

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Український державний університет науки і технологій**

О. М. Гулівець, Е. П. Штапенко, Д. М. Волнянський, О. П. Лучанінова

# **Електрика і магнетизм**

навчальний посібник



Дніпро  
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

О. М. Гулівець, Е. П. Штапенко, Д. М. Волнянський, О. П. Лучанінова

# **Електрика і магнетизм**

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

ДНІПРО  
2026

УДК 537:537.6/.8(075.8)

Е 50

Авторський колектив:

*Гулівець О. М., Штапенко Е. П., Волнянський Д. М., Лучанінова О. П.*

Рекомендовано Радою якості освітньої діяльності УДУНТ

*Протокол № 3 від 10. 11. 2025 р.*

**Е-50** Електрика і магнетизм : навч. посіб. / О. М. Гулівець, Е. П. Штапенко, Д. М. Волнянський, О. П. Лучанінова ; за ред. канд. фіз.-матем. наук, доц. О. М. Гулівця ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2026. – 152 с.

**ISBN 978-617-8314-94-1 (PDF)**

Посібник містить конспект лекцій та лабораторний практикум з курсу Електрика і магнетизм.

Посібник призначений для опанування освітньої компоненти «Електрика і магнетизм» та дипломного проектування за спеціальністю А4 Середня освіта (А4.08 Середня освіта (Фізика та астрономія)), освітньо-професійна програма «STEM-навчання».

Посібник також призначено для використання студентами денної та безвідривної форми навчання всіх спеціальностей УДУНТу під час вивчення розділу електрика і магнетизм при опануванні освітньої компоненти «Фізика».

Іл. 80, табл. 16, бібліогр. 14 назв.

**УДК 537:537.6/.8(075.8)**



Цей твір ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons [«Attribution-NonCommercial-ShareAlike» 4.0 International \(CC BY-NC-SA 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) («Із зазначенням авторства – Некомерційна – Поширення на тих самих умовах» 4.0 Міжнародна)

ISBN 978-617-8314-94-1 (PDF)  
DOI 10.15802/978-617-8314-94-1

© Гулівець О. М., Штапенко Е. П., Волнянський Д. М., Лучанінова О. П., 2026  
© Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2026

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES

O. M. Gulivets, E. P. Shtapenko, D. M. Volnyanskii, O. P. Luchaninova

# Electricity and magnetism

MANUAL

DNIPRO  
2026

Writing Team:

*Gulivets O. M., Shtapenko E. P., Volnyanskii D. M., Luchaninova O. P.*

Recommended by the Council for the Quality of Educational Activities  
of the USUST

*Protocol No. 3 of November 10, 2025*

**E 43** Electricity and magnetism : manual / O. M. Gulivets, E. P. Shtapenko, D. M. Volnyanskii, O. P. Luchaninova ; ed by. cand. of phys. and mathem. sciences, assoc. prof. O. M. Gulivets ; Ukrainian State University of Science and Technologies. – Electronic edition. – Dnipro : USUST, 2026. – 152 p.

### **ISBN 978-617-8314-94-1 (PDF)**

The manual contains lecture notes and laboratory exercises for the course Electricity and magnetism.

The manual is intended for mastering the educational component "Electricity and magnetism" and diploma design in the specialty A4 Secondary Education (A4.08 Secondary Education (Physics and Astronomy)), the educational and professional program "STEM Education".

The manual is also intended for use by full-time and part-time students of all specialties of USUST while studying the section Electricity and magnetism when mastering the educational component "Physics".

Il. 80, tab. 16, bibliogr. 14.

**UDC 537:537.6/.8(075.8)**



This work is licensed under Creative Commons License

[«Attribution-NonCommercial-ShareAlike» 4.0 International \(CC BY-NC-SA 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	7
РОЗДІЛ 1. Електростатика. Закон Кулона. Напруженість і потенціал електричного поля	9
РОЗДІЛ 2. Принцип суперпозиції електростатичних полів. Теорема Остроградського-Гауса. Зв'язок між напруженістю і потенціалом електростатичного поля	16
РОЗДІЛ 3. Діелектрики і провідники в електростатичному полі. Конденсатори	24
РОЗДІЛ 4. Постійний електричний струм. ЕРС і напруга. Закон Ома	35
РОЗДІЛ 5. Послідовне і паралельне з'єднання провідників. Правила Кірхгофа. Робота і потужність струму. Закон Джоуля-Ленца	42
РОЗДІЛ 6. Електричний струм у металах, вакуумі і газах. Термоелектронна емісія	50
РОЗДІЛ 7. Магнітне поле і його характеристики. Закон Біо-Савара-Лапласа і його застосування	59
РОЗДІЛ 8. Дія магнітного поля на струм і рухомий заряд. Ефект Хола	68
РОЗДІЛ 9. Явище електромагнітної індукції. Коливальний контур. Змінний струм. Магнітне поле у речовині	77
ВСТУП ДО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ	91
Вимоги з охорони праці під час виконання лабораторних робіт	91
ЕЛЕКТРОСТАТИКА	92
Л.Р.№8-1 Вивчення електростатичного поля	92
Л.Р.№8-2 Визначення електроємності конденсатора	95
Л.Р.№8-3 Визначення електроємності послідовного та паралельного з'єднання конденсаторів	97
Л.Р.№8-4 Визначення діелектричної проникності діелектрика	99
ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ	102
Л.Р.№9-1 Визначення питомого опору провідника	102
Л.Р.№9-2 Визначення опору резистора за допомогою моста	

постійного струму	105
Л.Р.№9-3 Визначення температури розжарювання спіралі електричної лампи	107
Л.Р.№9-4 Робота і потужність в колі постійного струму	109
Л.Р.№9-5 Градування термомпери	111
Л.Р.№9-6 Визначення внутрішнього опору і коефіцієнта корисної дії джерела струму	113
<b>ЗМІННИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ</b>	<b>116</b>
Л.Р.№10-1 Визначення індуктивності котушки	116
Л.Р.№10-2 Вивчення закону Ома для змінного струму	119
Л.Р.№10-3 Визначення коефіцієнту трансформації і коефіцієнту корисної дії трансформатора	124
<b>МАГНІТНЕ ПОЛЕ</b>	<b>128</b>
Л.Р.№11-1 Визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі	128
Л.Р.№11-2 Перевірка закону Ампера	130
Л.Р.№11-3 Визначення питомого заряду електрона за допомогою магнетрона	134
<b>ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ</b>	<b>138</b>
<b>ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ</b>	<b>150</b>

## ПЕРЕДМОВА

Одним з пріоритетних завдань нашої держави на сучасному етапі розвитку суспільства, є програма по підготовці конкурентоспроможних фахівців у галузі освіти, особливо математично-природничого профілю. Дисципліна «Електрика і магнетизм» відноситься до обов'язкової компоненти (ОК2.4) освіто-професійної програми (ОП) «STEM-навчання» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти. Метою вивчення навчальної дисципліни «Електрика і магнетизм» є набуття теоретичних і практичних знань та вмінь, навичок та інших компетентностей для успішної професійної діяльності в галузі викладання фізики з елементами STEM-освіти.

Метою навчальної дисципліни є набуття таких передбачених освітньою програмою фахових компетентностей: (ФК18) Здатність використовувати комплекс наукових знань з фізики та астрономії у поєднанні із необхідним математичним апаратом для пояснення явищ природи, розуміння сучасної природничо-наукової картини світу; (ФК19) Здатність організовувати та здійснювати дослідницьку діяльність та формулювати доказові висновки на основі отриманої інформації; (ФК20) Здатність видокремлювати істотні ознаки основних одиниць навчального змісту курсу фізики: фізичного явища, величини, закону, фізичної теорії, фундаментального фізичного експерименту, фізичного приладу, технічного пристрою та моделі; обґрунтовано обирати та застосовувати методи й засоби навчання, відповідний дидактичний матеріал для їх пояснення; (ФК21) Здатність здійснювати усі види фізичного експерименту, у тому числі і навчального, відповідно до методики і техніки проведення; (ФК32) Здатність сприймати нові знання в галузі фізики, математики, інформатики та інтегрувати їх в області STEM-освіти, використовуючи здобуті фундаментальні та фахові знання. Здатність зорієнтуватися на рівні фахівця у розв'язанні задач, які лежать поза межами обраної спеціальності.

Відповідно до освітньої програми дисципліна спільно з іншими освітніми компонентами має забезпечити досягнення таких програмних результатів навчання: (РН7) Демонструє знання основ фундаментальних і прикладних наук (відповідно до предметної спеціальності), оперує базовими категоріями та поняттями предметної області спеціальності; (РН23) Вибирає математичні методи розв'язування задач, враховує умови виконання математичних тверджень, коректно проектує умови та твердження на нові класи об'єктів, аналізує і упорядковує відповідності між поставленою задачею й відомими

моделями; (PH26) Класифікує і пояснює основні поняття, закони, теорії, загальну структуру, предмет і методи дослідження фізики, астрономії та методики їх навчання, місце і зв'язки в системі наук, етапи історії їх розвитку; (PH27) Аналізує фізичні явища і процеси на основі фізичних законів, теорій, принципів, із застосуванням відповідних математичних методів; (PH28) Здійснює експериментальну діяльність з фізики, організовує та проводить фізичний експеримент в освітньому процесі; (PH31) Демонструє володіння основами наукових досліджень; організовує навчально-дослідницьку діяльність учнів.

Базова дисципліна «Електрика і магнетизм» є передумовою для опанування освітніх компонент в освітньо-професійній програмі «STEM-навчання»: (OK2.5) Оптика; (OK2.1) Методика викладання фізики. Електрика та магнетизм вивчає електричні та магнітні явища, а також їх взаємозв'язок, який називається електромагнетизмом. Електрика досліджує взаємодію заряджених тіл та проходження електричного струму, тоді як магнетизм — взаємодію заряджених частинок через магнітне поле. Разом вони складають основу класичної електродинаміки, яка вивчає, як електричні та магнітні поля, які взаємодіючи утворюють єдине електромагнітне поле. [1-10].

Головною метою посібника є намір не тільки всебічно проілюструвати фізичні явища і закони, але й навчити студента їх спостерігати і перевіряти дослідним шляхом. Вони мають сприяти оволодінню технікою фізичного експерименту, отриманню навичок самостійної дослідницької роботи і виробленню вмінь застосовувати теоретичні знання для аналізу і розв'язання в майбутньому конкретних інженерних задач.

Посібник містить конспект лекцій, лабораторний практикум з електрики і магнетизму та завдання для практичних занять. Посібник призначений для опанування освітньої компоненти «Електрика і магнетизм» та дипломного проектування за спеціальністю А4 Середня освіта (А4.08 Середня освіта (Фізика та астрономія)), освітньо-професійної програми «STEM-навчання». Посібник також призначено для використання студентами денної та безвідривної форми навчання всіх спеціальностей університету (УДУНТУ) під час вивчання розділу електрика і магнетизм при опануванні освітньої компоненти «Фізика».

