зарядів зростає й нейтральність піроелектриків порушується, навколо них виникає електричне поле. До піроелектриків належать турмалін, нефелін, піротин та інші мінерали.

### Запитання для самоконтролю

1. Які речовини називаються провідниками?
2. На які типи поділяються провідники?
3. Яка природа вільних електронів у металевих провідниках?
4. Що відбувається з провідниками у зовнішньому електростатичному полі?
5. Що називається електростатичною індукцією?
6. Чому у провідника, який знаходиться у зовнішньому електростатичному полі, в його всередині виникає наведене електричне поле?
7. За яких умов електричне поле всередині провідника відсутнє?
8. Що називається поверхневою густиною зарядів?
9. За якою формулою визначається напруженість поля біля поверхні провідника, який знаходиться у зовнішньому електростатичному полі?
10. Чому поверхня провідника, який знаходиться у зовнішньому електростатичному полі, є еквіпотенціальною?
11. Які особливості має електростатичне поле зарядженого провідника складної форми?
12. Яким є зв'язок між поверхневою густиною зарядів та кривизною поверхні провідника?
13. Що означає поняття “електричного вітру”?
14. Як можна уникнути “електричного вітру”?
15. Якою є ідея електростатичного захисту?
16. Чому ізолюваний порожнистий провідник не екранує зовнішнього простору від електричного поля зарядів, що знаходяться в його середині?
17. Чому порожнистий провідник, поверхня якого з'єднана із Землею, екранує зовнішній простір від електричного поля зарядів, що знаходяться в його середині?
18. Які речовини називаються діелектриками?
19. Чому діелектрики не проводять електричний струм?
20. Які електричні заряди властиві діелектрикам?
21. Як поведуть себе діелектрики у зовнішньому електростатичному полі?
22. Що називається поляризацією діелектрика?
23. Які існують типи діелектриків?
24. Які діелектрики називаються полярними?
25. Чому молекули полярних діелектриків подібні до жорстких диполів?
26. Навести приклади полярних діелектриків.
27. Які діелектрики називаються неполярними?
28. Навести приклади неполярних діелектриків.
29. Яку особливість молекулярної будови мають іонні кристали?
30. Навести приклади іонних кристалів.
31. Які існують види поляризації?
32. Яким є механізм орієнтаційної поляризації?
33. Яким є механізм електронної поляризації?

34. Якими є особливості індукованого диполя?
35. Чому індуковані диполі називаються пружними?
36. Яким є механізм іонної поляризації?
37. Чому всередині поляризованого діелектрика зовнішнє електростатичне поле послаблюється?
38. Яку роль для діелектриків виконує діелектрична проникність?
39. Дати визначення діелектричної проникності?
40. Які діелектрики називаються сегнетоелектриками?
41. Чим пояснюються великі значення діелектричної проникності сегнетоелектриків?
42. Чому сегнетоелектрики зберігають великі значення діелектричної проникності лише в певному температурному інтервалі?
43. Які діелектрики називаються електретами?
44. Яке призначення електретів?
45. Навести приклади електретів.
46. Які діелектрики називаються п'єзоелектриками?
47. Яким є механізм поляризації п'єзоелектриків?
48. Навести приклади п'єзоелектриків.
49. Які діелектрики називаються піроелектриками?
50. Як виникає електричне поле навколо піроелектриків? Навести приклади піроелектриків.

## Лекція №5

## Електростатика

6. Електроємність провідника. Конденсатор. Електроємність конденсатора. З'єднання конденсаторів. Енергія електростатичного поля.

6. Відомо, що поверхня зарядженого провідника є екіпотенціальною поверхнею. Зміна заряду провідника приводить до відповідної зміни його потенціалу, тобто між зарядом і потенціалом існує пряма пропорційність  $q \sim \varphi$ . Якщо знак пропорційності замінювати на знак рівності, то слід ввести коефіцієнт пропорційності  $q = C \varphi$ , який називається електроємністю провідника:

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

**Електроємність** – це скалярна фізична величина, що чисельно дорівнює заряду, який необхідно надати провіднику для збільшення його потенціалу на 1 вольт. Одиницею вимірювання електроємності є *фарад* ( $\Phi$ ).

Електроємність провідника  $1\Phi$  є дуже великою за значенням одиницею. Покажемо це на прикладі: знайдемо радіус зарядженої кулі, електроємність якої дорівнює  $1\Phi$ . Потенціал кулі визначається за формулою:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{R},$$

де  $R$  – радіус кулі. Звідки  $C = \frac{q}{\varphi} = 4\pi\epsilon_0 R$ . Якщо  $C = 1\Phi$ , тоді радіус кулі дорівнює:

$$R = \frac{C}{4\pi\epsilon_0} = \frac{1\Phi}{4 \cdot 3,13 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}} = 9 \cdot 10^9 \text{ м} = 9 \cdot 10^6 \text{ км}.$$

Отже, заряджена куля з електроємністю  $C = 1\Phi$  має радіус, що перевищує відстань від Землі до Місяця в 23 рази. Тому електроємність провідника виражають в дільних одиницях фарада:

$$1 \text{ мк}\Phi \text{ (мікрофарад)} = 1 \cdot 10^{-6} \Phi, \quad 1 \text{ н}\Phi \text{ (нанофарад)} = 1 \cdot 10^{-9} \Phi, \\ 1 \text{ п}\Phi \text{ (пікофарад)} = 1 \cdot 10^{-12} \Phi, \quad 1 \text{ ф}\Phi \text{ (фемтофарад)} = 1 \cdot 10^{-15} \Phi.$$

Електроємність провідника залежить від його геометричних розмірів і форми, розташування навколо нього інших провідників, електричних

властивостей навколишнього середовища. Практичного значення набули системи з двох близько розташованих заряджених провідників, які розділені шаром діелектрика. Заряди провідників однакові, але мають протилежний знак. Така система провідників називається **конденсатором** (рис. 20).

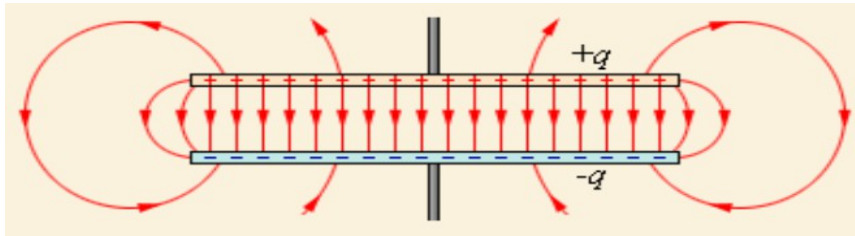
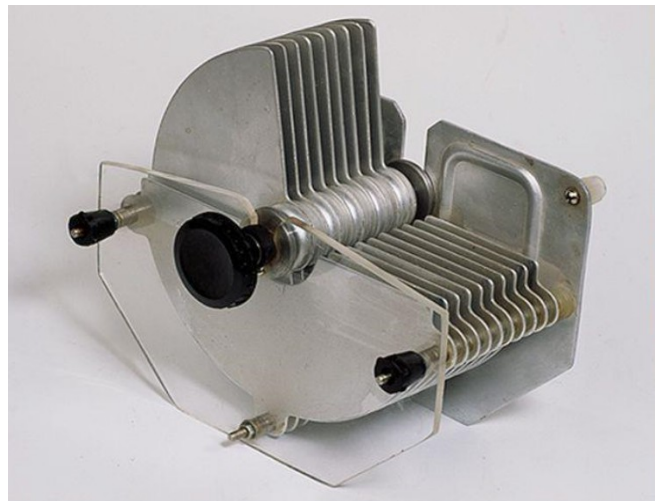


Рис. 20. Модель конденсатора

Електричне поле в конденсаторі повністю зосереджено між провідниками, тому електроємність конденсатора не залежить від наявності оточувальних тіл та електричних властивостей навколишнього середовища. Провідники називаються *обкладками* конденсатора. Залежно від форми обкладок конденсатори поділяються на плоскі, сферичні та циліндричні. За природою діелектрика конденсатори поділяються на повітряні, паперові, слюдяні, керамічні, електролітичні (рис. 21).



а)



б)

Рис. 21. Будова паперового конденсатора (а), плоский повітряний конденсатор (б)

Перший конденсатор був виготовлений в голландському місті Лейден німецьким фізиком Юргеном фон Клейстом і голландським фізиком Пітером ван Мушенбруком у 1745 році, який отримав назву “*лейденська банка*”. Будова конденсатора включала заповнену водою скляну посудину, до внутрішньої та зовнішньої стінки якої прикріплювалась металева фольга.

Отже, лейденська банка являла собою циліндричний конденсатор з обкладками із фольги, що розділені шаром скла (рис. 22). Електричні заряди потрапляли на внутрішню обкладку через металевий стержень, який проходив крізь кришку посудини й був занурений у воду. Завдяки електростатичній індукції на зовнішньої обкладці індукувалися заряди протилежного знаку. Лейденська банка дозволяла накопичувати і зберігати порівняно великі заряди порядку мікрокулона. Завдяки Лейденській банці вдалося вперше штучним шляхом отримати електричну іскру.



Рис. 22. Лейденська банка

Сучасні конденсатори мають значно менші розміри за лейденську банку, але накопичують набагато більший макроскопічний електричний заряд (рис. 23).

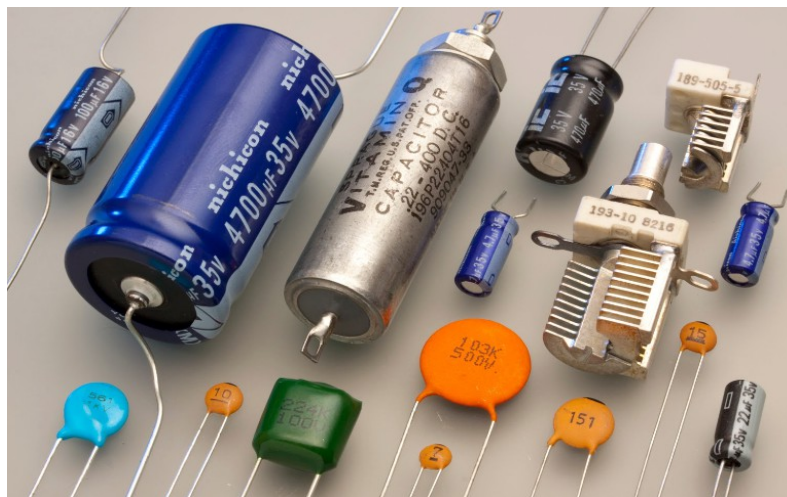


Рис. 23. Різні типи сучасних конденсаторів



Таким чином, конденсатор – це пристрій для накопичення електричних зарядів. Чим більша електроємність конденсатора, тим більше зарядів він накопичує. **Електроємність конденсатора** визначається за формулою:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2},$$

де  $q$  – заряд однієї з обкладок конденсатора,  $(\varphi_1 - \varphi_2)$  – різниця потенціалів між обкладками.

Змінювати електроємність конденсатора можна як за рахунок зміни площі обкладок або відстані між обкладками, а також використовуючи діелектрики з різними значеннями діелектричної проникності. Якщо, наприклад, електроємність довільного конденсатора, між обкладками якого вакуум або повітря ( $\varepsilon_1 = 1$ ) дорівнює  $C_1$ , то при заповненні простору між ними іншим діелектриком з діелектричною проникністю  $\varepsilon_2$  ( $\varepsilon_2 > \varepsilon_1$ ) його електроємність збільшується й дорівнює  $C_2$ . Тоді

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \varepsilon_2.$$

Отже, діелектрична проникність показує в скільки разів збільшується електроємність конденсатора при використанні даного діелектрика замість вакууму або повітря.

Розглянемо плоский конденсатор, який складається з двох плоских паралельних металевих пластин, розділених шаром діелектрика. Кожна з пластин має площу  $A$ , однакові за значенням й протилежні за знаком макроскопічні заряди  $q$  та знаходяться на відстані  $d$  одна від одної.

Електричне поле між обкладками конденсатора є однорідним, а його напруженість визначається за формулою:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} = \frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon A},$$

З іншого боку напруженість однорідного поля між обкладками дорівнює:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}.$$

Порівнюючи праві частини двох останніх рівнянь, маємо:

$$\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d} = \frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon A}.$$

Звідки 
$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{qd}{\varepsilon_0 \varepsilon A}.$$

Визначаємо *ємність плоского конденсатора*:

Остаточно 
$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d}.$$

*Ємність і напруженість електричного поля між обкладками для циліндричного, сферичного конденсаторів та сфери зведені в таблицю (табл. 1).*

Табл. 1. Ємність та напруженість електричного поля між обкладками для конденсаторів різних типів

Назва	Ємність	Електричне поле	Схема
Плоский конденсатор	$C = \varepsilon_0 \varepsilon \cdot \frac{A}{d}$	$E = \frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon A}$	
Циліндричний конденсатор	$C = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon \frac{l}{\ln(R_2/R_1)}$	$E(r) = \frac{q}{2\pi r l \varepsilon_0 \varepsilon}$	
Сферичний конденсатор	$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)^{-1}$	$E(r) = \frac{q}{4\pi r^2 \varepsilon_0 \varepsilon}$	
Сфера	$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon R_1$		

Розглянемо **паралельне з'єднання** конденсаторів (рис. 24). Сукупність конденсаторів, з'єднаних між собою, має назву – *батарея конденсаторів*. Для паралельного з'єднання  $N$  конденсаторів напруга на клеммах батареї конденсаторів дорівнює напрузі на кожному конденсаторі.

$$U = U_1 = U_2 = U_3 = \dots = U_N.$$

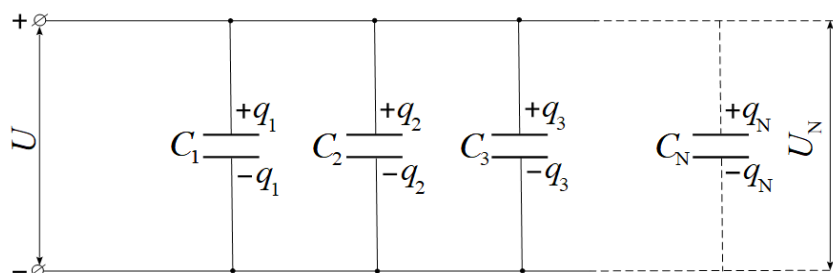


Рис. 24. Паралельне з'єднання конденсаторів

Заряд батареї конденсаторів дорівнює сумі зарядів кожного з конденсаторів:

$$q = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_N,$$

$$\text{де } q = CU, \quad q_1 = C_1 U_1, \quad q_2 = C_2 U_2, \quad q_3 = C_3 U_3, \quad \dots \quad q_N = C_N U_N.$$

$$\begin{aligned} \text{Тоді } CU &= C_1 U_1 + C_2 U_2 + C_3 U_3 + \dots + C_N U_N = C_1 U + C_2 U + C_3 U + \dots + C_N U = \\ &= U(C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_N). \end{aligned}$$

$$\text{Звідки} \quad C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_N.$$

Розглянемо **послідовне з'єднання** конденсаторів (рис. 25).