## Розділ 1. Електростатика. Закон Кулона. Напруженість і потенціал електричного поля

### 1.1. Закон збереження електричного заряду. Закон Кулона

Ще з давнини відомо, що при натиранні деяких тіл, вони здатні притягати легкі предмети. Так, наприклад, якщо потерти пластмасовий гребінець об волосся, то воно буде притягатися до гребінця. Це явище вперше було пояснено англійським вченим Джилбертом ще у XVI столітті і названо електризацією. **Електризація тіл** – це набування тілами певного електричного заряду. Не дивлячись на велику різноманітність тіл у природі, існує лише два типи електричних зарядів: заряди, подібні до тих, що виникають на склі, потертому об шкіру – **позитивні заряди**, і заряди, подібні тим, що виникають на ебоніті, потертому об хутро – **негативні заряди**. Однойменні заряди відштовхуються один від одного, а різнойменні – притягаються. Одиницею виміру електричного заряду є **кулон [Кл]**.

Дослідним шляхом американський фізик Р. Міллікен показав, що електричний заряд є дискретним, тобто заряд будь-якого тіла складає ціле кратне від елементарного електричного заряду. Елементарним носієм негативного заряду є **електрон**, його заряд  $e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{Кл}$ .

Елементарним носієм позитивного заряду є **протон**, його заряд  $p = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{Кл}$ .

Всі тіла у природі можуть електризуватися. Електризація тіл може здійснюватися різними способами: дотиком (тертям), електростатичною індукцією та ін.

Із узагальнення дослідних даних було встановлено фундаментальний закон природи, експериментально підтверджений англійським фізиком М. Фарадеєм, - **закон збереження електричного заряду**: алгебраїчна сума електричних зарядів будь-якої замкненої системи (тобто системи, яке не обмінюється зарядами з іншими тілами) залишається незмінною, які б процеси не виникали всередині цієї системи.

В залежності від концентрації вільних зарядів тіла поділяють на провідники, діелектрики і напівпровідники. **Провідники** – тіла, в яких електричний заряд може вільно переміщуватися по всьому об’єму. Провідники поділяють на дві групи: 1) **провідники першого роду** (метали) – перенесення заряду (вільних електронів) в них не супроводжується хімічними перетвореннями; 2) **провідники другого роду** (наприклад, розплавлені солі, розчини кислот) – перенесення в них зарядів (позитивних і негативних іонів) веде до хімічних змін. **Діелектрики** (наприклад, скло, пластмаси) – тіла, в яких практично відсутні вільні заряди. **Напівпровідники** (наприклад, германій, кремній) займають проміжне положення між провідниками і діелектриками.

Закон взаємодії точкових електричних зарядів було встановлено у 1785 році Ш. Кулоном. **Точковий заряд** – це заряд, сконцентрований на тілі, лінійні розміри якого значно менші за відстань до інших заряджених тіл, з якими це тіло взаємодіє.

**Закон Кулона:** сила взаємодії  $F_k$  (сила Кулона) між двома нерухомими точковими зарядами, що знаходяться у вакуумі, пропорційна добутку цих зарядів  $q_1$  і  $q_2$ , і обернено пропорційна квадрату відстані  $r$  між ними:

$$F_k = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (1.1)$$

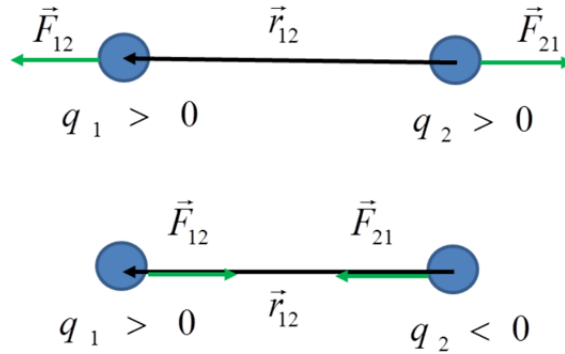
де  $k$ - коефіцієнт, який залежить від вибору системи одиниць.

Сила Кулона  $\vec{F}_k$  спрямована вздовж прямої, яка з’єднує взаємодіючі заряди.

У векторній формі **закон Кулона** можна представити у вигляді:

$$\vec{F}_{k12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r}, \quad (1.2)$$

де  $\vec{F}_{k12}$  - сила, що діє на заряд  $q_1$  зі сторони заряду  $q_2$ ,  $\vec{r}_{12}$  - радіус-вектор, що з’єднує ці заряди,  $r = |\vec{r}_{12}|$  (рис. 1.1).



**Рис. 1.1.** Взаємодія точкових зарядів

У системі СІ коефіцієнт  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}^2}{\text{Кл}^2}$ .

Величина  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$  – називається **електричною постійною** і відноситься до фундаментальних величин.

Якщо заряджені тіла помістити у деяку речовину, то сила взаємодії між ними зменшиться у  $\epsilon$  раз. Величина  $\epsilon$  називається діелектричною постійною і її фізичний зміст буде визначений пізніше. Таким чином силу Кулона при взаємодії точкових зарядів у речовині можна знайти за формулою:

$$F_k = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2} \quad (1.3)$$

## 1.2. Електростатичне поле. Напруженість електростатичного поля

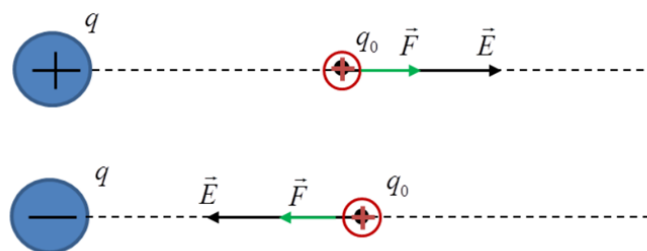
Навколо заряджених тіл існує силове поле, завдяки якому вони взаємодіють між собою. Це поле називають електричним. Якщо поле створюється нерухомим електричним зарядом, його називають **електростатичним полем**.

Для виявлення і вивчення електростатичного поля використовують **пробний точковий позитивний заряд** – це такий заряд, який не змінює досліджуваного поля. Якщо в поле заряду  $q$  внести пробний точковий позитивний заряд  $q_0$  (надалі будемо називати його пробний заряд), то на нього буде діяти сила  $\vec{F}$ , різна в різних точках поля і пропорційна заряду  $q_0$ . Відношення  $\frac{\vec{F}}{q_0}$  не залежить від величини пробного заряду і характеризує електростатичне поле в тій точці, де знаходиться пробний заряд. Ця величина є

силовою характеристикою електростатичного поля і називається напруженістю електричного поля. Отже, **напруженість електростатичного поля** в даній точці, є векторна фізична величина, яка визначається силою, що діє на одиничний позитивний заряд, поміщений в цю точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (1.4)$$

Напрямок напруженості електростатичного поля співпадає з напрямком сили, що діє на пробний позитивний заряд (рис.1.2).



**Рис. 1.2.** Напруженість електростатичного поля точкових зарядів

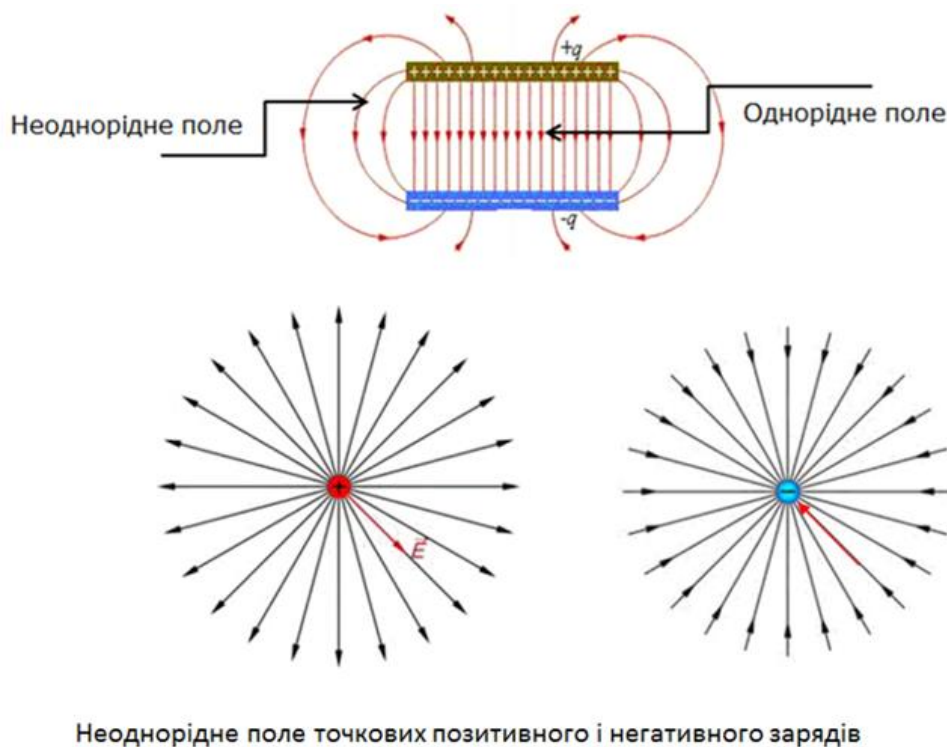
Якщо поле створюється позитивним зарядом, то вектор напруженості електричного поля спрямований вздовж прямої, яка проведена через центр зарядженого тіла і точку, в якій необхідно визначити напруженість (там же уявно необхідно розмістити пробний позитивний заряд) у напрямку від заряду у зовнішній простір (відповідає відштовхуванню позитивного пробного заряду). Якщо ж поле створюється негативним зарядом, то аналогічним чином вектор напруженості електричного поля буде спрямований із навколишнього простору до заряду.

З формули 1.4 витікає, що напруженість електричного поля в системі СІ вимірюється у  $\frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ .

Графічно електростатичне поле зображується силовими лініями - це лінії, дотичні до яких співпадають в кожній точці поля з напрямком вектора напруженості електростатичного поля. Силовим лініям електростатичного поля приписується напрямок, що співпадає з напрямком вектора напруженості.

Поле називають **однорідним**, якщо вектор напруженості в будь-якій точці постійний за напрямком і за значенням. Для такого поля силові лінії паралельні вектору напруженості.

Якщо поле створене точковим зарядом, то лінії напруженості електростатичного поля є радіальними прямими, які виходять із заряду, якщо він позитивний і входять у заряд, якщо він негативний. Приклад неоднорідного, однорідного поля і поля точкового заряду показано на (рис.1.3).



**Рис. 1.3.** Неоднорідне, однорідне поля і поле точкового заряду

Як слідує з рівняння (1.4) і закону Кулона, напруженість електростатичного поля точкового заряду можна визначити за формулою:

$$E_{\text{т.з.}} = k \frac{q}{r^2}, \quad (1.5)$$

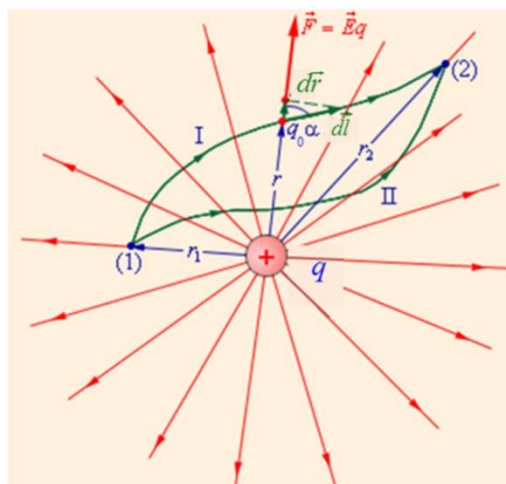
де  $q$  - величина точкового заряду,  $r$  - відстань від точкового заряду до точки, в якій розраховують напруженість.

За допомогою силових ліній електростатичного поля можна характеризувати не тільки напрямок, а й значення напруженості: кількість силових ліній, що пронизують одиницю площі поверхні, перпендикулярної до силових ліній, повинно бути рівною модулю напруженості електростатичного поля.

### 1.3. Потенціал електростатичного поля

Якщо в електростатичному полі точкового заряду  $q$  з точки 1 в точку 2 вздовж довільної траєкторії переміщається інший точковий заряд  $q_0$  (рис.1.4), то сила  $\vec{F}$ , що прикладена до пробного заряду, здійснює роботу. Робота сили  $\vec{F}$  на елементарному переміщенні  $d\vec{l}$  рівна:

$$dA = \vec{F} d\vec{l} = F dl \cos\alpha = k \frac{qq_0}{r^2} dl \cos\alpha = k \frac{qq_0}{r^2} dr \quad (1.14)$$



**Рис. 1.4.** Переміщення в електростатичному полі точкового заряду

Робота по переміщенню пробного заряду з точки 1 в точку 2 не залежить від траєкторії переміщення, а визначається лише положення початкової і кінцевої точок. Відповідно, електростатичні сили є **консервативними**, а поле – **потенціальним**.

Тіло, яке знаходиться у потенціальному полі, має запас потенціальної енергії, за рахунок якої силами поля виконується робота. Як було сказано раніше, робота консервативних сил здійснюється за рахунок зменшення потенціальної енергії. Отже роботу сил електростатичного поля можна представити, як різницю потенціальних енергій, які має пробний заряд  $q_0$  в початковій і кінцевій точках поля заряду  $q$ :

$$A_{12} = \int_{r_1}^{r_2} dA = kqq_0 \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = k \left( \frac{qq_0}{r_1} - \frac{qq_0}{r_2} \right) \quad (1.15)$$

звідки слідує, що потенціальна енергія заряду  $q_0$  у полі заряду  $q$  на відстані рівна:

$$W = k \frac{qq_0}{r} + C$$

Потенціальна енергія, як і в механіці, визначається з точністю до деякої постійної  $C$ . Якщо вважати, що при видаленні пробного заряду на нескінченність потенціальна енергія обертається у нуль, то  $C = 0$  і **потенціальна енергія заряду  $q_0$  в полі точкового заряду  $q$**  буде визначатися формулою:

$$W = k \frac{qq_0}{r} \quad (1.16)$$

Для однойменних зарядів  $qq_0 > 0$  і потенціальна енергія (відштовхування) додатня, а для різнойменних зарядів  $qq_0 < 0$  і потенціальна енергія їх взаємодії (притягання) від'ємна.

Якщо поле створене системою точкових зарядів  $q_1, q_2, \dots, q_N$  то потенціальна енергія заряду  $q_0$  в полі цих зарядів визначається алгебраїчною сумою потенціальних енергій  $W_i$  створених кожним зарядом системи окремо:

$$W = \sum_{i=1}^N W_i = q_0 \sum_{i=1}^N k \frac{q_i}{r_i} \quad (1.17)$$

З формул (1.16) і (1.17) витікає, що відношення  $\frac{W}{q_0}$  не залежить від величини пробного заряду. Це відношення є енергетичною характеристикою електростатичного поля і називається потенціалом:

$$\varphi = \frac{W}{q_0} \quad (1.18)$$

Таким чином, **потенціал  $\varphi$**  в будь якій точці електростатичного поля є фізична скалярна величина, що визначається потенціальною енергією одиничного позитивного заряду, поміщеного в цю точку.

З формул (1.16) і (1.18) витікає, що потенціал поля, створеного точковим зарядом  $q$  в точці, відділеній від цього заряду на відстань  $r$  рівний:

$$\varphi = k \frac{q}{r} \quad (1.19)$$

**Робота**, яку виконують сили електростатичного поля **при переміщенні заряду  $q_0$**  з точки 1 в точку 2, може бути представлена у вигляді:

$$A_{12} = W_1 - W_2 = q_0(\varphi_1 - \varphi_2) = q_0\Delta\varphi \quad (1.20)$$

тобто рівна добутку заряду, що переміщується, на різницю потенціалів в початковій і кінцевій точках.

**Різниця потенціалів**  $\Delta\varphi$  двох точок 1 і 2 в електростатичному полі визначається роботою, яку здійснюють сили поля, при переміщенні одиничного позитивного заряду з точки 1 в точку 2.

Якщо переміщати пробний заряд з довільної точки поля на нескінченність (де потенціал рівний нулю), то робота сил електростатичного поля  $A_\infty = q_0\varphi$ ,

звідки 
$$\varphi = \frac{A_\infty}{q_0} \quad (1.21)$$

Таким чином, можна дати ще одне визначення потенціалу: **потенціал** – фізична величина, яка визначається роботою по переміщенню одиничного позитивного заряду при видаленні його із даної точки на нескінченність.

Одиницею потенціалу є **вольт (В)**: 1В – є потенціал такої точки поля, в якій заряд 1Кл має потенціальну енергію 1Дж.

Якщо поле створене не одним, а системою точкових зарядів, то потенціал такого поля буде рівний алгебраїчній сумі потенціалів полів всіх цих зарядів:

$$\varphi = \sum_{i=1}^N \varphi_i = k \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{r_i} \quad (1.22)$$

### **Завдання для самоконтролю**

1. Що вивчає електростатика?
2. Сформулюйте Закон Кулона. Чому дорівнює електрична стала?
3. У чому полягає поняття напруженості та потенціалу електричного поля?
4. В чому різниця між провідниками, напівпровідниками і діелектриками?
5. Які електричні поля називають однорідними та неоднорідними?
6. Чому дорівнює робота сил електростатичного поля при переміщенні заряду?

## **РОЗДІЛ 2. Принцип суперпозиції електростатичних полів. Теорема**

### **Остроградського-Гауса. Зв'язок між напруженістю і потенціалом електростатичного поля**

#### **2.1 Принцип суперпозиції електростатичних полів**

Якщо в деяких точках простору є система точкових зарядів  $q_1, q_2, \dots, q_N$  то, використовуючи метод дослідження поля за допомогою пробного заряду, можна

знайти сили кулонівської взаємодії  $\vec{F}_i$  пробного заряду  $q_0$  з кожним зарядом системи:

$$\vec{F}_i = k \frac{q_0 q_i}{r_i^2} \frac{\vec{r}_i}{r_i} \quad (2.1).$$

Згідно принципу суперпозиції механічних сил, результуюча всіх діючих сил:

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i$$

разом з формулою (2.1) дають:

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^N \vec{E}_i \quad (2.2)$$

Рівняння (2.2) є математичним виразом **принципу суперпозиції напруженості електростатичних полів**: напруженість поля, створеного системою точкових зарядів, дорівнює векторній сумі напруженостей полів, що створюються в даній точці кожним із зарядів системи.

Принцип суперпозиції дозволяє розрахувати електростатичні поля будь якої системи нерухомих зарядів, оскільки якщо заряди не точкові, то їх завжди можна звести до сукупності точкових зарядів [1-8].

Заряджене тіло скінченних розмірів можна уявити системою точкових зарядів  $dq$ , неперервно розподілених в просторі з певною густиною заряду (лінійною  $\tau = \frac{dq}{dl}$ ; поверхневою  $\sigma = \frac{dq}{dS}$ ; об'ємною  $\rho = \frac{dq}{dV}$ ).

Якщо, наприклад, заряди розподілено в просторі з об'ємною густиною  $\rho$ , то об'єм  $dV$ - фізично малий об'єм, тобто в межах цього об'єму  $\rho = const$ . Заряд цього об'єму дорівнює  $dq = \rho dV$ , а напруженість поля, створеного зарядом  $dq$

$$- d\vec{E} = k \frac{dq}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

Тоді напруженість поля, створеного зарядженим тілом, дорівнює:

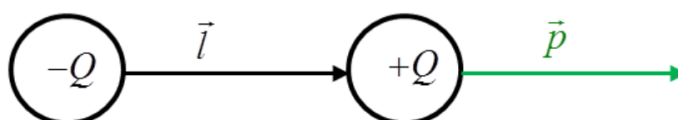
$$\vec{E} = \int d\vec{E} = k \int \frac{dq}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \quad (2.3)$$

Розглянемо приклад застосування принципу суперпозиції до розрахунку електростатичного поля електричного диполя. **Електричним диполем** називають систему двох рівних за модулем різнойменних точкових зарядів ( $+Q$  і  $-Q$ ), відстань  $l$  між якими значно менша відстані до інших точок поля, яке вивчають. Вектор, спрямований по осі диполя (прямій, що проходить через

обидва заряди) від від'ємного заряду до позитивного і рівний відстані між ними, називають плечем диполя  $\vec{l}$ .

$$\text{Вектор} \quad \vec{p} = |Q| \vec{l} \quad (2.4),$$

який співпадає за напрямком з плечем диполя і рівний добутку одного заряду диполя на плече, називається **електричним моментом диполя** або **дипольним моментом** (рис.2.1).

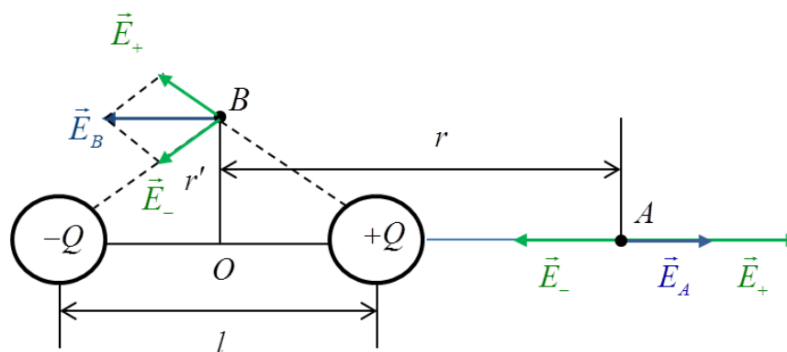


**Рис. 2.1.** Електричний момент диполя

Згідно принципу суперпозиції, напруженість  $\vec{E}$  поля диполя у довільній точці  $\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$  (2.5).