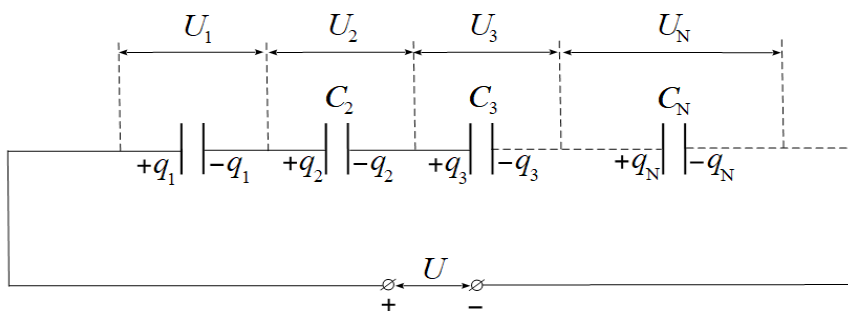


Рис. 25. Послідовне з'єднання конденсаторів

Для послідовного з'єднання конденсаторів прикладена до клем батареї напруга дорівнює сумі напруг на кожному конденсаторі:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_N,$$

$$\text{де} \quad U = \frac{q}{C}, \quad U_1 = \frac{q_1}{C_1}, \quad U_2 = \frac{q_2}{C_2}, \quad U_3 = \frac{q_3}{C_3}, \quad \dots \quad U_N = \frac{q_N}{C_N}.$$

Заряд батареї конденсаторів дорівнює заряду кожного конденсатора:

$$q = q_1 = q_2 = q_3 = \dots = q_N.$$

Тоді

$$\frac{q}{C} = \frac{q_1}{C_1} + \frac{q_2}{C_2} + \frac{q_3}{C_3} + \dots + \frac{q_N}{C_N} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3} + \dots + \frac{q}{C_N} = q \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N} \right).$$

Звідки

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N}.$$

Щоб надати заряд провіднику, зовнішнім силам необхідно подолати електростатичне відштовхування між однойменними зарядами. Нехай на провідник із нескінченності послідовно переносяться заряди  $dq$ . Під час накопичення зарядів на провіднику наступному перенесенню на нього заряду  $dq$  буде заважати електростатичне відштовхування з боку зарядів, які вже знаходяться на провіднику. Якщо в деякий момент часу потенціал поверхні провідника  $\varphi$ , то при перенесенні зарядів  $dq$  із нескінченності на провідник елементарна робота зовнішніх сил дорівнює:

$$dA = \varphi dq.$$

Оскільки  $\varphi = \frac{q}{C}$ , то  $dA = \frac{q}{C} dq$ . Тоді повна робота зовнішніх сил під час зміни заряду провідника від 0 до  $q$  дорівнює:

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

За законом збереження енергії робота зовнішніх сил по перенесенню електричних зарядів на провідник йде на збільшення енергії електричного поля навколо цього провідника, тому енергія поля визначається за формулою:

$$A = W_E, \quad W_E = \frac{C \varphi^2}{2},$$

де  $C$  і  $\varphi$  – електроємність і потенціал зарядженого провідника.

Для електричного поля між обкладками конденсатора остання формула набуває вигляду:

$$W_E = \frac{C U^2}{2},$$

де  $U = (\varphi_1 - \varphi_2)$  – різниця потенціалів між обкладками конденсатора.

Для плоского конденсатора  $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A}{d}$ ,  $U = Ed$ , тоді

$$W_E = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon A E^2 d^2}{2 d} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2 V}{2},$$

де  $V = A d$  – об'єм шару діелектрика.

Якщо електричне поле неоднорідне, то його можна розділити на нескінченно малі об'єми  $dV$ , в межах яких поле залишається однорідним. Тоді повна енергія електростатичного поля в об'ємі  $V$  дорівнює:

$$W_E = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} \int dV = \omega_E \int dV,$$

де  $\omega_E = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}$  – об'ємна густина енергії електростатичного поля. Остання формула свідчить про те, що електрична енергія подібно до речовини розподілена в просторі з певною об'ємною густиною.

### Запитання для самоконтролю

1. Що називаються електроємністю провідника?
2. У яких одиницях вимірюється електроємність?
3. Що являє собою конденсатор?
4. Які існують типи конденсаторів?
5. Яке призначення конденсатора?
6. За якою формулою визначається електроємність конденсатора?
7. Як можна змінювати електроємність конденсатора?
8. Як залежить електроємність конденсатора від діелектричної проникності діелектрика?
9. Яка будова плоского циліндричного, сферичного конденсаторів?
10. За якою формулою визначається електроємність плоского конденсатора?
11. За якою формулою визначається електроємність циліндричного конденсатора?
12. За якою формулою визначається електроємність сферичного конденсатора?
13. Чому дорівнює напруга на клеммах батареї паралельно з'єднаних конденсаторів?
14. Чому дорівнює заряд батареї паралельно з'єднаних конденсаторів?
15. За якою формулою визначається електроємність батареї паралельно з'єднаних конденсаторів?
16. Чому дорівнює напруга на клеммах батареї послідовно з'єднаних конденсаторів?
17. Чому дорівнює заряд батареї послідовно з'єднаних конденсаторів?
18. За якою формулою визначається електроємність батареї послідовно з'єднаних конденсаторів?
19. За якою формулою визначається енергія електростатичного поля навколо зарядженого провідника?
20. За якою формулою визначається енергія електростатичного поля між обкладками довільного конденсатора?
21. За якою формулою визначається енергія електростатичного поля між обкладками плоского конденсатора?
22. За якою формулою визначається енергія неоднорідного електростатичного поля в деякому об'ємі?
23. Якою є аналогія між електростатичним полем і речовиною?

## Лекція №6

**Постійний електричний струм**

1. Електричний струм. Основні характеристики електричного струму: сила струму, густина струму. Закон Ома для ділянки кола в інтегральній формі. Електричний опір провідника. Закон Ома в диференціальній формі.

**1. Електричний струм** – це упорядкований рух електричних зарядів. Заряди, які створюють електричний струм, називаються *носіями струму*. Упорядкований рух носіїв струму відносно нерухомого провідного середовища називається *струмом провідності*. У металах електричний струм провідності створюється рухом вільних електронів, в електролітах – рухом позитивних та негативних йонів у протилежних напрямках, в газах – рухом електронів та йонів протилежного знаку (рис. 1).



Рис. 1. Блискавка як приклад електричного струму провідності в повітрі

Якщо рух носіїв струму відбувається разом з провідним середовищем, то такий струм називається *конвекційним*. Прикладами конвекційних струмів є рух заряджених крапель води в атмосфері під дією сили тяжіння; рух заряджених частинок пилу або диму в електричному полі тощо.

Історично склалось так, що за напрям електричного струму умовно прийняли напрям руху позитивно заряджених частинок. Тому в металевому провіднику напрям електричного струму і напрям руху електронів є протилежним.

Для виникнення електричного струму необхідні дві умови: 1) наявність в даному середовищі носіїв струму; 2) наявність в провідному середовищі потенціального електричного поля. Це означає, що між будь-якими точками провідного середовища повинна існувати різниця потенціалів, яку створює спеціальний пристрій – джерело електричного струму або джерело живлення.

Кількісними характеристиками електричного струму є сила струму і густина струму. **Силою струму** називається скалярна фізична величина, яка чисельно дорівнює заряду, що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу. Якщо за нескінченно малий проміжок часу  $dt$  через поперечний переріз провідника проходить нескінченно малий заряд  $dq$ , то сила струму дорівнює:

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

де  $I$  – миттєве значення сили струму. Якщо сила струму та його напрям не змінюються з часом, то такий струм називається *постійним*. Сила постійного струму визначається за формулою:

$$I = \frac{q}{t},$$

де  $q$  – електричний заряд, який проходить через поперечний переріз провідника за час  $t$ . Сила струму вимірюється в *амперах* ( $A$ ) приладами, які називаються амперметрами (рис. 2).



Рис. 2. Амперметр

**Густиною струму** називається векторна фізична величина, яка збігається з напрямом струму і чисельно дорівнює заряду, який проходить за одиницю часу через одиничну площу перерізу провідника:

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

де  $\vec{j}$  – миттєве значення густини струму,  $\vec{n}$  – одиничний вектор, перпендикулярний до площини перерізу провідника й спрямований в бік напрямку струму. Густина струму характеризує розподіл носіїв струму по перерізу провідника і вимірюється в  $A(\text{ампер})/m^2(\text{метр квадратний})$ .

Якщо провідник є однорідним й постійний струм рівномірно розподілений по всьому перерізу, тоді густина струму визначається за формулою:

$$\vec{j} = \frac{I}{S} \vec{n},$$

Для постійного струму  $I = j_1 S_1 = j_2 S_2$ . Звідки

$$\frac{j_1}{j_2} = \frac{S_2}{S_1},$$

тобто густина струму в провіднику, що має неоднакові перерізи, обернено пропорційна площам цих перерізів.

Розглянемо однорідний циліндричний металевий провідник із струмом довжиною  $l$ , площа поперечного перерізу якого  $S$ . Нехай в об'ємі  $V$  цього провідника знаходяться  $N$  носіїв струму. Якщо  $q = Ne$  – макроскопічний заряд в провіднику, що створюється вільними електронами, тоді густина струму дорівнює:

$$j = \frac{q}{S t} = \frac{Ne}{S t} = \frac{n S l e}{S t} = \frac{n l e}{t} = n v e,$$

де  $n = \frac{N}{V} = \frac{N}{S l}$  – концентрація носіїв струму,  $v = \frac{l}{t}$  – середня швидкість руху вільних електронів.

Постійний електричний струм провідності в металевому провіднику створюється напрямленим рухом вільних електронів під дією сили  $\vec{F} = e \vec{E}$ . Це означає, що всередині провідника, по якому проходить струм, існує стаціонарне (незмінне в часі) електричне поле з певною напруженістю  $\vec{E}$ . Таке поле називається *електричним полем постійного струму*. Воно за своїми фізичними властивостями подібне до електростатичного поля нерухомих зарядів.

Якщо струм є постійним, то густина електричних зарядів у будь-якій точці провідника не змінюється з часом, хоч має місце потік зарядів. Тут на місце тих зарядів, що переходять в інше місце, надходять наступні заряди. Отже, в будь-який момент часу в даній точці провідника завжди знаходиться електричний заряд. Таки заряди створюють в провіднику таке ж електричне поле, як створювали б нерухомі заряди тієї ж густини. З цього випливає, що електричне поле постійного струму також є потенціальним. Оскільки поле постійного струму має потенціальний



характер, то існує потенціал окремих точок поля постійного струму, а також різниця потенціалів між ними.

Але між електричним полем постійного струму та електростатичним полем є істотні відмінності. Електричне поле постійного струму існує всередині провідника. Електростатичне поле існує тільки поза провідником, а всередині провідника воно відсутнє. Якщо лінії напруженості електростатичного поля завжди перпендикулярні дотичній до поверхні провідника, то при наявності постійного струму в провіднику його поверхня вже не є екіпотенціальною і лінії напруженості напрямлені під гострим кутом до поверхні провідника в напрямку струму.

Німецький фізик Георг Ом у 1827 р. експериментально довів, що сила струму в провіднику прямо пропорційна різниці потенціалів:

$$I \sim \varphi_1 - \varphi_2, \quad I \sim U, \quad I = G U,$$

де  $U = (\varphi_1 - \varphi_2)$  – електрична напруга,  $G$  – коефіцієнт пропорційності, який залежить від розмірів провідника, матеріалу, з якого він виготовлений, та його фізичного стану. Цей коефіцієнт пропорційності називається *електричною провідністю* провідника.

Величина, яка обернена до електричної провідності, називається **електричним опором** провідника:

$$R = \frac{1}{G}.$$

Одиницею вимірювання електричної провідності є *сіменс* ( $Cm$ ), одиницею вимірювання електричного опору є *ом* ( $Om$ ).

Залежність між струмом і напругою у вигляді

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

називається **законом Ома** для однорідної ділянки кола в **інтегральній формі**. Ділянка кола називається *однорідною*, якщо вона не включає джерела живлення. *Електричним колом* називається сукупність джерела живлення, споживачів електричної енергії, вимірювальних приладів і регулювальних пристроїв та інших елементів, з'єднаних між собою провідниками.

Електричний опір металів пояснюється розсіюванням вільних електронів коливаннями вузлів кристалічної решітки та її дефектами. Він не залежить від сили струму та напруги, а залежить від геометричних розмірів провідника, матеріалу провідника та його фізичного стану. Для однорідних провідників циліндричної форми електричний опір визначається формулою:

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

де  $l$  – довжина провідника,  $S$  – площа поперечного перерізу провідника,  $\rho$  – коефіцієнт пропорційності, який залежить від матеріалу та фізичного стану провідника. Він називається *питомим опором* провідника. Одиницею вимірювання питомого опору є  $\text{Ом} \cdot \text{м}$  ( $\text{ом} \times \text{метр}$ ). Питомий опір чисельно дорівнює опору циліндричного провідника одиничної довжини з одиничною площею перерізу.

Електричний опір металевго провідника із збільшенням температури зростає згідно залежності:

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

де  $R$  – опір провідника при даній температурі  $t$ ,  $R_0$  – опір провідника при температурі  $t = 0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору,  $t$  – температура за шкалою Цельсія. Така залежність пояснюється зростанням амплітуди коливань вузлів кристалічної решітки під час нагрівання провідника.

Розглянемо ділянку металевго провідника циліндричної форми довжиною  $dl$ , до якої прикладена напруга  $dU$  (рис. 3).

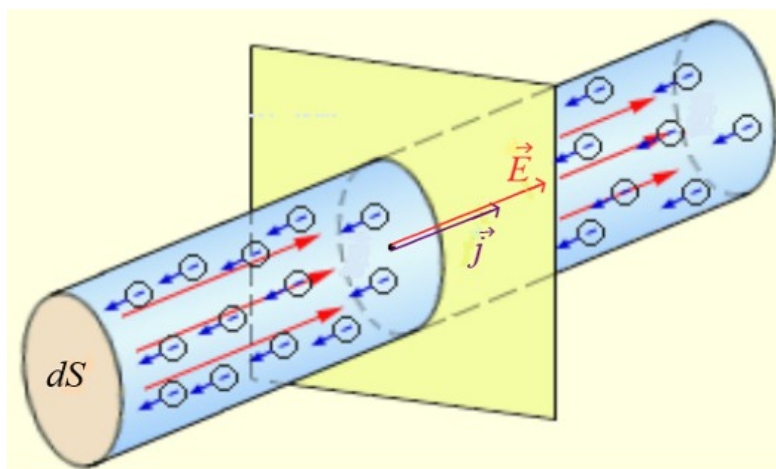


Рис. 3. Ділянка провідника із струмом

Якщо площа поперечного перерізу провідника  $dS$  і густина струму  $j$ , то сила струму дорівнює:

$$dI = j dS.$$

Враховуючи, що  $dU = E dl$ ,  $R = \rho \frac{dl}{dS}$ , то закон Ома для ділянки кола має вигляд:

$$dI = \frac{dU}{R}, \quad j dS = \frac{E dl dS}{\rho dl}, \quad j = \frac{E}{\rho} = \sigma E,$$

де  $\sigma = \frac{1}{\rho}$  – питома електропровідність. Одиницею вимірювання питомої електропровідності є  $(\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ .

*Питома електропровідність* – це скалярна фізична величина, яка чисельно дорівнює електричній провідності однорідного циліндричного провідника одиничної довжини з одиничною площею поперечного перерізу:

$$\sigma = G \frac{l}{S}.$$

В однорідному провіднику упорядкований рух позитивних носіїв струму відбувається в напрямку вектора напруженості поля  $\vec{E}$ , тому напрямки векторів  $\vec{j}$  і  $\vec{E}$  збігаються. Остаточно у векторній формі маємо рівняння, яке називається **законом Ома в диференціальній формі**:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E},$$

де  $j = \frac{dI}{dS}$ . Цей закон встановлює зв'язок густини струму  $\vec{j}$  в довільній точці провідника з властивостями цього провідника ( $\sigma$ ), а також з електричним полем постійного струму ( $\vec{E}$ ) всередині провідника.

### Запитання для самоконтролю

1. Що називається електричним струмом?
2. Що являють собою носії струму?
3. Що означає поняття струму провідності? Навести приклади.
4. Що означає поняття конвекційного струму? Навести приклади.
5. Як визначається напрям електричного струму?
6. Якими є умови виникнення електричного струму?
7. Якими величинами характеризується електричний струм?
8. Що називається силою струму?
9. Чому дорівнює миттєве значення сили електричного струму?
10. Який електричний струм називається постійним?
11. За якою формулою визначається сила постійного струму?
12. В яких одиницях вимірюється сила струму?
13. Що називається густиною струму?
14. Чому дорівнює миттєве значення густини струму?
15. Що саме характеризує густина струму?
16. В яких одиницях вимірюється густина струму?
17. За якою формулою визначається густина постійного струму?
18. Як залежить густина струму від площі перерізу провідника?

19. Як зв'язана густина струму з середньою швидкістю руху вільних електронів у металевому провіднику?
20. Якою є природа електричного поля постійного струму?
21. У чому проявляється подібність між електричним полем постійного струму та електростатичним полем?
22. Чим відрізняється електричне поле постійного струму від електростатичного поля?
23. Що означає поняття електричної напруги?
24. Як зв'язані між собою сила струму та напруга?
25. Що являє собою електрична провідність провідника?
26. В яких одиницях вимірюється електрична провідність провідника?
27. Що називається електричним опором провідника?
28. В яких одиницях вимірюється електричний опір провідника?
29. Як залежить опір провідника від температури?
30. Чим пояснюється температурна залежність електричного опору провідника?
31. Що називається електричним колом?
32. Яка ділянка кола називається однорідною?
33. Сформулювати закон Ома для однорідної ділянки кола в інтегральній формі?
34. Чим пояснюється наявність електричного опору металевому провіднику електричному струму?
35. Що впливає на електричний опір металевому провідника?
36. За якою формулою визначається електричний опір однорідних провідників циліндричної форми?
37. Що являє собою питомий опір провідника?
38. Що впливає на питомий опір провідника?
39. В яких одиницях вимірюється питомий опір провідника?
40. Що являє собою питома електропровідність провідника?
41. В яких одиницях вимірюється питома електропровідність провідника?
42. Записати формулу закону Ома в диференціальній формі?
43. Який зв'язок встановлює закон Ома в диференціальній формі?

## Лекція №7

## Постійний електричний струм

2. Сторонні сили. Джерело електричного струму. Гальванічний елемент. Електрорушійна сила. Закон Ома для неоднорідної ділянки й повного кола. Правила Кірхгофа для розгалуженого кола.

2. Розглянемо провідник  $AB$  довжиною  $l$ , на кінцях якого виникла різниця потенціалів  $(\varphi_1 - \varphi_2)$ ,  $\varphi_1 > \varphi_2$  (рис. 4, а). Це означає, що в провіднику з'явиться короткочасний електричний струм. Він існуватиме доти, доки не зрівняються потенціали точок  $A$  і  $B$ .

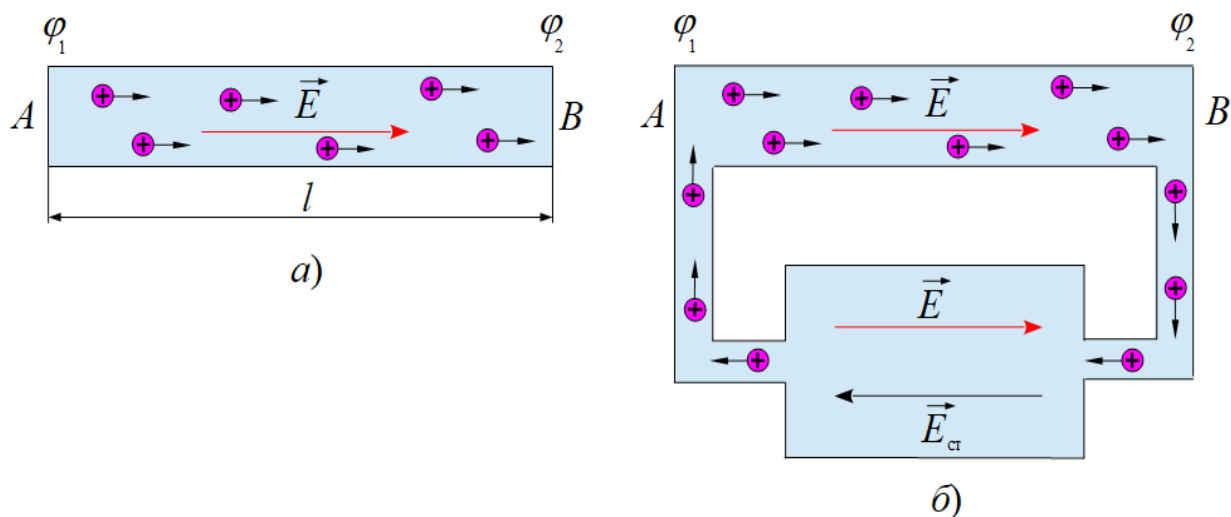


Рис. 4. Схема перетворення короткочасного струму на постійний струм

Щоб одержати в провіднику постійний струм, необхідно створити незмінну різницю потенціалів. Для цього треба забезпечити колоподібний рух носіїв струму від точки  $B$  до точки  $A$  по окремому провіднику.

Якщо на ділянці  $AB$  переміщення носіїв струму здійснюється за рахунок сил електричного поля постійного струму  $\vec{F} = q \vec{E}$ , то на ділянці від  $B$  до  $A$  їх потрібно вже переміщувати проти напрямку електричного поля струму (рис. 4, б). Переміщення носіїв струму на цій ділянці здійснюється силами не електростатичного походження, які називаються **сторонніми силами**  $\vec{F}_{ст} = q \vec{E}_{ст}$ . де  $\vec{E}_{ст}$  – напруженість поля сторонніх сил.

Отже, в електричному колі повинно існувати джерело сторонніх сил, якому необхідно забезпечувати колоподібний рух носіїв струму. Сторонні сили

виникають усередині такого джерела в процесах перетворення енергії інших видів на електричну енергію. Наприклад, механічної на гідроелектростанціях, внутрішньої на теплових електростанціях, хімічної в гальванічних елементах, енергії світла в сонячних батареях, внутрішньоатомної та внутрішньоядерної на атомних електростанціях.

Пристрій, в якому відбуваються процеси перетворення інших видів енергії на електричну називається **джерелом електричного струму** або **джерелом живлення**. Розглянемо схему найпростішого джерела електричного струму (рис. 5).

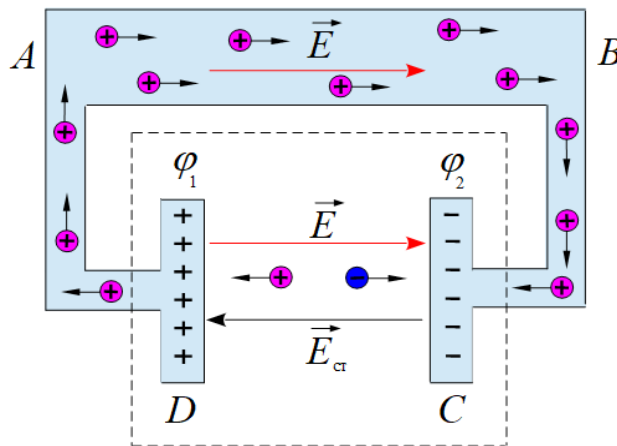


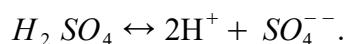
Рис. 5. Схема найпростішого джерела електричного струму

Між електродами  $C$  і  $D$  знаходиться нейтральне середовище з однаковою кількістю позитивних і негативних зарядів. Сторонні сили переміщують позитивні заряди до електрода  $D$ , негативні заряди – до електрода  $C$ . При цьому електрод  $D$  набуває позитивного заряду, а електрод  $C$  – негативного заряду. Виникає різниця потенціалів  $(\varphi_1 - \varphi_2)$ ,  $\varphi_1 > \varphi_2$ , яка весь час підтримується сторонніми силами незмінною, й в зовнішньому колі від електрода  $D$  до електрода  $C$  проходить електричний струм.

Таким чином, сторонні сили розділяють електричні заряди між електродами, рухаючи їх проти електростатичного поля з напруженістю  $\vec{E}$ , яке також існує між електродами  $C$  і  $D$  джерела живлення.

Як приклад, розглянемо принцип дії **гальванічного елемента**. Він складається з цинкової та мідної пластини, що занурені у водний розчин сірчаної кислоти (рис. 6).

Під час взаємодії з водним розчином сірчаної кислоти цинк розчиняється, тобто позитивні йони цинка  $Zn^{++}$  переходять у розчин. У середині пластинки залишаються зайві електрони, тому вона набуває негативного заряду. В електроліті весь час відбувається явище електролітичної дисоціації:



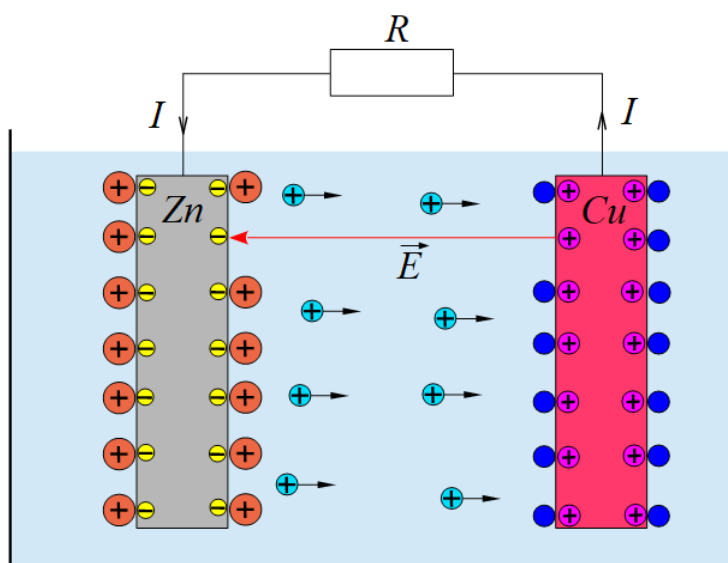


Рис. 6. Схема гальванічного елемента

Позитивні йони гідрогену  $H^+$  відштовхуються позитивними йонами цинку  $Zn^{++}$  до мідної пластини. Вільні електрони міді відновлюють йони гідрогену до нейтральних молекул водню, які утворюють газ  $H_2$ . Втрачаючи електрони, мідна пластина набуває позитивного заряду. Якщо з'єднати обидві пластини через резистор з електричним опором  $R$ , то по замкненому колу проходитиме електричний струм.

Таким чином, під час хімічних процесів, що відбуваються між електролітом і металевими пластинами, виникають сторонні сили, які підтримують незмінною різницю потенціалів на електродах гальванічного елемента.

Явище виникнення електричного струму під час контакту різних металів було відкрите італійським фізіологом Луїджі Гальвані у 1786 р. Він побачив скорочення м'язів лапок жаби, закріплених на мідних гачках, в момент дотику сталевим скальпелем. Спостереження були пояснені як прояв “тваринної електрики”.

Перевіряючи гіпотезу Гальвані, італійський фізик Алессандро Вольта прийшов до висновку, що причиною скорочення м'язів лапок жаби є не “тваринна електрика”, а наявність електричного струму в замкненому колі, яке складається з різних металів, занурених в електроліт. Про своє відкриття він публічно повідомив у 1800 р. на засіданні Лондонського королівського товариства й запропонував перше джерело постійного струму, яке одержало назву “вольтів стовп” (рис. 7). Історично склалось так, що елементи вольтового стовпа, які являють собою цинкову та мідну пластинки, що розділені просоченою електролітом тканиною, називаються гальванічними елементами. На рис. 8 показана схема вольтового стовпа.



Рис. 7. Вольтів стовп



Рис. 8. Схема вольтового стовпа

Принцип дії гальванічних елементів використовують в електрохімічних батареях (рис. 9) і акумуляторах (рис. 10). Акумулятори відрізняються від електрохімічних батарей зворотністю хімічних реакцій, що забезпечує їх багаторазове використання для накопичення електричної енергії та автономного електроживлення різноманітних електротехнічних пристроїв.



Рис. 9. Електрохімічна батарея



Рис. 10. Акумулятори

Працездатність акумуляторів відновлюється пропусканням електричного струму від зарядного пристрою в зворотному напрямку відносно до напрямку



струму під час розряду. При цьому на катоді (мінус) реакція окислення замінюється реакцією відновлення, а на аноді (плюс) реакція відновлення замінюється реакцією окислення.

Основною характеристикою акумуляторів є їх ємність, яка визначається як максимальний заряд, що віддається повністю зарядженим акумулятором під час розряду. Ємність акумулятора визначається в *кулонах* ( $Кл$ ) або позасистемних одиницях – *ампер-годинах* ( $A \cdot год, Ah$ ) або *міліампер-годинах* ( $mA \cdot год, mAh$ ).

$1 A \cdot год = 3600 Кл$ .  $1 A \cdot год$  – це електричний заряд, який проходить через поперечний переріз провідника або прилад протягом  $1 години$  з незмінною силою постійного струму  $1A$ .

На носії струму, які рухаються всередині провідного середовища (рис. 4, б), діють як сили електричного поля постійного струму  $\vec{F} = q \vec{E}$ , так й сторонні сили  $\vec{F}_{CT} = q \vec{E}_{CT}$ . Знайдемо елементарну роботу цих сил на ділянці  $dl$ :

$$dA = F dl + F_{CT} dl = qE dl + qE_{CT} dl.$$

Тоді повна робота цих сил по замкненому колу дорівнюватиме:

$$A = \oint qE dl + \oint qE_{CT} dl = \oint qE_{CT} dl,$$

тому що  $\oint qE dl = 0$ , оскільки в потенціальному полі робота сил по замкненій траєкторії завжди дорівнює нулю.

Скалярна фізична величина, що чисельно дорівнює роботі сторонніх сил по переміщенню позитивних носіїв струму з сумарним одиничним зарядом по замкненому колу, називається **електрорушійною силою**:

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q} = \oint E_{CT} dl.$$

Електрорушійна сила є *енергетичною характеристикою* джерела живлення, тому що вона є кількісною мірою дії сторонніх сил. Електрорушійна сила вимірюється у *вольтах* ( $B$ ).

Для виготовлення джерел постійного струму також використовують джерела змінного струму (генератор, електрична мережа з напругою  $220 B$ ) з метою перетворення змінного струму на постійний. Для цього застосовують *випрямний міст*, основою якого є напівпровідникові діоди (рис. 11).

На вхід випрямного мосту подається змінна напруга. З виходу випрямного мосту одержують пульсуючу напругу. Для перетворення пульсуючої напруги на постійну використовують електролітичний конденсатор. Якщо до клем “плюс” і “мінус” приєднати резистор, тоді через нього проходитиме постійний струм. Зовнішній вигляд таких джерел постійного струму показаний на рис. 12.

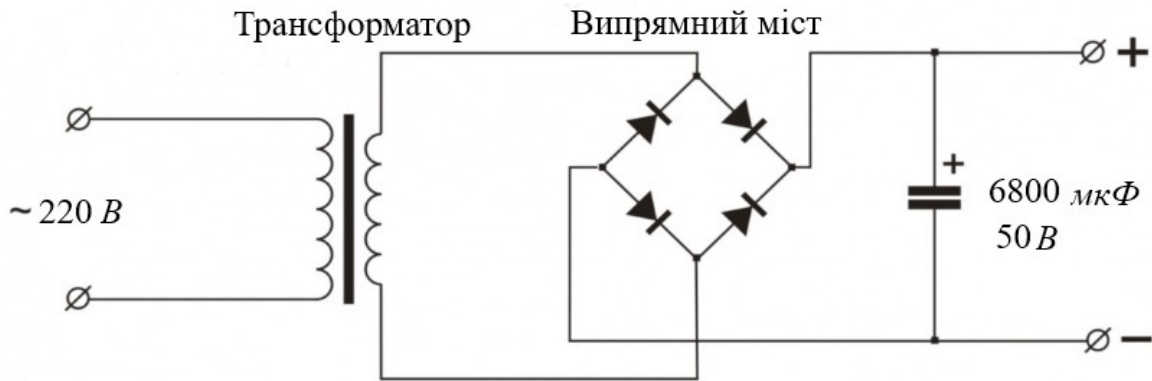


Рис. 11. Схема джерела постійного струму



Рис. 12. Джерело постійного струму

Розглянемо *однорідну* ділянку кола з електричним опором  $R_{12}$ , на кінцях якої створена різниця потенціалів  $(\varphi_1 - \varphi_2)$ ,  $\varphi_1 > \varphi_2$  (рис. 13). Закон Ома для цієї ділянки має вигляд:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_{12}} = \frac{U_{12}}{R_{12}},$$

де  $U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2)$  – електрична напруга, яка чисельно дорівнює роботі сил електричного поля постійного струму по переміщенню одиничного позитивного заряду від точки поля з потенціалом  $\varphi_1$  до точки поля з потенціалом  $\varphi_2$ .

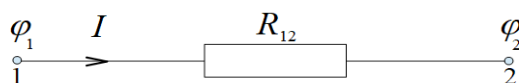


Рис. 13. Однорідна ділянка кола

Ділянка кола вважається *неоднорідною*, якщо вона вміщує джерело постійного струму з власним внутрішнім опором  $r$  (рис. 14). Закон Ома для неоднорідної ділянки має вигляд:

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}}{R_{12} + r}$$

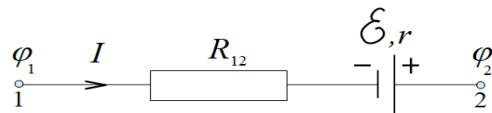


Рис. 14. Неоднорідна ділянка кола

Робота по переміщенню електричних зарядів від точки поля з потенціалом  $\varphi_1$  до точки поля з потенціалом  $\varphi_2$  неоднорідної ділянки кола виконується як силами електричного поля постійного струму, так й сторонніми силами.

Якщо точки 1 і 2 неоднорідної ділянки кола з'єднати, тоді вона перетворюється на замкнене повне коло (рис. 15). При цьому  $\varphi_1 = \varphi_2$ ,  $R_{12} = R$ , де  $R$  – електричний опір зовнішньої ділянки повного кола.

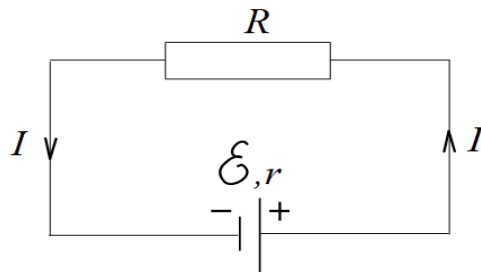


Рис. 15. Повне електричне коло

Робота по переміщенню електричних зарядів по замкненому колу виконується тільки сторонніми силами. **Закон Ома для повного кола** має вигляд:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

*Формулювання закону Ома для повного кола:* сила струму в повному колі прямо пропорційна електрорушійній силі джерела живлення й обернено пропорційна повному електричному опору кола. Внутрішній опір  $r$  джерела живлення вважається внутрішньою ділянкою повного кола. Опір внутрішньої та зовнішньої ділянок складають *повний* опір кола.

Електричні кола поділяються на прості (рис. 15) та розгалужені (рис. 11, 16). *Розгалуженими* називаються електричні кола, що мають вузли. *Вузлами* називаються точки кола, в яких сходяться три і більше провідників. Для розрахунку простого кола достатньо використати закони Ома для ділянки та повного кола. Для розрахунку розгалуженого кола крім законів Ома слід ще застосовувати правила Кірхгофа.

*Перше правило Кірхгофа* стосується вузлів розгалуженого кола. Струми, які проходять по провідниках до вузлів вважаються додатними. Струми, які виходять з вузлів, вважаються від'ємними. Перше правило Кірхгофа є наслідком закону збереження електричного заряду й *формулюється* так: алгебраїчна сума струмів, що сходяться у вузлі, дорівнює нулю:

$$\sum_{i=1}^N I_i = 0.$$

Розглянемо схему містка Уїтстона, який використовують для визначення електричного опору резисторів (рис. 16).

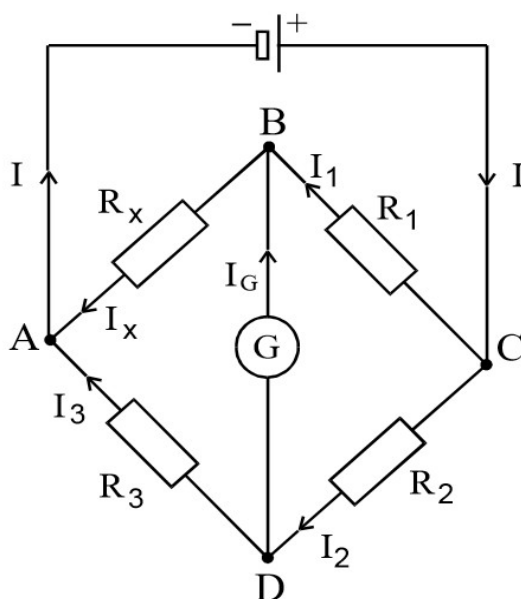


Рис. 16. Схема містка Уїтстона

Точки  $A, B, C, D$  є вузлами цієї схеми. Наприклад, перше правило Кірхгофа для вузла  $B$  має вигляд:

$$I_1 + I_G - I_x = 0.$$

*Друге правило Кірхгофа* стосується простих контурів, які є частиною розгалуженого кола й *формулюється* так: алгебраїчна сума добутків сил струмів

на опори відповідних ділянок простого контура дорівнює алгебраїчній сумі електрорушійних сил, що діють у цьому контурі:

$$\sum_{i=1}^N I_i R_i = \sum_{k=1}^M \mathcal{E}_k.$$

Для застосування другого правила Кірхгофа, по-перше, треба виділити простий контур у розгалуженому колі; по-друге, треба обрати напрям обходу цього контура, який може бути як за ходом годинникової стрілки так й проти її ходу. Струм, що проходить ділянкою контура, вважається додатним, коли його напрям збігається з напрямом обходу контура. Якщо напрям струму протилежний напрямку обходу контура, струм вважається від'ємним. Електрорушійні сили вважаються додатними, коли в напрямку обходу контура вони зорієнтовані від негативного полюса до позитивного полюса.

Наприклад, на схемі містка Уїтстона обираємо простий контур  $BADB$  (обхід проти ходу годинникової стрілки). Тоді  $I_G > 0$ ,  $I_X > 0$ ,  $I_3 < 0$ . Друге правило Кірхгофа для цього контура має вигляд:

$$I_X R_X + I_G R_G - I_3 R_3 = 0,$$

де  $R_G$  – власний електричний опір гальванометра (прилад для вимірювання сили дуже малих струмів). Рівність нулю правої частини рівняння означає відсутність в даному простому контурі  $BADB$  джерела живлення.

### Запитання для самоконтролю

1. За якої умови в замкненому електричному колі підтримується постійний струм?
2. Що являють собою сторонні сили?
3. Якою є природа сторонніх сил?
4. Що називається джерелом живлення?
5. Якою є будова джерела живлення?
6. Яку роль виконують сторонні сили всередині джерела живлення?
7. Яка будова гальванічного елемента?
8. Яким є принцип дії гальванічного елемента?
9. Що являє собою вольтів стовп?
10. Чим відрізняються електрохімічні батареї від акумуляторів?
11. Що означає поняття про ємність акумулятора?
12. В яких одиницях вимірюється ємність акумулятора?
13. Що називається електрорушійною силою?
14. У яких одиницях вимірюється електрорушійна сила?
15. Чому електрорушійна сила є енергетичною характеристикою джерела живлення?
16. Яку роль виконує випрямний міст?
17. Яка будова та принцип дії випрямного мосту?
18. Чому чисельно дорівнює електрична напруга, яка прикладена до однорідної ділянки кола?
19. Записати закон Ома для однорідної ділянки електричного кола.
20. Яка ділянка електричного кола вважається неоднорідною?
21. Записати закон Ома для неоднорідної ділянки електричного кола.
22. Які сили виконують роботу по переміщенню електричних зарядів всередині неоднорідної ділянки кола?
23. Сформулювати та записати закон Ома для повного кола.
24. Які сили виконують роботу по переміщенню електричних зарядів всередині повного кола?
25. Що являють собою зовнішня та внутрішня ділянки повного кола?
26. Чим відрізняються прості електричні кола від розгалужених?
27. Що є ознакою розгалуженого електричного кола?
28. Що називається вузлом розгалуженого кола?
29. Сформулювати та записати перше правило Кірхгофа.
30. Сформулювати та записати друге правило Кірхгофа.
31. Як застосовувати друге правило Кірхгофа?

## Лекція №8

**Магнітне поле постійного електричного струму**

1. Магнітне поле як форма існування матерії. Досліди Ерстеда. Дія магнітного поля на провідник із струмом. Закон Ампера. Характеристики магнітного поля. Лінії магнітної індукції.
2. Сила Ампера. Робота сили Ампера по переміщенню провідника із струмом у магнітному полі. Магнітний потік.
3. Закон Біа-Савара-Лапласа та його застосування для розрахунку найпростіших магнітних полів.

**1.** В електростатиці нерухомі точкові електричні заряди взаємодіють між собою через електростатичне поле, яке існує навколо цих зарядів. Ця взаємодія підпорядковується закону Кулона. Під час руху електричні заряди також взаємодіють між собою, але ця взаємодія вже не підпорядковується закону Кулона, тому що навколо рухомих зарядів крім електричного виникає ще магнітне поле. Отже, рухомі заряди взаємодіють між собою як через електричне поле, так й через магнітне поле.

**Магнітне поле** – це форма існування матерії. Електричне і магнітне поле є окремими проявами більш загального електромагнітного поля, між якими нема повної симетрії. Так, джерелом електричного поля є електричні заряди. Аналогічних магнітних зарядів у природі не виявлено. Джерелом магнітного поля є рухомі електричні заряди та змінні електричні поля.

Електричний струм – це напрямлений рух електричних зарядів, тому навколо провідника із струмом завжди існує магнітне поле. Це означає, що всередині провідника із постійним струмом та в оточувальному його середовищі існує як електричне поле постійного струму, так й магнітне поле, які є стаціонарними, тобто вони не залежать від часу.

Якщо для вивчення електростатичних полів використовуються пробні заряди, то для вивчення магнітних полів використовуються елементи струму. *Елементом струму* називається частина прямолінійного провідника із струмом, довжина якого значно менша ніж відстань до точки простору, де досліджуються магнітні властивості струму. Кількісно він описується добутком  $I \vec{dl}$ , де  $I$  – сила струму,  $\vec{dl}$  – вектор елемента довжини провідника, напрям якого збігається з напрямом струму.

У 1820 р. данський фізик Ерстед вперше помітив, що магнітна стрілка, яка розміщена поблизу провідника із струмом, відхиляється від початкового напрямку й намагається розташуватися перпендикулярно до цього провідника. Під час своїх спостережень Ерстед зробив декілька фундаментальних відкриттів: по-перше, електричний струм створює навколо провідника магнітне

поле, тому що на магнітну стрілку може впливати тільки магнітне поле; по-друге, магнітне поле в різних точках простору навколо провідника із струмом є неоднаковим й послаблюється з віддаленням від провідника; по-третє, магнітне поле має напрям у просторі, тобто, воно є полем векторним.

Після відкриття Ерстеда почались інтенсивні дослідження магнітних полів струмів. У тому ж 1820 р. французький фізик Ампер встановив закон механічної взаємодії провідників із струмами, які знаходяться на певній відстані один від одного. Два паралельних провідники, по яких проходять струми однакового напрямку, притягуються один до одного. Зміна напрямку одного із струмів приводить до відштовхування провідників. Причиною механічної взаємодії провідників із струмами є взаємодія магнітних полів цих струмів.

Згідно закону Ампера сила взаємодії, яка розраховується на одиницю довжини кожного з паралельних провідників, пропорційна добутку сил струмів у цих провідниках і обернене пропорційна відстані між провідниками:

$$F_l = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2 I_1 \cdot I_2}{r}, \quad (1.1)$$

де  $\frac{\mu_0}{4\pi}$  – коефіцієнт пропорційності,  $\mu_0$  – магнітна стала,  $r$  – відстань між провідниками.

За допомогою закону Ампера встановлюється одиниця вимірювання сили струму – 1 ампер ( $A$ ). Один ампер – це сила такого постійного струму, що проходить по двох паралельних провідниках нескінченної довжини і дуже малого перерізу, віддалених один від одного на відстань 1 м у вакуумі, який викликає між цими провідниками механічну силу  $2 \cdot 10^{-7} \text{ Н}$  на кожен метр довжини.