де  $\vec{E}_+$  і  $\vec{E}_-$  - напруженості полів, створених відповідно позитивним і негативним зарядами диполя. Використовуючи цю формулу знайдемо напруженість електричного поля на продовженні осі диполя і на перпендикулярі, опущеному до середини осі диполя.

а) **Напруженість поля на продовженні осі диполя** в точці **A** (рис.2.2).



**Рис. 2.2.** Напруженість поля на продовженні осі диполя та на перпендикулярі до середини осі диполя

Позначимо відстань від точки **A** до середини осі диполя через  $r$ . Використовуючи формулу (1.5) для напруженості поля точкового заряду і формулу (2.5), отримаємо:

$$E_A = k \left[ \frac{Q}{\left(r - \frac{l}{2}\right)^2} - \frac{Q}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2} \right] = kQ \frac{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2 - \left(r - \frac{l}{2}\right)^2}{\left(r + \frac{l}{2}\right)^2 \left(r - \frac{l}{2}\right)^2}$$

Згідно визначенню диполя,  $\frac{l}{2} \ll r$ , отже

$$E_A = k \frac{2Ql}{r^3} = k \frac{2p}{r^3} \quad (2.6)$$

б) **Напруженість поля на перпендикулярі, опущеному до середини осі диполя, в точці  $B$**  (рис. 2.2).

Позначимо  $r'$  - відстань від середини осі диполя  $O$  до точки  $B$ .

Точка  $B$  рівновіддалена від зарядів, тому

$$E_+ = E_- = k \frac{Q}{\left(r'\right)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2} \approx k \frac{Q}{\left(r'\right)^2} \quad (2.7).$$

Із подібності рівнобедрених трикутників, що опираються на плече диполя і на вектор  $\vec{E}_B$ , отримаємо  $\frac{E_B}{E_+} = \frac{l}{\sqrt{\left(r'\right)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2}} \approx \frac{l}{r'}$ , звідки

$$E_B = k \frac{Ql}{\left(r'\right)^3} = \frac{P}{\left(r'\right)^3} \quad (2.8).$$

Вектор  $\vec{E}_B$  має напрямок, протилежний електричному моменту диполя.

## 2.2. Потік вектора напруженості електростатичного поля.

### Теорема Остроградського-Гауса

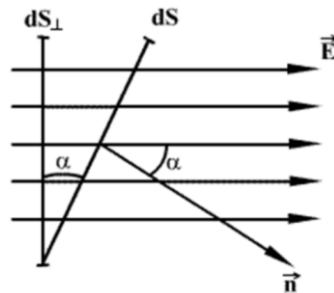
Розрахунок напруженості електростатичного поля системи електричних зарядів за допомогою принципу суперпозиції електростатичних полів можна значно спростити, використовуючи доведену німецьким вченим К. Гаусом теорему, яка визначає потік вектора напруженості електричного поля у вакуумі через довільну замкнену поверхню.

Фізична скалярна величина  $d\Phi$ , яка чисельно рівна скалярному добутку вектора напруженості електростатичного поля  $\vec{E}$  на площу елементарної

площадки  $d\vec{S}$ , називається **поток вектора напруженості через елементарну поверхню**:

$$d\Phi = (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = E dS \cos\alpha, \quad (2.9)$$

де  $\alpha$ - кут між нормаллю  $\vec{n}$  до вибраної елементарної площадки і вектором напруженості  $\vec{E}$  (рис.2.3). Напрямок вектора  $d\vec{S}$  задається напрямком нормалі  $\vec{n}$ .



**Рис. 2.3.** Поток вектора напруженості через елементарну поверхню

Для довільної замкненої поверхні потік вектора напруженості електростатичного поля знаходять за допомогою колового інтегралу:

$$\Phi_E = \oint_S (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = \int_S E dS \cos\alpha, \quad (2.10).$$

**Теорема Гауса для електростатичного поля у вакуумі:** потік вектора напруженості електростатичного поля у вакуумі крізь довільну замкнену поверхню рівний алгебраїчній сумі зарядів, які знаходяться в середині цієї поверхні, поділений на  $\epsilon_0$ :

$$\Phi_E = \oint_S (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = \frac{\sum_{i=1}^N q_i}{\epsilon_0} \quad (2.11)$$

Застосовуючи теорему Гауса можна довести формули для розрахунку напруженості електростатичного поля у вакуумі, створених деякими тілами. Приведемо деякі з них:

1) **Поле рівномірно зарядженої нескінченної площини:**

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}, \quad (2.12)$$

де  $\sigma = \frac{dq}{dS}$  - поверхнева густи електричного заряду, тобто заряд, який приходить на одиницю площі поверхні.

2) Поле двох рівномірно заряджених (різноїменними однаковими зарядами) нескінченних паралельних площин:

$$\text{між пластинами - } E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}; \quad \text{за пластинами - } E = 0 \quad (2.13).$$

3) Поле рівномірно зарядженої полої сфери радіусом  $R$  і зарядом  $Q$ : за сферою на відстані  $r$  від центру сфери -  $E = k \frac{Q}{r^2}$ ; всередині сфери -  $E = 0$  (2.14)

4) Поле об'ємно зарядженого шару радіусом  $R$  і зарядом  $Q$ :

$$\text{на відстані } r' < R - E = k \frac{Q}{R^3} r'; \quad \text{на відстані } r < R - E = k \frac{Q}{r^2} \quad (2.15).$$

5) Поле рівномірно зарядженого нескінченного полого циліндру (нитки) радіусом  $R$  і довжиною  $L$ : на відстані  $r \geq R$  від осі симетрії -  $E = k \frac{2\tau}{r}$ ; на відстані  $r < R$  (тобто всередині циліндра) -  $E = 0$  (2.16),

де  $\tau = \frac{Q}{L}$  - лінійна густина електричного заряду.

### 2.3. Зв'язок між напруженістю і потенціалом електростатичного поля

Знайдемо зв'язок між силовою характеристикою електростатичного поля – напруженістю, і енергетичною характеристикою – потенціалом.

Робота по переміщенню одиничного точкового позитивного заряду з однієї точки в іншу вздовж осі  $x$  при умові, що точки розміщені нескінченно близько одна від одної і  $x_2 - x_1 = dx$ , рівна  $E_x dx$ . Та ж робота рівна  $\varphi_1 - \varphi_2 = -d\varphi$ .

Прирівнюючи обидві рівності, отримаємо:  $E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}$  (2.17).

Повторивши аналогічні міркування для осей  $y$  і  $z$ , можна знайти вектор  $\vec{E}$ :

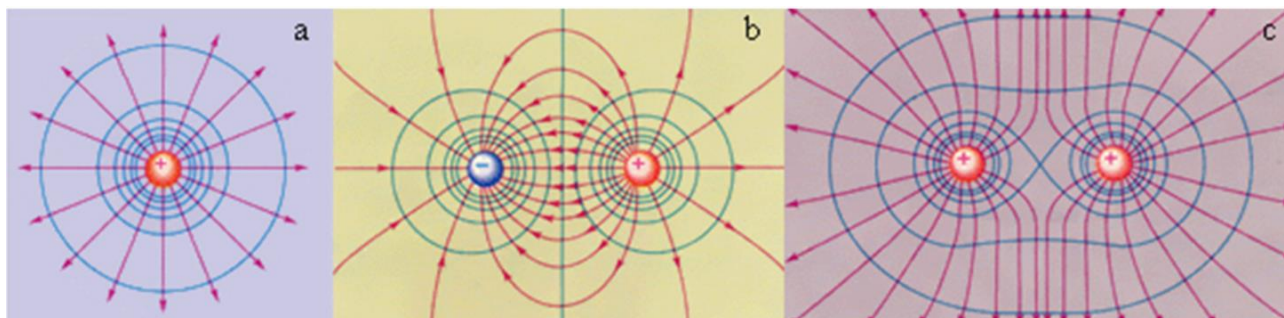
$$\vec{E} = -\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k}\right)$$

де  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  - одиничні вектори координатних осей  $x, y, z$ . З визначення градієнту слідує, що  $\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}}\varphi$  (2.18).

Знак «-» перед градієнтом потенціалу вказує на те, що вектор напруженості електростатичного поля спрямований в сторону зменшення потенціалу.

Якщо поле, наприклад, створюється точковим зарядом  $q$ , то його потенціал на відстані  $r$  від цього заряду визначається формулою:  $\varphi = k \frac{q}{r}$ . Таким чином,

еквіпотенціальні поверхні у даному випадку будуть представляти собою концентричні сфери радіусом  $r$  (на рис.2.4а позначені синім кольором). З іншого боку, лінії напруженості у випадку точкового заряду – радіальні прямі (на рис.2.4а позначені червоним кольором). Відповідно, лінії напруженості у випадку точкового заряду перпендикулярні до еквіпотенціальних поверхонь.



**Рис. 2.4.** Еквіпотенціальні поверхні

Лінії напруженості електростатичного поля *завжди перпендикулярні* до еквіпотенціальних поверхонь. Дійсно, всі точки еквіпотенціальної поверхні мають однаковий потенціал, тому робота по переміщенню заряду вздовж цієї поверхні рівна нулю, тобто електростатичні сили, що діють на заряд, завжди спрямовані по нормалі до еквіпотенціальних поверхонь. Відповідно, вектор  $\vec{E}$  *завжди нормальний до еквіпотенціальних поверхонь*, а отже і силові лінії перпендикулярні цим поверхням. На рис.2.4(b,c) зображені еквіпотенціальні поверхні (зеленими і синім кольором) і силові лінії (червоним кольором) відповідно для електростатичного поля, створеного електричним диполем і двома однойменними зарядами.

Еквіпотенціальних поверхонь навколо кожного заряду і кожної системи зарядів можна побудувати нескінченну множину. Однак їх зазвичай будують так, щоб різниці потенціалів між будь-якими двома еквіпотенціальними поверхнями була однаковою. Тоді густина еквіпотенціальних поверхонь наглядно характеризує напруженість поля в різних точках. Там, де густина цих поверхонь більша, напруженість поля теж більша.

Отже, знаючи розміщення ліній напруженості електростатичного поля, можна побудувати еквіпотенціальні поверхні і, навпаки, по відомому

розміщенню екіпотенціальних поверхонь можна визначити в кожній точці поля величину і напрямок напруженості поля.

Зв'язок (2.18) між напруженістю і потенціалом електростатичного поля дозволяє знайти різницю потенціалів між двома довільними точками цього поля. Наведемо деякі приклади.

1) Поле **рівномірно зарядженої нескінченної площини** визначається формулою (2.12). Різниця потенціалів між точками, що лежать на відстані  $x_1$  і  $x_2$  від площини, рівна:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{x_1}^{x_2} E dx = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} dx = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} (x_2 - x_1) \quad (2.19)$$

2) Поле **рівномірно зарядженої пологої сфери радіусом  $R$  і зарядом  $Q$**  визначається формулою (2.14), отже різниця потенціалів між двома точками, що лежать на відстані  $r_1$  і  $r_2$  від центру сфери ( $r_1 > R$  і  $r_2 > R$ ), буде рівна:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E dx = \int_{r_1}^{r_2} k \frac{Q}{r^2} dr = kQ \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.20)$$

Якщо прийняти відстані  $r_1 = r$  і  $r_2 = \infty$ , то потенціал поля за сферичною поверхнею можна розрахувати за формулою:

$$\varphi = k \frac{q}{r}. \quad (2.21)$$

Всередині сферичної поверхні ( $r < R$ ) напруженість поля рівна нулю, а отже потенціал всюди однаковий і рівний:

$$\varphi = k \frac{q}{R} \quad (2.22)$$

3) Поле **об'ємно зарядженого шару радіусом  $R$  і зарядом  $Q$**  визначається виразами (2.15). Різниця потенціалів між двома точками поза сферою, що лежать на відстані  $r_1$  і  $r_2$  від центру сфери ( $r_1 > R$  і  $r_2 > R$ ), буде визначатися виразом (2.20).

В середині сфери, різниця потенціалів між двома точками, що лежать на відстані  $r'_1$  і  $r'_2$  від центру сфери ( $r'_1 < R$  і  $r'_2 < R$ ), буде визначатися виразом:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r'_1}^{r'_2} E dr = \int_{r'_1}^{r'_2} k \frac{Qr}{R^3} dr = \frac{kQ}{2R^3} (r'^2_2 - r'^2_1) \quad (2.23)$$

4) Поле **рівномірно зарядженого нескінченного пологого циліндру радіусом  $R$  (або тонкої нитки) і довжиною  $L$**  визначається виразами (2.15). Отже різниця потенціалів між двома точками, що лежать на відстані  $r_1$  і  $r_2$  від осі циліндру ( $r_1 > R$  і  $r_2 > R$ ), буде рівна:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \int_{r_1}^{r_2} E dr = \int_{x_1}^{x_2} k \frac{2\tau}{r} dr = 2k\tau \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (2.24)$$

### Завдання для самоконтролю

1. В чому полягає принцип суперпозиції напруженості електростатичних полів?
2. Яку систему називають електричним диполем? Що таке момент диполя?
3. Чому дорівнює напруженість поля на продовженні осі диполя і на перпендикулярі, опущеному до середини осі диполя?
4. Сформулюйте теорему Остроградського-Гауса.
5. Як пов'язані напруженість і потенціал електростатичного поля?
6. Як розташовані лінії напруженості електростатичного поля до екіпотенціальних поверхонь?

## РОЗДІЛ 3. Діелектрики і провідники в електростатичному полі.

### Конденсатори

#### 3.1. Типи діелектриків. Поляризація діелектриків

За електричними властивостями речовини поділяють на провідники, діелектрики і напівпровідники.

Особливістю діелектриків є те, що вони не мають вільних електричних зарядів, оскільки діелектрики складаються з нейтральних атомів або молекул. Заряджені частинки в нейтральному атомі зв'язані між собою і не можуть переміщатися під дією електричного поля по всьому об'єму діелектрика. Молекули (диполі) здатні лише обертатися (орієнтуватися), поляризуючись таким чином, щоб послаблювати зовнішнє електричне поле [5-9].

При внесенні діелектрика в зовнішнє електричне поле  $\vec{E}_0$  в ньому виникає перерозподіл зарядів, які входять до складу атомів або молекул. В результаті такого перерозподілу на поверхні діелектричного зразка з'являються надлишкові некомпенсовані зв'язані заряди. Всі заряджені частинки, які утворюють макроскопічні зв'язані заряди, як і раніше входять до складу своїх атомів.

Зв'язані заряди створюють електричне поле  $\vec{E}'$ , яке всередині діелектрика спрямоване протилежно вектору напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля (рис.3.1). Цей процес називають поляризацією діелектрика.

В результаті повне електричне поле всередині діелектрика виявляється за модулем меншим, ніж зовнішнє поле.

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' \quad (3.1)$$

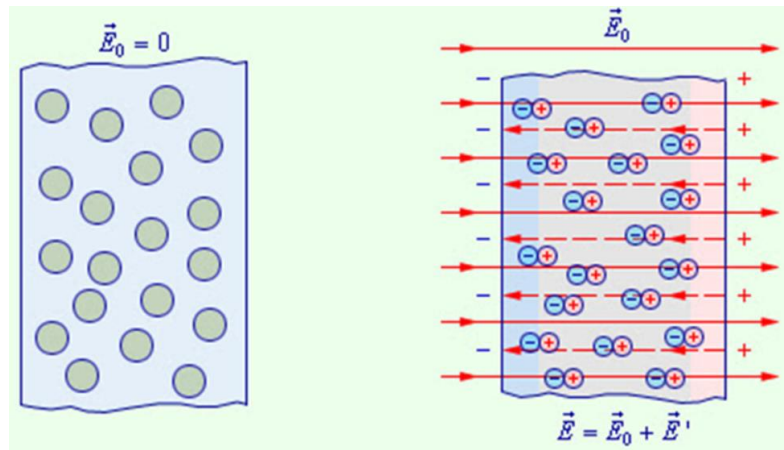
Фізична величина, яка дорівнює відношенню модуля напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього електричного поля в вакуумі до модуля напруженості  $\vec{E}$  повного поля в однорідному діелектрику, називають **діелектричною проникністю речовини**:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E} \quad (3.2)$$

Таким чином, діелектрична проникність показує, у скільки разів зовнішнє електричне поле послаблюється діелектриком і кількісно характеризує властивість діелектрика поляризуватись в електричному полі.

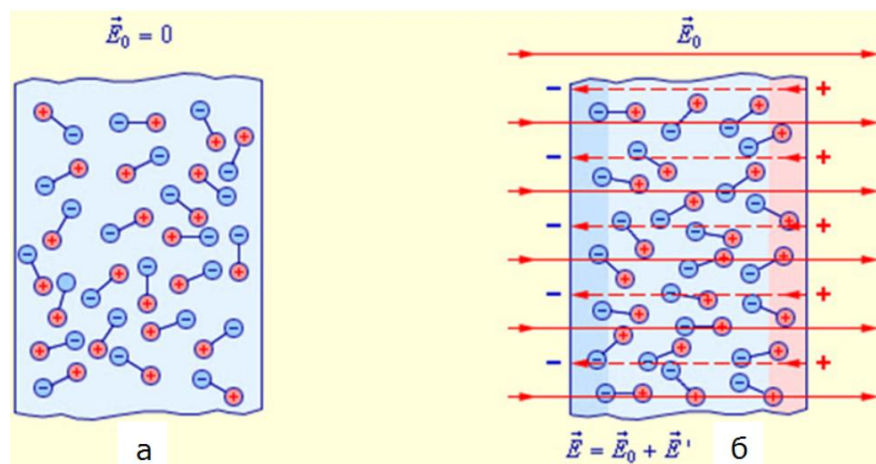
Якщо замінити додатні заряди ядер молекул сумарним зарядом  $+Q$ , який знаходиться у центрі «тяжіння» позитивних зарядів, а заряд всіх електронів  $-Q$ , які знаходяться у центрі «тяжіння» від'ємних зарядів, то молекулу можна розглядати, як **електричний диполь** з електричним моментом  $\vec{p} = Q\vec{l}$ .

Першу групу діелектриків складають речовини, молекули яких мають симетричну будову, тобто центри «тяжіння» позитивних і негативних зарядів за відсутності зовнішнього електричного поля співпадають і, відповідно, дипольний момент  $p = 0$ . **Молекули** таких діелектриків називають **неполярними**. Під дією зовнішнього електричного поля  $\vec{E}_0$  заряди неполярних молекул зміщуються в протилежні сторони (позитивні по полю, а негативні проти поля) і молекула здобуває дипольний момент. Таку поляризацію називають **електронною**, а діелектрики – **неполярними**. Прикладом неполярних діелектриків є:  $N_2, H_2, O_2, CO_2, CH_4$  ....



**Рис. 3.1.** Процес поляризації діелектриків

Другу групу діелектриків складають речовини, молекули яких мають асиметричну будову, тобто центри «тяжіння» позитивних і негативних зарядів не співпадають. Таким чином, ці молекули за відсутності зовнішнього електричного поля володіють дипольним моментом відмінним від нуля. **Молекули** таких діелектриків називають **полярними**. За відсутності електричного поля, однак, дипольні моменти полярних молекул внаслідок теплового руху орієнтовані у просторі хаотично і їх результуючий момент рівний нулю (рис.3.2а). Якщо такий діелектрик помістити у зовнішнє електричне поле, то сили цього поля будуть намагатися повернути диполі вздовж поля і у діелектрика виникає відмінний від нуля результуючий дипольний момент (рис.3.2б).



**Рис. 3.2.** Дипольна поляризація діелектриків

Таку поляризацію називають **орієнтаційною** або **дипольною**, а діелектрики – **полярними**. Прикладом полярних діелектриків є:  $H_2O, CO, SO_2$  ....

Третю групу діелектриків складають речовини, молекули яких мають іонну будову. **Іонні кристали** представляють собою просторові ґратки з правильним чергуванням іонів різних знаків. В таких діелектриках спостерігається так звана **іонна поляризація**, за якої іони різних знаків, які утворюють кристалічну ґратку, при накладанні зовнішнього поля зміщуються в протилежні напрями, внаслідок чого на гранях кристала з'являються зв'язані заряди. Прикладом такого механізму може слугувати поляризація кристала  $NaCl$ , в якому іони  $Na^+$  і  $Cl^-$  утворюють дві підґратки, вкладені одна в одну.

Електричне поле  $\vec{E}'$  зв'язаних зарядів, яке виникає при поляризації полярних і неполярних діелектриків, змінюється по модулю прямо пропорційно модулю зовнішнього поля  $\vec{E}_0$ . В дуже сильних електричних полях ця залежність може порушуватись, і тоді проявляються різні нелінійні ефекти. У випадку полярних діелектриків в сильних полях може спостерігатись ефект насичення, коли всі молекулярні диполі орієнтуються вздовж силових ліній. У випадку неполярних діелектриків сильне зовнішнє поле, співрозмірне з внутриаомним полем, може суттєво деформувати атоми або молекули речовини і змінювати їхні електричні властивості. Однак, ці явища зазвичай не спостерігаються, так як для цього потрібні поля з напруженістю (1010–1012) В/м, а вже при менших полях настає електричний пробій діелектрика [2-5].