Якщо  $I_1 = I_2 = 1 \text{ А}$ ,  $F_l = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ ,  $r = 1 \text{ м}$ , тоді згідно закону Ампера:

$$2 \cdot 10^{-7} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2 \cdot 1 \cdot 1}{1}. \text{ Звідки } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н (ньютон)}}{\text{м}^2(\text{метр квадратний})} \text{ або } \frac{\text{Гн(генрі)}}{\text{м(метр)}}.$$

Силовою характеристикою магнітного поля в кожній його точці є магнітна індукція ( $\vec{B}$ ). Індукція магнітного поля – це векторна фізична величина, що чисельно дорівнює силі, з якою магнітне поле діє на одиничний елемент струму за умови взаємної перпендикулярності вектора елемента довжини провідника  $\vec{dl}$  і вектора магнітної індукції  $\vec{B}$ . Модуль вектора магнітної індукції дорівнює:

$$B = \frac{dF}{I dl \sin(\vec{dl} \wedge \vec{B})}. \quad (1.2)$$

Магнітна індукція вимірюється в теслах (Тл).  $1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}}$ .



Допоміжною характеристикою магнітного поля є напруженість магнітного поля ( $\vec{H}$ ). Зв'язок магнітної індукції з напруженістю для вакууму (повітря) визначається формулою:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H},$$

де напруженість магнітного поля вимірюється в одиницях  $\frac{A(\text{ампер})}{m^2(\text{метр квадратний})}$ .

Графічно магнітні поля зображуються лініями магнітної індукції. **Лінії магнітної індукції** – це лінії, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямом вектора магнітної індукції  $\vec{B}$  в цій самій точці. Лінії магнітної індукції завжди замкнені й охоплюють провідник із струмом (рис. 1).

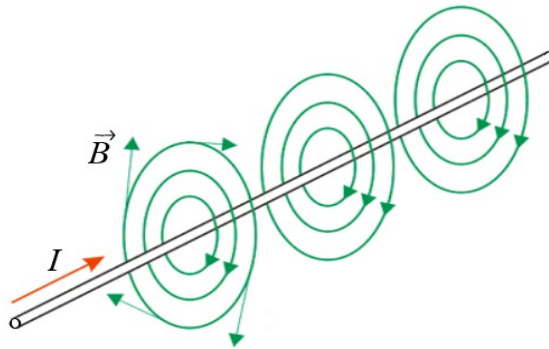


Рис. 1. Ілюстрація ліній магнітної індукції навколо провідника із струмом

За напрям ліній магнітної індукції в даній точці приймається напрям вектора магнітної індукції в цій самій точці (рис. 2).

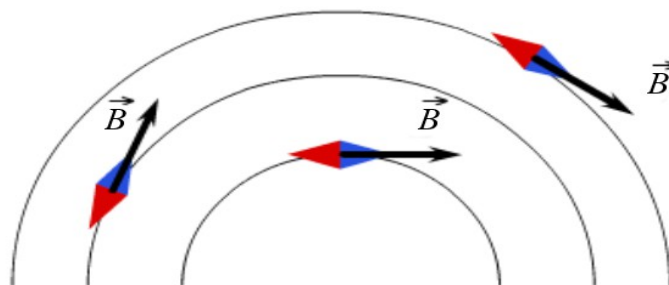


Рис. 2. Ілюстрація до визначення напрямку ліній магнітної індукції

Для визначення напрямку ліній магнітної індукції зручно користуватися *правилом свердлика*: якщо напрям струму в провіднику збігається з напрямом поступального руху свердлика, то напрям ліній магнітної індукції збігається з напрямом обертального руху його рукоятки (рис. 3).

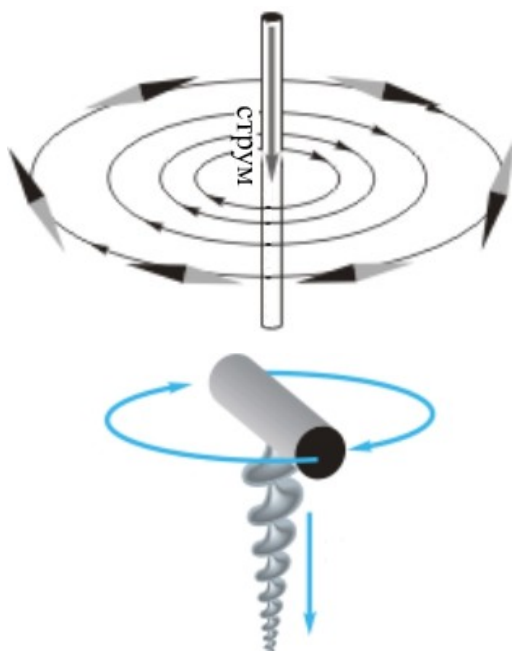


Рис. 3. Визначення напрямку ліній магнітної індукції за правилом свердлика

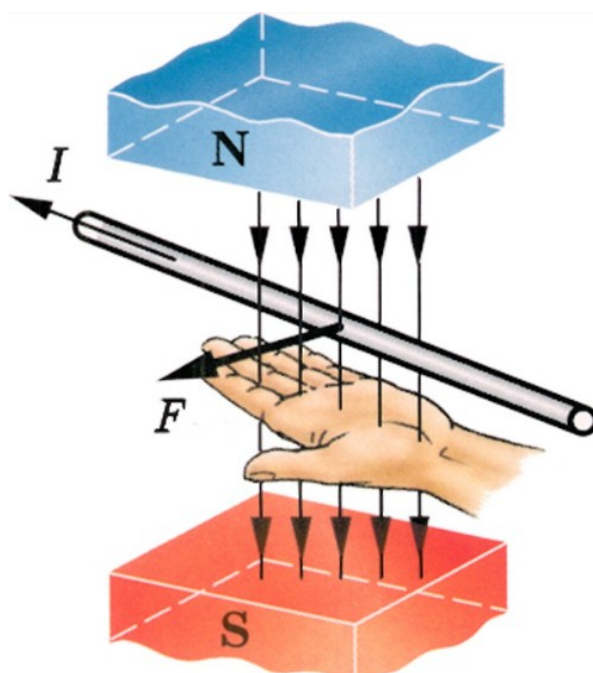


Рис. 4. Визначення напрямку сили Ампера за правилом лівої руки

2. Сила, з якою магнітне поле діє на провідник із струмом, називається **силою Ампера**. З формули (1.2) визначимо силу Ампера, що діє на елемент струму:

$$dF = B I dl \sin(\vec{dl} \wedge \vec{B}), \quad \vec{dF} = I[\vec{dl}, \vec{B}].$$

Напрямок сили Ампера зручно визначати за *правилом лівої руки*: якщо ліву руку розташувати так, щоб лінії індукції магнітного поля входили в долоню, а чотири випрямлені пальці збігалися з напрямком струму, тоді поставлений під прямим кутом великий палець покаже напрям дії сили Ампера (рис. 4).

Розглянемо електричне коло, по якому проходить постійний струм. Нехай це коло знаходиться в зовнішньому однорідному магнітному полі, лінії індукції якого перпендикулярні до площини кола й одна з частин цього кола є рухомим провідником  $MN$  довжиною  $l$  (рис. 5).

Розділимо провідник  $MN$  на елементи струму  $I \vec{dl}$ . Тоді на кожний елемент струму  $I \vec{dl}$  провідника  $MN$  діє сила Ампера  $\vec{dF}$ , напрям якої визначається за правилом лівої руки:

$$dF = B I dl \sin(\vec{dl} \wedge \vec{B}) = I B dl,$$

де  $\sin(\vec{dl} \wedge \vec{B}) = 1$ , оскільки  $\vec{dl} \perp \vec{B}$ . Знаходимо силу Ампера, що діє на провідник  $MN$ :

$$F = \int_0^l dF = I B \int_0^l dl = I B l.$$

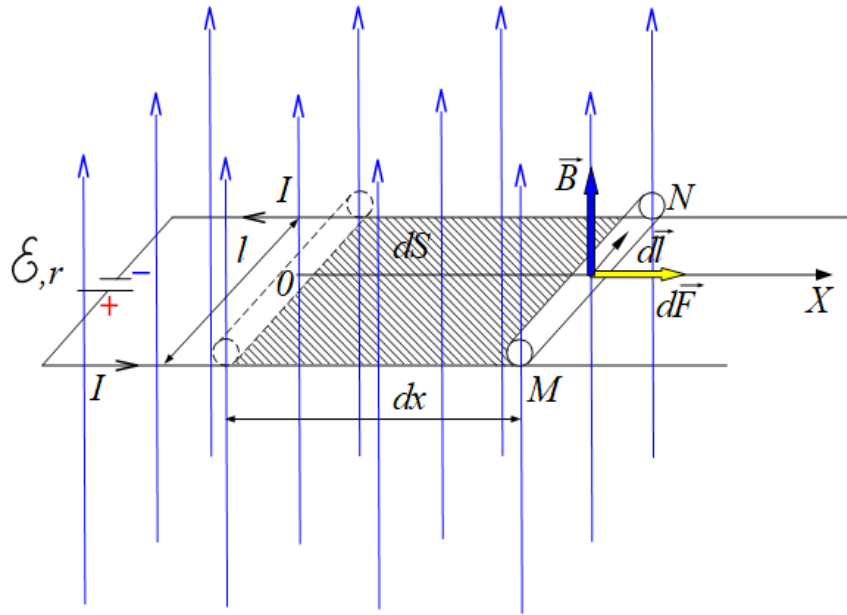


Рис. 5. Схема електричного кола в однорідному магнітному полі

Сила Ампера змушує провідник  $MN$  рухатися вздовж осі  $OX$ , тобто вона виконує роботу. Елементарна робота сили Ампера дорівнює:

$$dA = F dx = I B l dx = I B dS = I d\Phi,$$

де  $dS = l dx$  – зміна площі поверхні, що охоплює коло,  $d\Phi = B dS$  – зміна магнітного потоку через поверхню, що охоплює коло.

Під час переміщення провідника  $MN$  з положення 1 в положення 2 повна робота сили Ампера дорівнює:

$$A_{12} = \int_1^2 dA = \int_1^2 I d\Phi = I \int_1^2 d\Phi = I (\Phi_2 - \Phi_1),$$

де  $\Phi_1, \Phi_2$  – значення магнітного потоку через поверхню, що охоплюється колом, для початкового та кінцевого положення провідника  $MN$ .

З'ясуємо поняття магнітного потоку. Для цього розглянемо зовнішнє однорідне магнітне поле, в якому знаходиться довільна плоска поверхня площею  $S$  (рис. 6). Нехай лінії індукції цього поля перетинають поверхню під деяким кутом  $\alpha$ . Для однорідного магнітного поля магнітний потік через поверхню дорівнює:

$$\Phi = \vec{B} S \vec{n} = B S \cos(\vec{n} \wedge \vec{B}) = B S \cos \alpha = B_n S,$$

де  $B_n = B \cos \alpha$  – проекція вектора індукції на напрям нормалі  $\vec{n}$ .

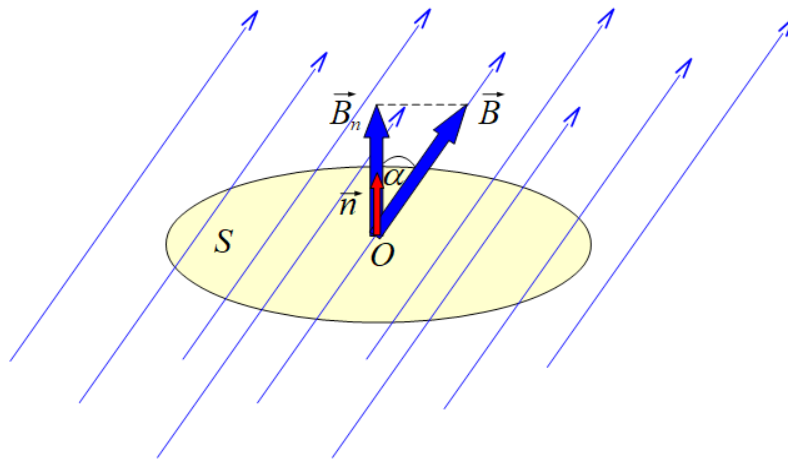


Рис. 6. Довільна поверхня в однорідному магнітному полі

У залежності від кута  $\alpha$  магнітний потік буде додатним ( $\Phi > 0$ ) для  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ , від'ємним ( $\Phi < 0$ ) для  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ , нульовим ( $\Phi = 0$ ) для  $\alpha = 90^\circ$ , максимальним ( $\Phi = \Phi_{max}$ ) для  $\alpha = 0^\circ$ .

Таким чином, **магнітний потік** – це скалярна фізична величина, що чисельно дорівнює кількості ліній магнітної індукції, які пронизують у нормальному напрямі одиничну площу поверхні.

У загальному випадку, коли магнітне поле є неоднорідним і поверхня є неплоскою для визначення магнітного потоку через цю поверхню її розбивають на нескінченно малі елементи поверхні  $dS$ . Тоді можна вважати, що такі елементи поверхні є плоскими, а магнітне поле в межах цих елементів є однорідним. Якщо елементарний магнітний потік через площу  $dS$  дорівнює  $d\Phi = B_n dS$ , то магнітний потік через поверхню  $S$  дорівнює:

$$\Phi = \int B_n dS.$$

Магнітний потік вимірюється у *веберах*:  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ В (вольт)} \cdot 1 \text{ с (секунду)}$ .

**3.** Питання про визначення модуля і напрямку вектора магнітної індукції в будь-якій точці простору біля провідника із струмом експериментально вирішували французькі фізики Біо і Савар у 1820 р. Вони показали, що модуль вектора магнітної індукції пропорційний силі струму, а залежність його від довжини провідника із струмом можна лише встановити для елемента струму  $I \vec{dl}$ . Узагальнення цих даних привели іншого французького фізика Лапласа до встановлення закону:

$$dB = k \frac{I dl \sin(\vec{dl} \wedge \vec{r})}{r^2},$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності, який дорівнює  $k = \frac{\mu_0}{4\pi}$ ,  $r$  – модуль радіус-вектора  $\vec{r}$ , що дорівнює відстані від елемента струму  $I d\vec{l}$  до деякої точки простору  $A$ , в якій визначається елементарна індукція  $d\vec{B}$  (рис. 7).

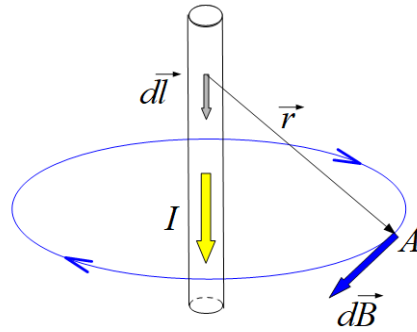


Рис. 7. Ілюстрація до закону Біо-Савара-Лапласа

Цей закон одержав назву закону **Біо-Савара-Лапласа**. Його запис у скалярній та векторній формі має вигляд:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin(\vec{dl} \wedge \vec{r})}{r^2}, \quad \vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I [\vec{dl}, \vec{r}]}{r^3}.$$

Закон Біо-Савара-Лапласа подібно до закону Кулона лежить в основі класичної електродинаміки. Він разом із принципом суперпозиції дає змогу визначати індукцію в будь-якій точці магнітного поля навколо провідника із струмом. За принципом суперпозиції результуюча індукція в довільній точці магнітного поля визначається як векторна сума елементарних індукцій полів, створюваних окремими елементами струму, що належать даному провіднику із струмом:

$$\vec{B} = \int d\vec{B}.$$

Розглянемо приклади.

1. Одержимо формулу для визначення індукції магнітного поля прямого провідника із струмом  $I$  нескінченної довжини в точці  $A$ , розміщеній на відстані  $R$  від провідника (рис. 8).

За законом Біо-Савара-Лапласа знаходимо елементарну індукцію від елемента струму в точці  $A$ :

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin(\vec{dl} \wedge \vec{r})}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \alpha}{r^2}.$$

Як бачимо з рисунку  $r = \frac{R}{\sin \alpha}$ ,  $dl = \frac{r d\alpha}{\sin \alpha} = \frac{R d\alpha}{\sin^2 \alpha}$ .

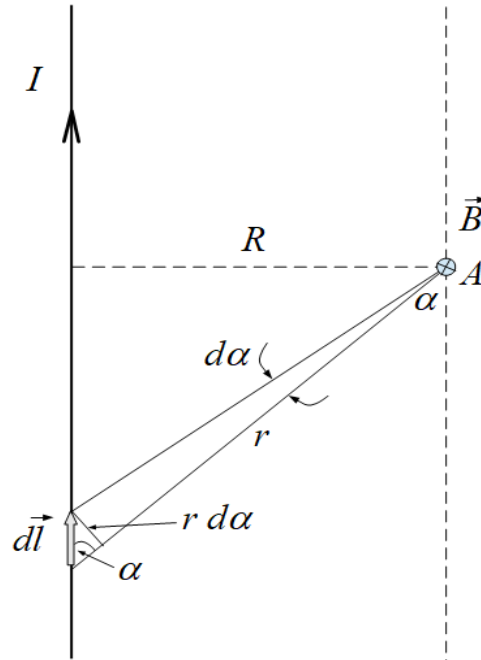


Рис. 8. Ілюстрація до визначення індукції магнітного поля в точці  $A$

Підставляючи величини  $r$  і  $dl$  в закон Біо-Савара-Лапласа, одержимо:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I R \cdot d\alpha \cdot \sin^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{\sin^2 \alpha \cdot R^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R} \sin \alpha \cdot d\alpha.$$

Застосуємо принцип суперпозиції за умови, що кут  $\alpha$  для всіх елементів струму, які належать провіднику, змінюється в межах  $0 \leq \alpha \leq \pi$ :

$$B = \int dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R} \int_0^\pi \sin \alpha \cdot d\alpha = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R} (\cos \pi - \cos 0) = -\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R} (-1 - 1) = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{R}.$$

Отже, індукція магнітного поля, що створюється струмом у нескінченно довгому провіднику, в деякій точці  $A$  від цього провідника визначається за формулою:

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{R},$$

а вектор  $\vec{B}$  в точці  $A$  спрямований перпендикулярно до площини рисунка від спостерігача (правило свердлика).

2. Одержимо формулу для визначення індукція магнітного поля в центрі колового провідника із струмом. Напрямок вектора магнітної індукції  $\vec{B}$  зв'язаний з напрямом струму в провіднику *правилом свердлика*: якщо рукоятку свердлика повертати за напрямом струму, то поступальний рух свердлика покаже напрям вектора магнітної індукції  $\vec{B}$  (рис. 9).

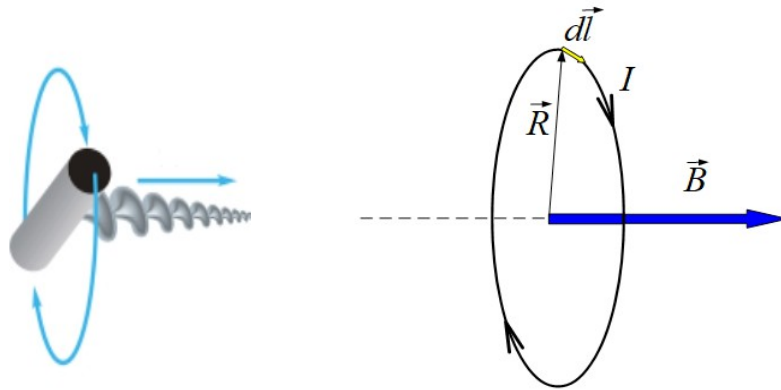


Рис. 9. Визначення напрямку вектора магнітної індукції  $\vec{B}$  в центрі колового провідника із струмом за правилом свердлика

Для колового провідника всі елементи струму перпендикулярні до радіус-вектора  $\vec{R}$ , тому  $\sin(\vec{dl} \wedge \vec{R}) = 1$ . За законом Біо-Савара-Лапласа знаходимо елементарну індукцію від елемента струму:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{R^2}.$$

Застосуємо принцип суперпозиції за умови, що інтегрування відбувається по замкненому контуру:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^2} \oint dl = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^2} \cdot 2\pi R = \frac{\mu_0}{2} \frac{I}{R}.$$

Отже, індукція магнітного поля, що створюється струмом у центрі колового провідника, визначається за формулою:

$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{I}{R},$$

а вектор  $\vec{B}$  спрямований перпендикулярно до площини колового провідника в напрямку, який визначається правилом свердлика.

### Запитання для самоконтролю

1. Що є причиною виникнення магнітного поля?
  2. Чому навколо провідника із струмом існує магнітне поле?
  3. Що означає поняття елемента струму? Яке його призначення?
  4. Як взаємодіють між собою близько розташовані провідники із струмом?
  5. Що є причиною механічної взаємодії близько розташованих провідників із струмом?
  6. Сформулювати закон Ампера.
  7. Яким є визначення одиниці вимірювання сили струму?
  8. Яким є числове значення магнітної сталої?
  9. Дати визначення індукції магнітного поля.
  10. Чому індукція є силовою характеристикою магнітного поля?
  11. В яких одиницях вимірюється індукція магнітного поля?
  12. Яка характеристика магнітного поля є допоміжною?
  13. Як зв'язані між собою основна та допоміжна характеристики магнітного поля?
  14. Що являють собою лінії індукції магнітного поля? Яке їх призначення?
  15. Який вигляд мають лінії індукції магнітного поля?
  16. Який напрям мають лінії магнітної індукції?
  17. Як визначити напрям ліній магнітної індукції за допомогою свердлика?
  18. Яка природа сили Ампера?
  19. Записати формули для визначення сили Ампера, що діють на елемент струму, в скалярній та векторній формах.
  20. Як визначається напрям сили Ампера?
  21. Як визначається елементарна робота сили Ампера під час переміщення провідника в зовнішньому однорідному магнітному полі?
  22. Як визначається повна робота сили Ампера під час переміщення провідника в зовнішньому однорідному магнітному полі?
  23. Дати визначення магнітного потоку.
  24. У яких випадках магнітний потік є додатним, від'ємним, нульовим, максимальним?
  25. Як визначається магнітний потік через поверхню у випадку неоднорідного магнітного поля?
  26. Записати закон Біо-Савара-Лапласа у скалярній та векторній формах.
  27. Як визначається індукція магнітного поля в будь-якій точці простору навколо провідника із струмом?
  28. Як визначається модуль і напрям вектора магнітної індукції в будь-якій точці простору навколо нескінченно довгого прямолінійного провідника із струмом?
- Як визначається модуль і напрям вектора магнітної індукції в центрі колового провідника із струмом?



## Лекція №9

## Електромагнітна індукція

1. Досліди Фарадея. Електрорушійна сила індукції. Правило Ленца. Сила Лоренца. Явище електромагнітної індукції. Закон електромагнітної індукції. Вихрові струми. Скін-ефект.

1. Відкриття Ерстеда, Ампера, Біо, Савара та інших вчених довели існування магнітного поля навколо провідника із струмом. Результати цих досліджень стали основою припущення про те, що електричні та магнітні явища взаємозв'язані. Тобто, якщо навколо провідника із струмом виникає магнітне поле, то можливе й зворотне явище – виникнення електричного струму в замкненому провіднику під дією змінного магнітного поля.

У 1831 р. англійський фізик Фарадей експериментально встановив, що змінні магнітні поля викликають електричний струм у замкненому провіднику. Такий струм було названо *індукційним*.

Розглянемо **досліди Фарадея**. Якщо до провідника у вигляді котушки, що замкнена на гальванометр, наближати або віддаляти постійний магніт, то в такому колі виникає індукційний струм, який виявляється за відхиленням стрілки гальванометра (рис. 1). Ефект зберігається, якщо переміщувати котушку відносно нерухомого магніту.

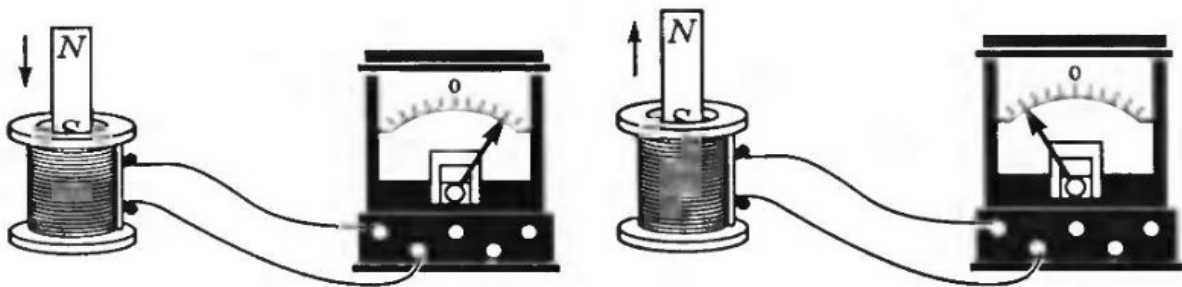


Рис. 1. Ілюстрація дослідів Фарадея

Спільним для всіх дослідів було те, що індукційний струм існував у колі лише під час зміни магнітного потоку через поверхню, яка охоплювалася витками котушки.

Згідно закону Ома електричний струм існує лише тоді, коли в колі діє електрорушійна сила. Англійський фізик Максвелл запропонував гіпотезу про те, що причиною виникнення індукційного струму в дослідах Фарадея є вихрове електричне поле, яке існує скрізь, де є змінне в часі магнітне поле.

*Вихровим* називається таке електричне поле, лінії напруженості якого є замкненими. Кількісною мірою цього поля є електрорушійна сила, яка називається **електрорушійною силою індукції**. Саме вихрове електричне поле спричиняє напрямлений рух електронів у замкненому провіднику або створює різницю потенціалів на кінцях розімкнутого провідника. Провідник тут виконує лише роль індикатора для виявлення вихрового електричного поля. Крім цього вихрове електричне поле може поляризувати діелектрик, спричиняти електричний пробій діелектрика, гальмувати або прискорювати заряджені частинки тощо. Отже, джерелом електричного поля є не тільки електричні заряди, але й змінне магнітне поле.

Напрямок індукційного струму пов'язаний з характером зміни магнітного потоку через поверхню, що охоплюється замкненим провідником. Якщо під час збільшення магнітного потоку через цю поверхню, виникає індукційний струм одного напрямку, то під час зменшення магнітного потоку напрям індукційного струму змінюється на протилежний.

У 1833 р. російський фізик Ленц сформулював закон, відомий як **правило Ленца**, за допомогою якого визначається напрям індукційного струму: індукційний струм завжди напрямлений так, що його власне магнітне поле протидіє зміні магнітного потоку, який викликає цей струм.

Покажемо це на прикладах. Під час наближення постійного магніту північним полюсом до котушки, замкненої на гальванометр, магнітний потік через поверхню, яка обмежена витками котушки, зростає й викликає індукційний струм такого напрямку, що його власне магнітне поле у верхній частині котушки матиме північний полюс. Так магнітне поле індукційного струму протидіє наближенню до котушки постійного магніту або протидіє зростанню магнітного потоку. Якщо спрямувати поступальний рух свердлика в напрямку вектора магнітної індукції  $\vec{B}$  поля індукційного струму всередині котушки, то обертальний рух його рукоятки покаже напрям індукційного струму (рис. 2, а).

Під час віддалення постійного магніту від котушки, до якої магніт зорієнтований північним полюсом, магнітний потік через поверхню витків котушки зменшується й викликає індукційний струм такого напрямку, що його власне магнітне поле у верхній частині котушки матиме південний полюс. Так магнітне поле індукційного струму протидіє віддаленню від котушки постійного магніту або протидіє зменшенню магнітного потоку. Якщо співставити поступальний рух свердлика із напрямом вектора магнітної індукції  $\vec{B}$  поля індукційного струму всередині котушки, то обертальний рух його рукоятки покаже напрям індукційного струму (рис. 2, б).

Індукційний струм у замкненому провіднику може виникнути зовсім з іншої причини, якою є дія *сили Лоренца* на вільні електрони в металевому провіднику, що рухається в зовнішньому магнітному полі.

На провідник із струмом у магнітному полі діє сила Ампера. Але струм являє собою напрямлений рух окремих електричних зарядів. Отже, на

окремий рухомий електричний заряд у магнітному полі також діє сила, яка називається силою Лоренца на честь голландського фізика Гендріка Лоренца.

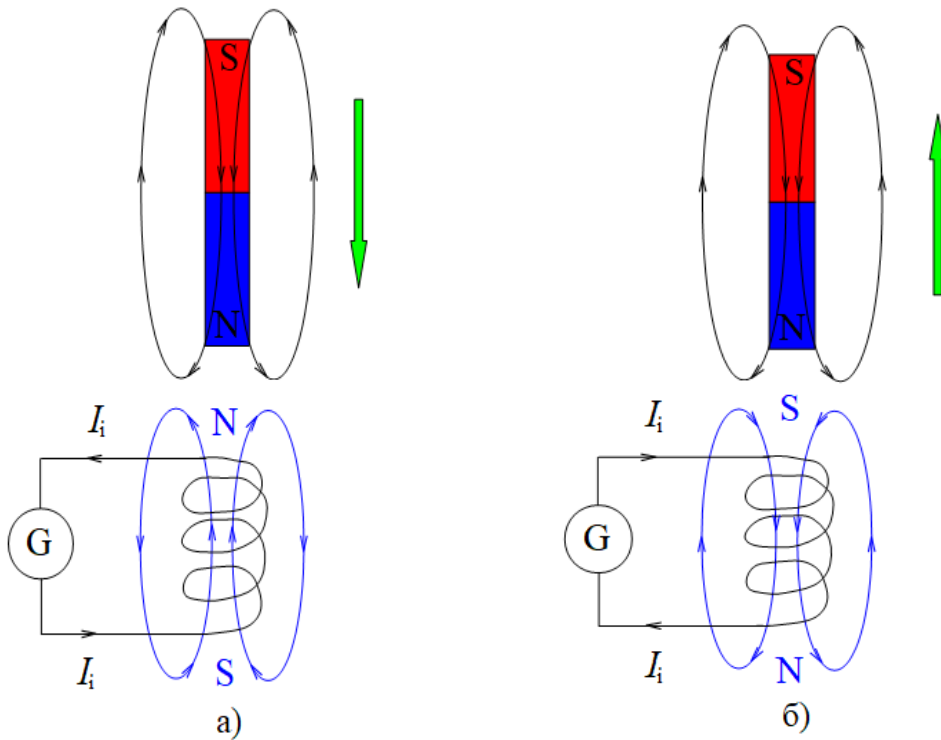


Рис. 2. Ілюстрація до правила Ленца

Сила Лоренца визначається за формулою:

$$F_{\text{Л}} = q v B \sin(\vec{v} \wedge \vec{B}), \quad \vec{F}_{\text{Л}} = q [\vec{v}, \vec{B}],$$

де  $q$  – значення позитивного заряду,  $\vec{v}$  – вектор швидкості цього заряду.