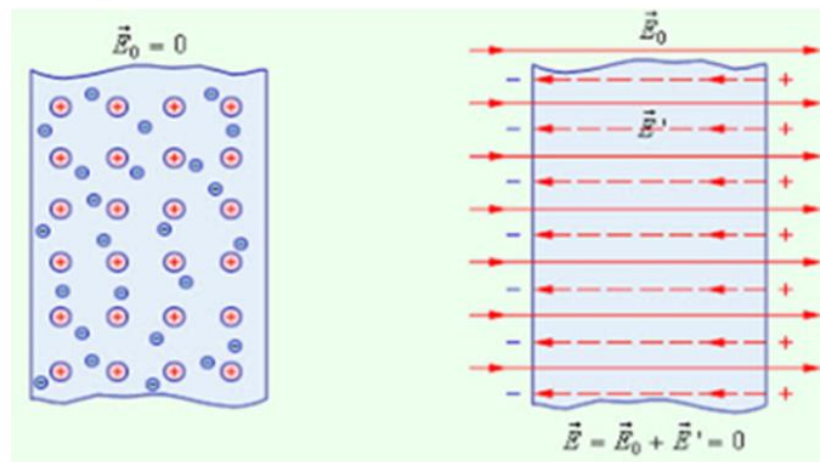
### 3.2. Провідники в електростатичному полі

До провідників належать речовини, які мають заряджені частинки, що здатні рухатись впорядковано по всьому об'єму тіла під дією електричного поля. Заряди цих частинок називають **вільними зарядами**. Провідниками є всі метали, деякі хімічні сполуки, водні розчини солей, кислот, лугів, розплави солей, іонізовані гази. Розглянемо поведінку в електричному полі тільки твердих металевих провідників. У металах носіями вільних зарядів є вільні електрони. Їх називають **електронами провідності**.

Під час утворення металу з нейтральних атомів внаслідок взаємодії між ними електрони зовнішніх оболонок атомів повністю втрачають зв'язки зі своїми атомами і стають "власністю" всього провідника в цілому. У результаті

позитивно заряджені іони оточені негативно зарядженим газом, що утворюється колективізованими електронами. Вільні електрони беруть участь у тепловому русі і можуть переміщуватися по шматку металу в будь-якому напрямі.

Якщо відсутнє зовнішнє поле в будь-якому елементі об'єму провідника від'ємний вільний заряд компенсується позитивним зарядом іонної ґратки. Якщо провідник, внесли в електричне поле  $\vec{E}_0$ , в ньому відбувається перерозподіл вільних зарядів, внаслідок чого на поверхні провідника виникають некомпенсовані додатні та від'ємні заряди (рис.3.3). Цей процес називають електростатичною індукцією, а заряди, які з'явилися на поверхні провідника – індукційними зарядами [7-9].

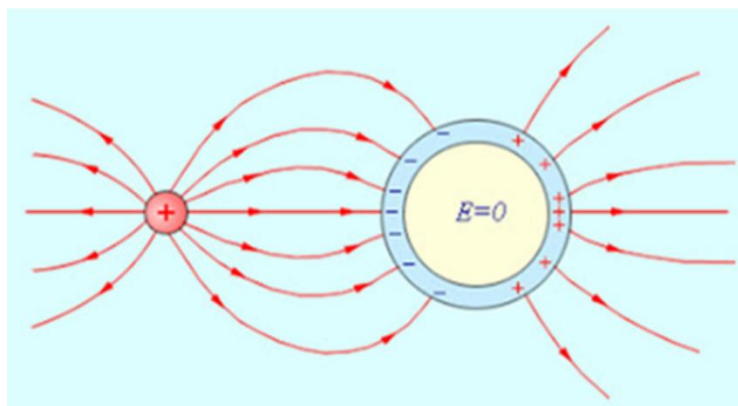


**Рис. 3.3.** Процес електростатичної індукції

У результаті переміщення вільних носіїв заряду і накопичення їх на протилежних частинах провідника напруженість  $\vec{E}'$  внутрішнього поля збільшується і, нарешті, дорівнюватиме за модулем напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля. Це приводить до того, що напруженість результуючого поля  $\vec{E}$  всередині провідника дорівнюватиме нулю, а потенціали у всіх точках однакові і рівні потенціалу на поверхні провідника.

Всі внутрішні ділянки провідника, внесеного в електричне поле, залишаються електронейтральними. Якщо видалити деякий об'єм, виділений всередині провідника, і утворити порожнину, то електричне поле всередині порожнини буде дорівнювати нулю. На цьому ґрунтується електростатичний

захист – чутливі до електричного поля прилади для виключення впливу електричного поля поміщають в металеві корпуси (рис.3.4).



**Рис. 3.4.** Електростатичний захист

Розглянемо провідник, що перебуває в однорідному середовищі далеко від заряджених тіл та інших провідників. Такий провідник називається **відокремленим**.

При наданні відокремленому провіднику деякої кількості заряду  $q$ , цей заряд розподілиться по поверхні провідника з різною поверхневою густиною  $\sigma$ . Проте характер цього розподілу залежить не від його загального заряду  $q$ , а лише від форми провідника. Кожна нова частина зарядів розподіляється на поверхні подібно до попередньої. Отже, при збільшенні в  $n$  разів заряду  $q$  провідника у стільки ж разів збільшиться і  $\sigma$  у будь-якій точці його поверхні. Тобто  $\sigma$  прямо пропорційна до  $q$ :  $\sigma = kq$ , де  $k = f(x, y, z)$  – деяка функція координат точки поверхні, що розглядається.

Поділимо поверхню  $S$  провідника на нескінченно маленькі елементи  $dS$ , які мають заряди  $dq = \sigma dS$ . Кожний такий заряд можна вважати точковим. Потенціал  $d\varphi$  поля заряду  $dq$  у точці, віддаленій від нього на відстань  $r$ , дорівнює:

$$d\varphi = \frac{\sigma dS}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$$

де  $\epsilon$  відносна діелектрична проникність середовища, в якому знаходиться провідник.

Інтегруючи цей вираз по всій замкненій поверхні  $S$  провідника, знайдемо потенціал у довільній точці його електростатичного поля:

$$\varphi = \oint_S \frac{\sigma dS}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} \oint_S \frac{kdS}{r}$$

Для точки, що лежить на поверхні провідника,  $r$  є функцією координат цієї точки й елемента  $dS$ . У цьому випадку інтеграл у правій частині залежить лише від розмірів і форми поверхні  $S$  провідника.

З формули випливає, що потенціал відокремленого провідника прямо пропорційний до його заряду. Відношення заряду  $q$  до потенціалу  $\varphi$  для даного провідника називають електричною ємністю (електроємністю):

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad (3.3)$$

Отже, електроємність відокремленого провідника чисельно визначається кількістю заряду, який необхідно надати провіднику, щоб збільшити його потенціал на одиницю.

Електроємність відокремленого провідника залежить від його форми і розмірів, причому геометрично подібні провідники мають ємності, прямо пропорційні до їхніх лінійних розмірів.

Електроємність прямо пропорційна до діелектричної проникності середовища.

Електроємність не залежить ні від матеріалу провідника, ні від його агрегатного стану, ні від форми і розмірів можливих порожнин всередині нього. Це пов'язано з тим, що надлишкові заряди розподілені тільки на зовнішній поверхні провідника. Електроємність не залежить також від заряду провідника та його потенціалу.

Одиниця ємності – **фарад**: **1 фарад** – це ємність такого провідника, потенціал якого змінюється на 1В при наданні йому заряду в 1Кл.

Оскільки  $\varphi_{\text{кулі}} = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 R}$ , де  $R$  - радіус кулі, то ємність кулі

$$C_{\text{кулі}} = 4\pi\epsilon\epsilon_0 R \quad (3.4).$$

1 **фарад** – це ємність провідника у формі кулі, радіус якої  $R = \frac{C}{4\pi\epsilon_0} \approx 9 \cdot 10^6 \text{ км}$

Для того, щоб провідник мав велику ємність, він повинен мати дуже великі розміри. На практиці, однак, необхідні пристрої, які мають здатність при малих розмірах і невеликих відносно навколишніх тіл потенціалах нагромаджувати значні за величиною заряди. Ці пристрої називають **конденсатори**.

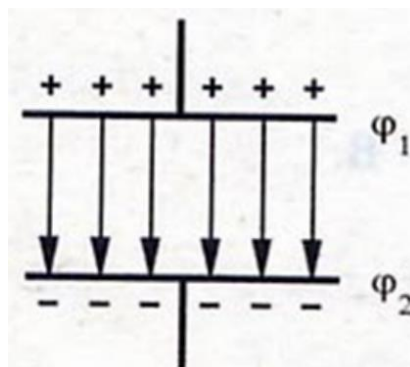
### 3.3. Конденсатори. Ємність конденсатора. Види конденсаторів.

#### Послідовне і паралельне з'єднання конденсаторів

**Конденсатор** – це електричний пристрій, призначений для накопичення електричного заряду і енергії електричного поля.

Конденсатор складається з двох провідників, які розділені діелектриком. Щоб на ємність конденсатора не впливали навколишні тіла, провідникам надають таку форму, щоб поле, яке створюється зарядами, було зосереджено у вузькому проміжку між обкладками конденсатора [1-4].

Оскільки поле зосереджене всередині конденсатора, то лінії напруженості починаються на одній обкладці і закінчуються на іншій (рис.3.5), і тому вільні заряди, що виникають на різних обкладках, є однаковими за модулем різнойменними зарядами.



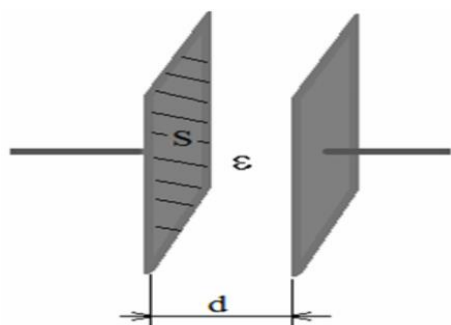
**Рис. 3.5.** Електричне поле всередині конденсатора

Ємність конденсатора - фізична величина, що чисельно дорівнює відношенню заряду  $q$ , накопиченому на одній з обкладок конденсатора, до різниці потенціалів  $\varphi_1 - \varphi_2$  між його обкладками:

$$C = \frac{q}{\Delta\varphi} \quad (3.5).$$

Залежно від форми обкладинок конденсатори поділяються на **плоскі, циліндричні і сферичні**.

Якщо обкладки конденсатора мають форму паралельних між собою площин, то його називають плоским (рис.3.6).



**Рис. 3.6.** Плоский конденсатор

Площа пластин конденсатора  $S$  і якщо лінійні розміри пластин великі порівняно з відстанню між пластинами  $d$ , то електричне поле між пластинами можна вважати еквівалентним полю між двома нескінченними площинами, які заряджені різнойменно з поверхневою густиною яких  $+\sigma = \frac{+q}{S}$  і  $-\sigma = \frac{-q}{S}$ . Крім того, відстань  $d$  повинна бути настільки малою, щоб порушення однорідності поля поблизу його країв можна було не брати до уваги.