Напрямок сили Лоренца, так само як і напрямок сили Ампера, визначається за правилом *лівої руки*: якщо ліву руку розташувати так, щоб лінії індукції магнітного поля входили в долоню, а чотири випрямлені пальці збігалися з напрямком руху позитивного заряду, тоді поставлений під прямим кутом великий палець покаже напрямок дії сили Лоренца (рис. 3, а). Якщо заряд є негативним, тоді чотири випрямлені пальці слід спрямувати проти напрямку руху цього заряду (рис. 3, б).

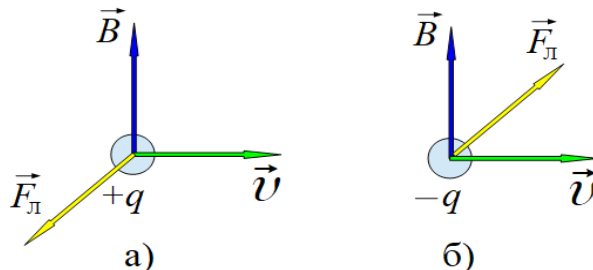


Рис. 3. Визначення напрямку дії сили Лоренца за правилом лівої руки

Оскільки сила Лоренца завжди напрямлена перпендикулярно до вектора швидкості ( $\vec{F}_L \perp \vec{v}$ ), то вона не виконує роботи, не змінює значення швидкості, а змінює тільки напрям руху зарядженої частинки в магнітному полі.

Розглянемо провідний замкнений контур, одна з ділянок якого є рухомим провідником  $MN$  довжиною  $l$  (рис. 4). Нехай цей контур знаходиться в постійному однорідному магнітному полі з індукцією  $\vec{B}$ , яке перпендикулярно до площини контура, а провідник  $MN$  рухається під дією зовнішньої сили  $\vec{F}$  вздовж осі  $OX$  з постійною швидкістю  $\vec{v}$ .

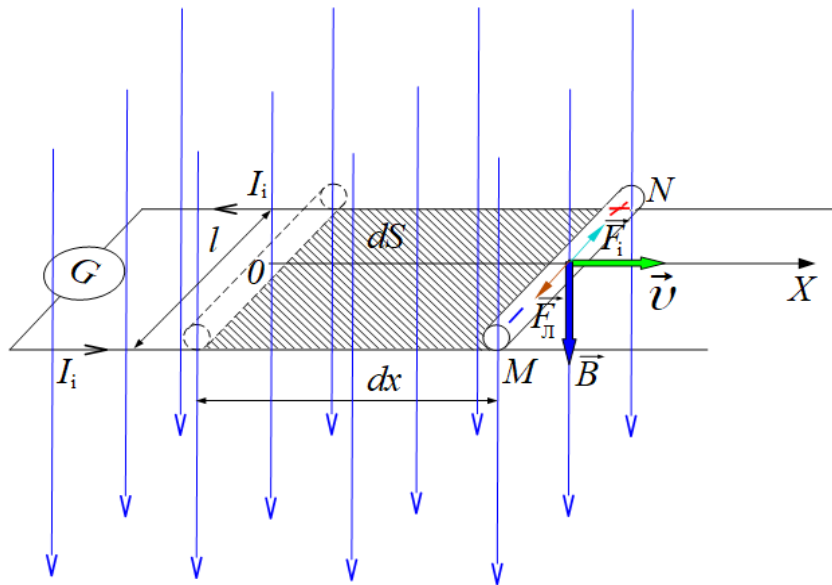


Рис. 4. Замкнений контур в постійному однорідному магнітному полі

Під час руху провідника  $MN$  разом з ним переміщуюються вільні електрони і позитивні йони у вузлах кристалічної решітки. На вільні електрони в магнітному полі діє сила Лоренца, тому вони зміщуються до краю  $M$  рухомого провідника  $MN$ , створюючи на його кінці негативний макроскопічний заряд. На краю  $N$  провідника  $MN$  електронів не вистачатиме, тому він набуває позитивного макроскопічного заряду. Так, всередині провідника  $MN$  виникає *індукційне електричне поле*, яке діє на вільні електрони із силою  $\vec{F}_i$ .

Отже, завдяки діє сили Лоренца на вільні електрони, всередині провідника  $MN$  виникає індукційне електричне поле, кількісною мірою якого є електрорушійна сила індукції. Це означає, що під час руху провідника  $MN$  по замкненому контуру проходить індукційний струм силою  $I_i$ . При цьому сила Лоренца відіграє роль сторонньої сили.

Припустимо тепер, що в розглянутому досліді провідник  $MN$  залишається нерухомим, а відбувається зміна індукції магнітного поля. На вільні електрони у провіднику  $MN$  сила Лоренца вже не діє, однак індукційний струм у замкненому контурі виникає, на що показує відхил стрілки гальванометра  $G$ .

Тобто, змінне магнітне поле викликає такий самий ефект, як й рух провідника в постійному магнітному полі, але фізична природа ефекту інша, вона пов'язана з появою вихрового електричного поля. Якщо одночасно переміщувати провідник  $MN$  і змінювати індукцію магнітного поля, то можна компенсувати індукційне електричне поле всередині цього провідника вихровим електричним полем. При цьому індукційний струм в розглянутому контурі не виникатиме.

Таким чином, **електромагнітна індукція** – це явище виникнення вихрового електричного поля там, де змінюється з часом магнітне поле, а також виникнення в провідному замкненому контурі індукційного електричного поля під час зміни магнітного потоку через поверхню цього контура.

Одержимо математичний вираз закону електромагнітної індукції. Для цього розглянемо рух вільних електронів всередині провідника  $MN$ . Рух цих електронів буде рівномірним за умови компенсації сили індукційного електричного поля  $\vec{F}_i$  силою Лоренца  $\vec{F}_L$ :

$$\vec{F}_i = -\vec{F}_L, \quad F_i = F_L,$$

де  $F_i = e E_i$ ,  $F_L = e v B$ , тому що  $\vec{v} \perp \vec{B}$ ,  $\sin(\vec{v} \wedge \vec{B}) = 1$ .

Напруженість індукційного електричного поля дорівнює:

$$E_i = \frac{\mathcal{E}_i}{l},$$

а швидкість руху вільних електронів можна визначити за формулою:

$$v = \frac{dx}{dt}.$$

Прирівнюємо силу індукційного електричного поля до сили Лоренца:

$$e \frac{\mathcal{E}_i}{l} = e \frac{dx}{dt} B.$$

З цього співвідношення знаходимо електрорушійну силу індукції:

$$\mathcal{E}_i = \frac{l dx \cdot B}{dt} = \frac{B dS}{dt} = \frac{d\Phi}{dt},$$

де  $dS = l dx$  – зміна площі контура,  $d\Phi = B dS$  – зміна магнітного потоку через поверхню контура.

Формула

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

являє собою закон **електромагнітної індукції**: електрорушійна сила індукції чисельно дорівнює і протилежна за знаком швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, обмежену провідним контуром.

Знак “мінус” пов'язаний з напрямом індукційного струму. Якщо магнітний потік зростає ( $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ ), то

$$\mathcal{E}_i < 0$$

і магнітне поле індукційного струму напрямлене назустріч магнітному потоку, який викликає цей індукційний струм. Якщо магнітний потік послаблюється ( $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ ), то

$$\mathcal{E}_i > 0$$

і напрям магнітного поля індукційного струму збігається з напрямом магнітного потоку, який викликає цей індукційний струм.

Закон електромагнітної індукції можна застосовувати як до нерухомих контурів у змінному магнітному полі, так і до контурів, які змінюють свою площу в постійному магнітному полі. Оскільки магнітний потік є функцією двох змінних  $\Phi = f(B, S)$ , то похідна від магнітного потоку за часом у загальному вигляді складається з двох частин, одна з яких обумовлена зміною магнітної індукції з часом, а друга зміною площі контура за часом:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} d\vec{S} = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} - \int \vec{B} \frac{\partial \vec{S}}{\partial t},$$

де  $d\vec{S} = dS \cdot \vec{n}$ ,  $\vec{n}$  – нормаль до поверхні контура.

Таким чином, електрорушійна сила індукції складається з двох доданків, які мають різний фізичний зміст. Так, під час руху провідника  $MN$  електрорушійна сила індукції пов'язана з дією сили Лоренца на вільні електрони провідника, тому перший доданок дорівнює нулю і закон електромагнітної індукції набуває вигляду:

$$\mathcal{E}_i = -\int \vec{B} \frac{\partial \vec{S}}{\partial t}.$$

Коли провідник  $MN$  залишається нерухомим під час зміни індукції магнітного поля, то електрорушійна сила індукції визначатиметься першим доданком:

$$\mathcal{E}_i = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}.$$

Індукційні струми, які виникають у масивних провідниках під впливом змінного магнітного поля називаються *вихровими струмами* або струмами Фуко (перший дослідник цих струмів).

Рух масивних провідників у сильному магнітному полі досить швидко гальмується завдяки взаємодії магнітного поля вихрових струмів із зовнішнім магнітним полем. Гальмівна дія вихрових струмів використовується в конструкціях магнітних демпферів – заспокоювачів рухомих стрілок гальванометрів та інших приладів.

Завдяки малому електричному опору масивних провідників сила вихрових струмів може досягати великих значень, що приводить до сильного нагрівання провідників. Теплова дія вихрових струмів використовується для плавлення металів, нагрівання та поверхневого гартування сталевих виробів. Для зменшення витрат електричної енергії на нагрівання вихровими струмами, наприклад, осердя трансформаторів виготовляють не з суцільного заліза, а з тонких пластин, розташованих перпендикулярно до можливих напрямів вихрових струмів.

У колі змінного струму всередині провідників виникають вихрові струми, які збільшують густину струму біля поверхні і зменшують її біля осі симетрії цих провідників. Таке явище називається **скін-ефектом**.

Розглянемо циліндричний провідник, по якому проходить змінний струм (рис. 5).

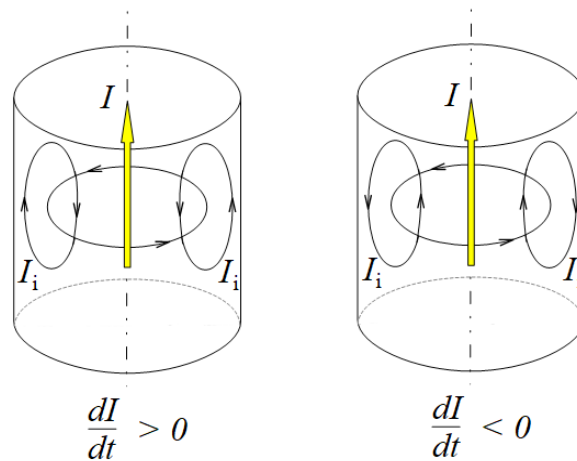


Рис. 5. Схема виникнення скін-ефекту

Всередині провідника і навколо нього виникає магнітне поле, лінії індукції якого є концентричними колами з центром на осі симетрії провідника. При збільшенні сили струму ( $\frac{dI}{dt} > 0$ ) зростає з часом індукція магнітного поля ( $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} > 0$ ). За законом електромагнітної індукції зміна в часі магнітного поля приводить до виникнення вихрового електричного поля,

лінії напруженості якого замкнені і лежать у площині, перпендикулярній до площини ліній індукції магнітного поля. Біля поверхні провідника напрям вихрового струму збігається з напрямом основного струму, а біля осі симетрії провідника ці струми протилежні один одному. Якщо сила струму зменшується ( $\frac{dI}{dt} < 0$ ), то вихрові струми будуть мати протилежний напрям.

В обох випадках вихрові струми напрямлені так, що вони протидіють зміні основного струму всередині провідника і сприяють його зміні поблизу поверхні провідника. Це означає, що для змінного струму електричний опір внутрішньої частини провідника буде більшим, ніж електричний опір зовнішньої його частини. У результаті густина струму біля поверхні провідника збільшується, а вздовж його осі – зменшується. Виникає скін-ефект. Для змінного струму частотою  $\nu = 50 \text{ Гц}$  скін-ефект не має істотного значення, але для струмів частотою  $10^8 - 10^9 \text{ Гц}$  він стає досить помітним.



### Запитання для самоконтролю

1. Як зв'язані між собою магнітні та електричні явища?
2. Який електричний струм називається індукційним?
3. Пояснити досліди Фарадея.
4. За якою умовою в замкненому провіднику в дослідах Фарадея виникає індукційний струм?
5. Що є причиною виникнення індукційного струму в дослідах Фарадея?
6. Яке електричне поле називається вихровим?
7. Яка величина є кількісною мірою вихрового електричного поля?
8. Що є джерелом електричного поля?
9. Від чого залежить напрям індукційного струму?
10. Сформулювати правило Ленца.
11. Як діє правило Ленца під час наближення постійного магніту північним полюсом до котушки, що замкнена на гальванометр?
12. Як діє правило Ленца під час віддалення постійного магніту від котушки, до якої магніт зорієнтований північним полюсом?
13. Пояснити природу сили Лоренца.
14. За якою формулою визначається сила Лоренца?
15. Як визначити напрям сили Лоренца для позитивних і негативних зарядів?
16. Чому сила Лоренца змінює лише напрям руху зарядженої частинки в магнітному полі?
17. За якої умови в замкненому контурі, що знаходиться в постійному магнітному полі, виникає індукційний струм?
18. Якою є причина виникнення індукційного струму в замкненому контурі, що знаходиться в постійному магнітному полі, під час зміни площі його поверхні?
19. Що називається явищем електромагнітної індукції?
20. За якої умови виводиться закон електромагнітної індукції?
21. Записати формулу, що виражає закон електромагнітної індукції.
22. Сформулювати закон електромагнітної індукції.
23. Яку роль виконує знак “мінус” у формулі закону електромагнітної індукції?
24. Який вигляд має закон електромагнітної індукції для нерухомих контурів у змінному магнітному полі?
25. Який вигляд має закон електромагнітної індукції для контурів, які змінюють свою площу в постійному магнітному полі?
26. Що являють собою вихрові струми?
27. Якою є гальмівна дія вихрових струмів?
28. Якою є теплова дія вихрових струмів?
29. Як зменшуються витрати електричної енергії на нагрівання осердя трансформаторів вихровими струмами?
30. Яке явище називається скін-ефектом?
31. Пояснити явище скін-ефекту.

## Лекція №10

## Електромагнітна індукція

2. Самоіндукція. Електрорушійна сила самоіндукції.  
Індуктивність контура. Закон самоіндукції. Енергія магнітного поля.

2. Якщо по замкнутому провіднику проходить постійний струм, то він створює магнітний потік через поверхню, яку охоплює цей провідник (рис. 6). Під час зміни струму в провіднику магнітний потік змінюється, а це означає, що в області простору, де знаходиться провідник, виникає вихрове електричне поле.

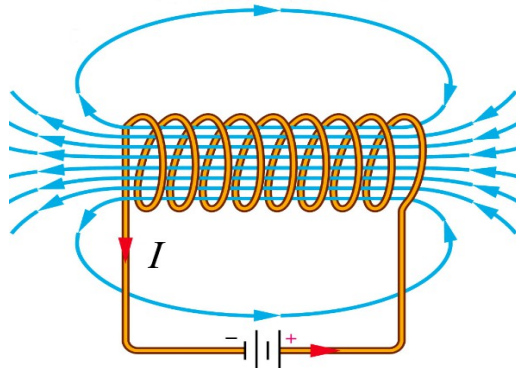


Рис. 6. Ілюстрація магнітного потоку через поверхню, що охоплюються витками котушки

Явище виникнення вихрового електричного поля в провідному контурі під час зміни струму в цьому контурі називається **самоіндукцією**. Кількісною мірою вихрового електричного поля є електрорушійна сила індукції, яка в даному разі називається **електрорушійною силою самоіндукції**.

Розглянемо електричне коло, яке складається з джерела постійного струму, котушки, реостата  $R$ , вимикача  $S$  і з'єднувальних провідників (рис. 7).

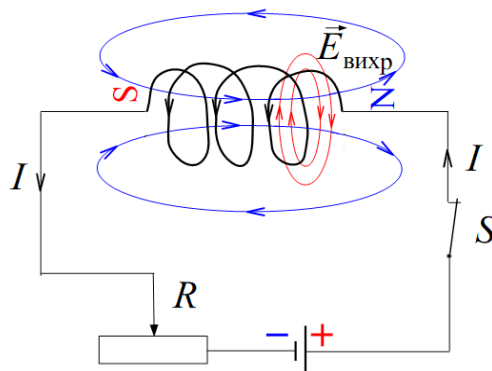


Рис. 7. Схема виникнення вихрового електричного поля у витках котушки під час замикання кола

Під час замикання кола вимикачем  $S$  струм у колі починає зростати від нуля до певного значення  $I_1$  не миттєво, а протягом часу  $t_1$  (рис. 8). Це пояснюється тим, що разом із струмом зростає магнітне поле всередині й навколо котушки, лінії індукції якого пронизують витки котушки. Зростаючий магнітний потік викликає вихрове електричне поле, лінії напруженості якого всередині провідника напрямлені проти ліній напруженості електричного поля струму.

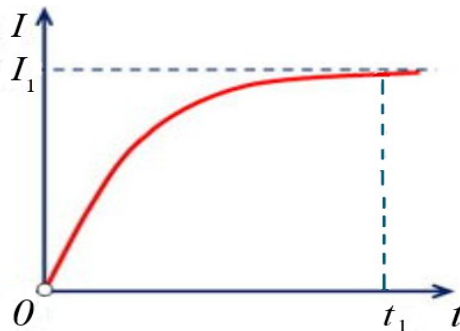


Рис. 8. Залежність сили струму в колі з котушкою від часу під час замикання кола

Модуль вектора напруженості результуючого поля визначатиметься співвідношенням:

$$E = E_I - E_{вихр},$$

де  $E_I$  – напруженість електричного поля струму,  $E_{вихр}$  – напруженість вихрового електричного поля.

Так вихрове електричне поле протидіє зростанню електричного поля струму, внаслідок чого сила струму в колі збільшується від  $0$  до  $I_1$  не миттєво, а протягом часу  $t_1$ . Час  $t_1$  – це час існування в області котушки вихрового електричного поля.

Під час розмикання кола вимикачем  $S$  струм у колі зменшується від певного значення  $I_1$  до нуля не миттєво, а протягом часу  $t_2$  (рис. 9). Разом із струмом зменшується магнітне поле всередині й навколо котушки, а це означає, що в області простору, де знаходиться котушка, виникає вихрове електричне поле, лінії напруженості якого тепер збігаються з лініями напруженості електричного поля струму. Модуль вектора напруженості результуючого поля визначатиметься співвідношенням:

$$E = E_I + E_{вихр}.$$

Так вихрове електричне поле протидіє зменшенню струму в колі, тому він зменшується до нуля не миттєво, а протягом часу  $t_2 = t_1$  після розмикання цього кола.

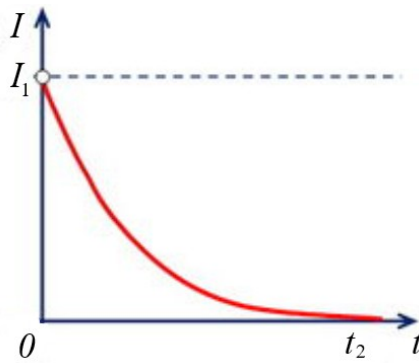


Рис. 9. Залежність сили струму в колі з котушкою від часу під час розмикання кола

Таким чином, явище самоіндукції є окремим випадком загального явища електромагнітної індукції. Воно проявляється в тому, що вихрове електричне поле стримує зростання струму в колі під час його замикання і підтримує струм в колі після його розмикання.

Оскільки час розмикання кола досить малий, то сила струму в момент розмикання може набувати великих значень. Такий струм здатний пошкодити прилади, спричинити потужну іскру на вимикачі  $S$ . Щоб запобігти цій шкідливій дії, струм перед розмиканням кола поступово зменшують до нуля за допомогою реостата  $R$ , а тільки потім розмикають коло.

Магнітний потік пропорційний індукції магнітного поля  $\Phi \sim B$ . За законом Біо-Савара-Лапласа магнітна індукція пропорційна силі струму в контурі  $B \sim I$ . Отже, магнітний потік через поверхню контура пропорційний силі струму в цьому контурі  $\Phi \sim I$  або

$$\Phi = L I,$$

де  $L$  – коефіцієнт пропорційності, який називається індуктивністю контура.

**Індуктивність контура** – це скалярна фізична величина, яка чисельно дорівнює магнітному потоку через поверхню контура, якщо в цьому контурі проходить одиничний струм і відсутні інші джерела магнітного поля. Індуктивність контура не залежить від сили струму та індукції магнітного поля. Вона є характеристикою контура і залежить лише від форми і розмірів контура, а також від магнітних властивостей навколишнього середовища.

Індуктивність вимірюється в *генрі* ( $Гн$ ).  $1 Гн = \frac{1 Вб}{1 А} = \frac{1 В \cdot 1 с}{1 А}$ .

**Закон** електромагнітної індукції для явища **самоіндукції** набуває вигляду:

$$\mathcal{E}_c = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(L I)}{dt} = -L \frac{dI}{dt}.$$

Його формулювання: електрорушійна сила самоіндукції в замкненому контурі пропорційна і протилежна за знаком швидкості зміни струму в цьому контурі. Знак “мінус” пов'язаний з напрямом вихрового електричного поля всередині витків котушки. Якщо струм в колі зростає ( $\frac{dI}{dt} > 0$ ), то

$$\mathcal{E}_c < 0$$

і вихрове електричне поле напрямлене назустріч електричному полю струму; якщо струм в колі зменшується ( $\frac{dI}{dt} < 0$ ), то

$$\mathcal{E}_c > 0$$

і напрям вихрового електричного поля збігається з напрямом електричного поля струму.

Розглянемо електричне коло, в якому є джерело постійного струму, котушка з індуктивністю  $L$ , резистор з опором  $R$  і вимикач  $S$  (рис. 10).

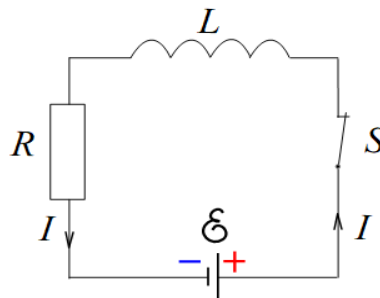


Рис. 10. Схема електричного кола з котушкою і резистором

Нехай вимикач  $S$  замкнений і по колу проходить струм. За законом Ома для повного кола

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r} \approx \frac{\mathcal{E}}{R}, \quad (R \gg r).$$

З цього співвідношення визначаємо електрорушійну силу джерела струму:

$$\mathcal{E} = IR.$$

Помножимо ліву і праву частини останньої рівності на множник  $I dt$  і позначимо цю формулу номером (2.1):

$$\mathcal{E} I dt = I^2 R dt.$$

У цій формулі елементарна робота сторонніх сил джерела струму дорівнює:

$$dA = \mathcal{E} I dt,$$

а елементарна теплота Джоуля-Ленца визначатиметься формулою:

$$dQ = I^2 R dt.$$

Отже, за нескінченно малий проміжок часу  $dt$  робота сторонніх сил  $dA$  повністю перетворюється на теплоту Джоуля-Ленца  $dQ$ . Згідно закону Джоуля-Ленца кількість теплоти, що виділяється в провіднику із струмом, пропорційна силі струму, напрузі і часу проходження струму через провідник:

$$Q = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t = I U t.$$

Навколо провідника із струмом завжди існує магнітне поле. З формули (2.1) бачимо, що коли по колу проходить постійний електричний струм, то для підтримки магнітного поля додаткової роботи джерела струму не потрібно.

Під час замикання кола вимикачем  $S$  сила струму зростає від нуля до певного значення  $I$ . Одночасно з'являється і зростає магнітне поле, яке породжує вихрове електричне поле. Закон Ома для повного кола в момент замикання кола набуває вигляду:

$$I = \frac{\mathcal{E} - L \frac{dI}{dt}}{R}.$$

З цієї формули визначаємо електрорушійну силу джерела струму:

$$\mathcal{E} = I R + L \frac{dI}{dt}.$$

Помножимо ліву і праву частини останньої рівності на множник  $I dt$  і позначимо цю формулу номером (2.2):

$$\mathcal{E} I dt = I^2 R dt + L I dI.$$

Порівнюючи праві частини формул (2.1) і (2.2), бачимо, що під час замикання кола частина роботи джерела струму йде на теплоту Джоуля-Ленца  $dQ$ , а частина роботи  $dA_M = L I dI$  – на створення магнітного поля. Повна робота джерела струму по створенню магнітного поля дорівнює:

$$A_M = \int_0^I L I dI = \frac{L I^2}{2}.$$

За законом збереження та перетворення енергії ця робота повністю перетворюється на **енергію магнітного поля**:

$$W_M = \frac{L I^2}{2}. \quad (2.3)$$

Формула (2.3) визначає повну енергію магнітного поля, яке локалізоване в просторі навколо провідника із струмом.

Свідченням того, що магнітне поле має енергію є наявність струму в колі після його розмикання. Тут має місце перетворення енергії магнітного поля, що зосереджене в котушці з індуктивністю  $L$ , на енергію електричного струму, який проходить у розімкнутому колі.

Оскільки індуктивність  $L$  котушки залежить від магнітних властивостей середовища, де локалізоване магнітне поле, то й енергія магнітного поля залежить від магнітних властивостей середовища, а також від сили струму в провіднику.

### Запитання для самоконтролю

1. Що називається явищем самоіндукції?
2. Що означає поняття електрорушійної сили самоіндукції?
3. Чому під час замикання електричного кола з котушкою сила струму набуває певного значення не миттєво, а протягом часу  $t_1$ ?
4. Яким є час існування вихрового електричного поля, що локалізоване біля котушки, в момент замикання кола?
5. Чому під час розмикання електричного кола з котушкою сила струму зменшується від певного значення до нуля не миттєво, а протягом часу  $t_2$ ?
6. Яким є час існування вихрового електричного поля, що локалізоване біля котушки, в момент розмикання кола?
7. Чому явище самоіндукції є окремим випадком явища електромагнітної індукції?
8. Чому в момент розмикання електричного кола з котушкою струм може мати шкідливу дію? Як цього запобігти?
9. Що називається індуктивністю контура?
10. Від яких параметрів залежить індуктивність контура?
11. В яких одиницях вимірюється індуктивність контура?
12. Записати формулу закону самоіндукції.
13. Сформулювати закон самоіндукції.
14. Який зміст має знак “мінус” в законі самоіндукції?
15. Записати закон Ома для повного кола з котушкою в момент його замикання.
16. Записати формулу для визначення енергії магнітного поля біля провідника із струмом.
17. Що є підтвердженням наявності енергії магнітного поля біля провідника із струмом?
18. Від яких факторів залежить енергія магнітного поля біля провідника із струмом?



**ЛІТЕРАТУРА**

1. Денисов А.Е., Потапенко Г.Д. Физика в прикладной геодезии: учебник. Киев: Вища школа, 1991. 351 с.
2. Чолпан П.П. Основы фізики: підручник. Київ: Вища школа, 1995. 488 с.
3. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальна фізика. Електрика і магнетизм: підручник. Київ: Вища школа, 1990. 399 с.
4. Сивухин Д.В. Общий курс физики. В 5 томах. Том 3. Электричество: учебник. М.: Физматлит, МФТИ, 2004. 656 с.
5. Калашников С.Г. Электричество: учебник. М.: Физматлит, 2003. 624 с.
6. Савельев И.В. Общий курс физики. В 5 томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика: учебник. М.: Наука, Гл. ред. физ-мат. лит., 1985. 496с.
7. Ситников О.П. Основы электродинаміки. Лабораторний практикум: навч. посібник. Чернігів: ЧДІЕУ, 2011. 48 с.
8. Оселедчик Р.С., Самойленко П.И., Точилина Т.Н. Физика. Модульный курс для технических вузов: учебное пособие. М.: Юрайт-Издат., 2012. 568 с.
9. Рохманов М.Я. Авотин С.С. Фізика: навч. посібник для самостійної роботи студентів. Харків: ХНАУ, 2015. 283с.

**НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ****СИТНИКОВ**  
**Олександр Павлович****ОСНОВИ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ****КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

Навчальний посібник для студентів інженерних спеціальностей  
напрямів підготовки 192 “Будівництво та цивільна інженерія”,  
193 “Геодезія та землеустрій”  
за освітньо-кваліфікаційним рівнем “бакалавр”

Комп'ютерна верстка та макетування

**О. Ситников**

*Автор — кандидат фізико-математичних наук,  
доцент кафедри доцент кафедри промислового і цивільного будівництва  
Навчально-наукового інституту будівництва  
Чернігівського національного технологічного університету*

---

*Рекомендовано рішенням кафедри промислового і цивільного будівництва  
Навчально-наукового інституту будівництва Чернігівського національного  
технологічного університету (протокол №7 від 11 січня 2018 р.)*

*Обл.-вид. арк. – 3,65*