Напруженість електричного поля і різниця потенціалів між обкладками конденсатора в цьому випадку дорівнюють:

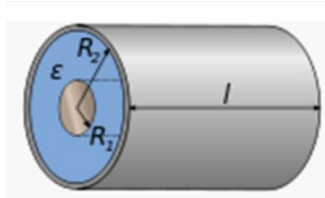
$$E = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 S}; \quad \varphi_1 - \varphi_2 = Ed = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0 d}$$

де  $\varepsilon$  - відносна діелектрична проникність середовища, що заповнює простір між пластинами.

Отже, ємність плоского конденсатора:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \quad (3.6).$$

Дві металеві трубки різних радіусів, вставлені одна в одну аксіально, тобто так, що їх осі збігаються, і розділені шаром діелектрика, утворюють циліндричний конденсатор (рис.3.7).

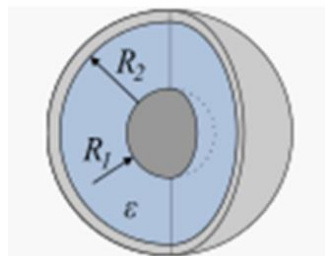


**Рис. 3.7.** Циліндричний конденсатор

Ємність циліндричного конденсатора:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 l}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (3.7)$$

Обкладки сферичного конденсатора – це дві концентричні провідні сфери з радіусами  $R_1$  і  $R_2$ , розділені тонким шаром діелектрика (рис.3.8).



**Рис. 3.8.** Сферичний конденсатор

Електроємність сферичного конденсатора

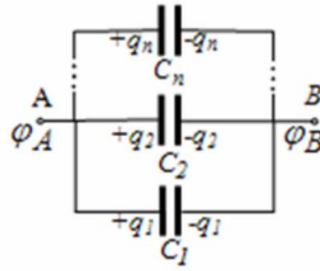
$$C = \frac{4\pi\epsilon\epsilon_0 l R_1 R_2}{R_2 - R_1} \quad (3.8).$$

Для збільшення ємності і варіювання її можливих значень конденсатори з'єднують в батареї.

Щоб отримати велику електроємність, кілька конденсаторів з'єднують в батарею так, щоб всі позитивні обкладки мали один спільний електрод, а негативні – інший (рис.3.9). Таке з'єднання називається **паралельним**. При цьому кілька конденсаторів немовби замінюють одним, у якого площа обкладок дорівнює сумі площ обкладок складових конденсаторів.

Ємність батареї паралельно з'єднаних конденсаторів визначається за формулою:

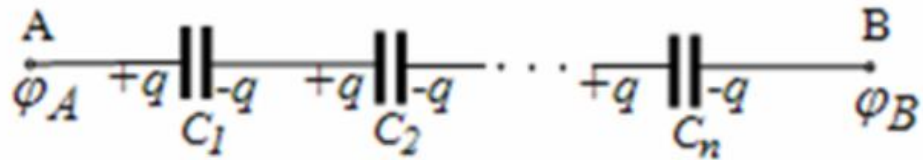
$$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i \quad (3.9)$$



**Рис. 3.9.** Схема паралельного з'єднання конденсаторів

З'єднувати паралельно доцільно такі конденсатори, у яких однакова робоча напруга.

При **послідовному** з'єднанні конденсаторів негативну обкладку першого конденсатора з'єднують з позитивною обкладкою другого і т.д. (рис.3.10).



**Рис. 3.10.** Схема послідовного з'єднання конденсаторів

Електроємність батареї послідовно з'єднаних  $n$  конденсаторів можна визначити із виразу:

$$\frac{1}{C_{\text{посл}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (3.10)$$

Послідовно з'єднують конденсатори для підвищення робочої напруги, яку можна подати на батарею конденсаторів.

### Завдання для самоконтролю

1. Які групи діелектриків існують в чому особливості їх поляризації?
2. Що називають діелектричною проникністю речовини?
3. В чому полягає процес електростатичної індукції?
4. Що таке електрична ємність провідника?
5. Для чого призначений конденсатор, яка формула ємності?
6. Яка електроємність послідовно і паралельно з'єднаних  $n$  конденсаторів?

## РОЗДІЛ 4. Постійний електричний струм. ЕРС і напруга. Закон Ома

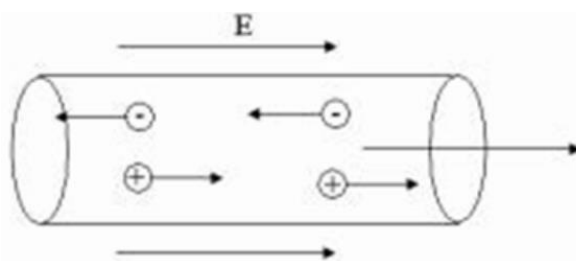
### 4.1. Електричний струм. Сила і густина струму

**Електричним струмом** називають будь-який впорядкований (спрямований) рух заряджених частинок.

Носіями електричного струму можуть бути і елементарні частинки (наприклад, електрони, іони), і мікрочастинки (наприклад, заряджені пилинки).

Так, носіями струму в металах є вільні електрони, в електролітах – іони, в напівпровідниках – валентні електрони і «дірки» [3-5].

У провідниках під дією прикладеного електричного поля вільні електричні заряди переміщуються: позитивні – за полем, а негативні – проти поля (рис. 4.1), тобто в провіднику виникає електричний струм, який називають **струмом провідності**. Якщо ж впорядкований рух у просторі здійснюється переміщенням макроскопічних тіл, то такий струм називають **конвекційним струмом**.



**Рис. 4.1.** Електричний струм в провіднику

Для виникнення і існування електричного струму необхідно, з однієї сторони, наявність вільних електричних зарядів, а з іншої сторони – наявність електричного поля, енергія якого, якимось певним чином постійно поповнювалася і використовувалася на впорядкований рух електричних зарядів. За технічний напрямок електричного струму приймають напрямок руху позитивних зарядів.

Кількісною характеристикою струму є сила струму  $I$  і густина струму  $j$ .

**Силою струму** називають скалярну величину, що дорівнює відношенню кількості заряду  $dq$ , що переноситься за одиницю часу  $dt$  через поперечний переріз провідника:

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (4.1)$$

$[I] = [A]$  Одиниця сили струму в СІ – ампер;

**Постійний струм** – це струм, сила і напрям якого не змінюється. Для постійного струму:

$$I = \frac{Q}{\tau} \quad (4.2)$$

де  $Q$  - заряд, який пройшов через поперечний переріз провідника за час  $\tau$ .

**Густина струму** – векторна фізична величина, чисельне значення якої визначається силою струму  $dI$ , який проходить через одиницю площі поперечного перерізу провідника  $dS$ , перпендикулярного до напрямку струму:

$$J = \frac{dI}{dS} \quad (4.3)$$

Вектор  $\vec{J}$  спрямований уздовж напрямку струму. В системі СІ  $[J] = \left[\frac{A}{m^2}\right]$ .

Виразимо силу і густину струму через середню швидкість  $\langle v \rangle$  впорядкованого руху зарядів у провіднику. Якщо концентрація носіїв струму рівна  $n$  і кожний носій має заряд  $e$  (для електронів), то за час  $dt$  через поперечний переріз провідника  $S$  переноситься заряд  $dq = ne\langle v \rangle S dt$ , а отже густина струму  $J = \frac{I}{S} = \frac{dq}{S dt} = \frac{ne\langle v \rangle S dt}{S dt} = ne\langle v \rangle$ , або у векторному вигляді:

$$\vec{J} = ne\langle \vec{v} \rangle \quad (4.4)$$

Сила струму крізь довільну поверхню площею  $S$  визначається, як потік вектору  $\vec{J}$ , тобто

$$I = \int_S \vec{J} d\vec{S} = \int_S J dS \cos\alpha \quad (4.5),$$

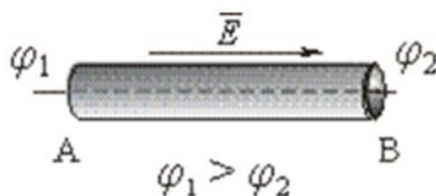
де  $d\vec{S} = \vec{n} dS$  ( $\vec{n}$ - одиничний вектор нормальний до площадки  $dS$ , і утворюючий з вектором  $\vec{J}$  кут  $\alpha$ ).

## 4.2. Сторонні сили. ЕРС і напруга

Якщо в провіднику на носії струму діють лише сили електростатичного поля, то виникає переміщення носіїв заряду від точок з більшим потенціалом у точки з меншим потенціалом.

Нехай маємо деякий провідник АВ з різницею потенціалів ( $\varphi_1 > \varphi_2$ ). Такий стан провідника – нестійкий, в ньому виникне короткочасний

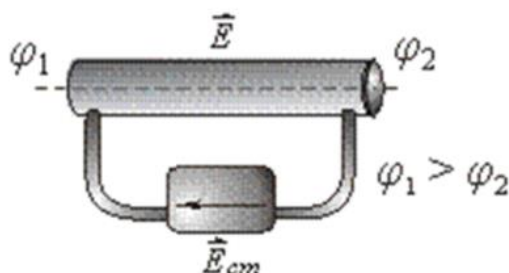
електричний струм від А до В (рис.4.2). Це призводить до вирівнювання потенціалів у всіх точках провідника і зникненню електричного поля.



**Рис. 4.2.** Провідник АВ з різницею потенціалів

Щоб забезпечити в провіднику постійний струм треба якимось чином забезпечити колоподібний рух носіїв струму, тобто подальше їхнє переміщення від В до А деяким додатковим „каналом”. Але на ділянці АВ переміщення зарядів відбувається під дією сил електричного поля ( $\vec{F} = q\vec{E}$ ), то на ділянці ВА їх треба переміщувати проти сил електричного поля.

Тому для неперервного існування електричного струму необхідна наявність приладу, який має здатність створювати і підтримувати різницю потенціалів за рахунок роботи сил не електростатичного походження (рис.4.3).



**Рис. 4.3.** Робота сил не електростатичного походження

Такі прилади називають **джерелами струму**. Сили не електростатичного походження, які діють на заряди зі сторони джерел струму, називають **сторонніми силами**.

Природа сторонніх сил може бути різною. Наприклад, у гальванічних елементах вони виникають за рахунок енергії хімічних реакцій між електродами і електролітами; у генераторі – за рахунок механічної енергії обертання ротора генератора; у атомних реакторах – за рахунок ядерної реакції і т.д. [3-8].

Джерела електричного струму характеризуються **електрорушійною силою**. Для з'ясування фізичної суті цієї величини, знайдемо роботу електростатичних та сторонніх сил в електричному колі:

$$A = \oint q(E + E_{cm})dl = \oint qEdl + \oint qE_{cm}dl \quad (4.5)$$

Перший член в цьому виразі дорівнює нулеві, оскільки це робота потенціальних сил по замкненому контуру, тому

$$A = \oint qE_{cm}dl \quad (4.6).$$

Звідси слідує, що сторонні сили – не потенціальні, а значить вся робота переміщення носіїв струму по замкненому контуру виконується сторонніми силами джерела струму. У розрахунку на одиницю перенесеного заряду її і вважають енергетичною характеристикою джерела струму, яку називають електрорушійною силою, тобто

$$\varepsilon = \frac{A_{cm}}{q} = \oint E_{cm}dl \quad (4.7).$$

Отже, **електрорушійна сила (ЕРС)** – це енергетична характеристика джерела струму, яка чисельно дорівнює роботі, яку виконують сторонні сили з переміщення одиничного позитивного заряду по замкнутому електричному колу.

$$\text{Одиницею вимірювання ЕРС є вольт: } 1\text{В} = \frac{1\text{Дж}}{1\text{Кл}}.$$

При переміщенні одиничного позитивного заряду по деякій ділянці кола 1-2 роботу виконують, як електростатичні (кулонівські), так і сторонні сили. Робота електростатичних сил по переміщенню одиничного позитивного заряду  $q_0$  дорівнює різниці потенціалів  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$  між початковою (1) і кінцевою (2) точками ділянки кола. Робота сторонніх сил по переміщенню одиничного позитивного заряду дорівнює за визначенням електрорушійній силі  $\varepsilon_{12}$ , яка діє на цій ділянці. Тому повна робота по переміщенню одиничного позитивного заряду на певній ділянці кола 1-2 дорівнює  $A_{12} = q_0(\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12})$ .

Величину  $U_{12}$  називають **напругою на ділянці кола 1–2**:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12} \quad (4.8)$$

У випадку, коли на цій ділянці ЕРС не діє, напруга дорівнює різниці потенціалів:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (4.9)$$

### 4.3. Закон Ома

Німецький фізик Г. Ом у 1826 році експериментально встановив, що сила струму  $I$ , який протікає по однорідному металевому провіднику (провіднику, в якому не діють сторонні сили), пропорційна до напруги  $U$  на кінцях провідника:

$$I = \frac{U}{R} \quad (4.10)$$

Величину  $R$  називають електричним опором. Провідник, який має електричний опір, називають резистором.

Співвідношення (4.10) виражає **закон Ома для однорідної ділянки кола**: сила струму в провіднику прямо пропорційна до прикладеної напруги і обернено пропорційна до опору провідника.

В СІ одиницею електричного опору провідника є Ом. Опором в 1 Ом володіє така ділянка кола, в якій при напрузі 1 В виникає струм силою 1 А.

Опір провідника залежить від його розмірів і форми, а також від матеріалу провідника і температури:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (4.11),$$

де  $\rho$  - питомий опір провідника - опір одиниці довжини провідника з одиничною площею поперечного перерізу;

$$[\rho] = [\text{Ом м}]$$

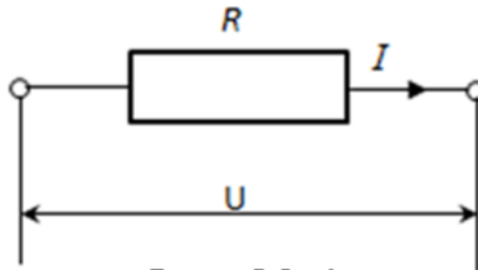
$l$  - довжина провідника;  $S$  - площа поперечного перерізу провідника.

Залежність опору провідника від температури у наближенні задається рівнянням:

$$R = R_0(1 + \alpha t) \quad (4.12),$$

де  $R$  - опір провідника при певній температурі  $t$ ,  $R_0$  - опір при температурі  $t = 0^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  - температурний коефіцієнт опору матеріалу провідника.

Схематично однорідна ділянка кола з одним резистором зображена на рис.4.4.



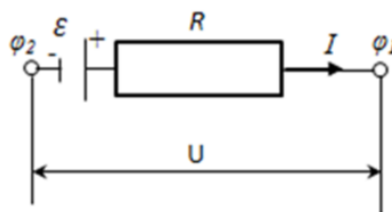
**Рис. 4.4.** Однорідна ділянка кола з одним резистором

Провідники, в яких виконується закон Ома, називаються **лінійними**. Графічна залежність сили струму  $I$  від напруги  $U$  (такі графіки називаються вольт-амперними характеристиками, ВАХ) зображається прямою, яка проходить через початок координат. Зазначмо, що є багато матеріалів і приладів, в яких не виконується закон Ома, наприклад, напівпровідниковий діод або газорозрядна лампа. Навіть у металевих провідниках при достатньо великих струмах спостерігається відхилення від лінійного закону Ома, так як електричний опір металевих провідників зростає при збільшенні температури.

Для неоднорідної ділянки кола (ділянки, в якій є ЕРС, рис.4.5) записують так:

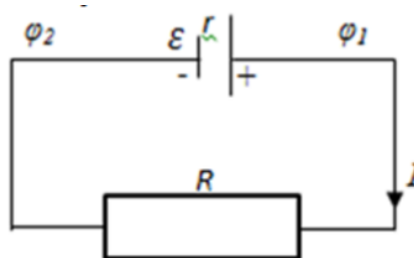
$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon}{R + r} \quad (4.13),$$

де  $R$  - опір резистора (опір навантаження або зовнішній опір),  $r$  - опір джерела ЕРС (внутрішній опір).



**Рис. 4.5.** Неоднорідна ділянка кола

На рис. 4.6 схематично зображено неоднорідне замкнене коло (повне коло).



**Рис. 4.6.** Неоднорідне замкнене коло (повне коло)

Для повного кола закон Ома має вигляд:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r} \quad (4.14)$$

Ця формула виражає **закон Ома для повного кола**: сила струму в повному колі дорівнює електрорушійній силі джерела, поділеній на суму опорів навантаження і внутрішнього опору джерела [1-4].

Якщо зовнішній опір дуже малий  $R \rightarrow 0$ , то у колі виникає **коротке замикання**. Струм короткого замикання відповідно визначається за формулою:

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{\varepsilon}{r} \quad (4.15)$$

Вирази (4.10), (4.13) і (4.14) представляють собою закони Ома в інтегральному вигляді. Закон Ома можна представити і в диференціальному вигляді. Підставимо вираз (4.11) у закон Ома (4.10), отримаємо:  $I = \frac{1}{\rho} \frac{US}{l}$ .

Враховуючи, що  $\frac{U}{l} = E$  - напруженість електричного поля;  $\frac{I}{S} = j$  - густина струму;  $\frac{1}{\rho} = \sigma$  - скалярна фізична величина, яка називається **питомою електропровідністю**, отримаємо:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (4.16)$$

Формула (4.16) представляє собою **закон Ома в диференціальному вигляді**, який пов'язує густину струму у будь-якій точці всередині провідника з напруженістю електричного поля в цій точці. Це співвідношення справедливе і для змінних полів.

### Завдання для самоконтролю

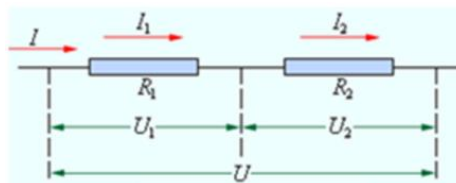
1. Що називають електричним струмом? Чому дорівнює сила і густина струму?
2. Які сили називають сторонніми? Що таке електрична напруга?
3. Сформулюйте і запишіть закон Ома для однорідної ділянки кола.
4. Як визначається питомий опір і питома електропровідність провідника?
5. Який має вигляд закон Ома для повного кола?
6. Запишіть закон Ома в диференціальному вигляді.

## РОЗДІЛ 5. Послідовне і паралельне з'єднання провідників. Правила Кірхгофа. Робота і потужність струму. Закон Джоуля-Ленца

### 5.1. Послідовне і паралельне з'єднання провідників. Правила Кірхгофа

Провідники (резистори) в електричних колах можна з'єднувати **послідовно і паралельно**.

При послідовному з'єднанні провідників (рис.5.1) сила струму у всіх провідниках однакова:  $I_1 = I_2 = I$



**Рис. 5.1.** Схема послідовного з'єднання провідників

За законом Ома, напруги  $U_1$  і  $U_2$  на провідниках відповідно рівні:

$$U_1 = IR_1, U_2 = IR_2.$$

Загальна напруга  $U$  на обох провідниках дорівнює сумі напруг  $U_1$  і  $U_2$ :

$$U = U_1 + U_2 = I(R_1 + R_2) = IR, \text{ де } R - \text{ електричний опір всього кола.}$$

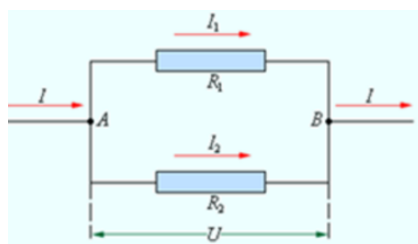
Звідси випливає, що при послідовному з'єднанні двох провідників загальний опір:  $R = R_1 + R_2$ .

**При послідовному з'єднанні повний опір кола дорівнює сумі опорів окремих провідників.**

Цей результат справедливий для будь-якого числа послідовно з'єднаних провідників, тобто

$$R = \sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (5.1).$$

При паралельному з'єднанні (рис.5.2) напруги  $U_1$  і  $U_2$  на обох провідниках однакові:  $U_1 = U_2 = U$ .



**Рис. 5.2.** Схема паралельного з'єднання провідників

Сумарний струм, який протікає по обох провідниках, дорівнює струму в нерозгалуженому колі:  $I = I_1 + I_2$ .

Записавши закон Ома, отримаємо:  $I_1 = \frac{U}{R_1}$ ,  $I_2 = \frac{U}{R_2}$ ,  $I = \frac{U}{R}$ , де  $R$  – електричний опір всього кола. Звідки:  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ .

**При паралельному з'єднанні провідників величина, обернена загальному опору кола, дорівнює сумі величин, обернених опорів паралельно ввімкнених провідників.**

Цей висновок справедливий для будь-якого числа паралельно ввімкнених провідників, тобто

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (5.2).$$

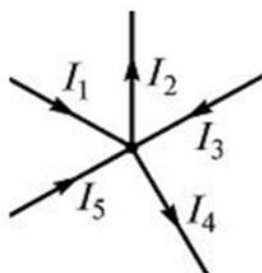
Узагальнений закон Ома дозволяє розрахувати практично будь-який електричний ланцюг. Але розрахунок розгалужених ланцюгів, які мають декілька замкнених контурів (контури можуть мати загальні ділянки, кожний з контурів може мати декілька джерел ЕРС і т.д.), достатньо складний. Ця задача вирішується значно простіше за допомогою двох **правил Кірхгофа**.

Будь-яка точка розгалуження електричного кола, в якому сходяться не менш трьох провідників зі струмом, називають **вузлом**.

**Перший закон Кірхгофа:** алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0 \quad (5.3).$$

Для запису першого закону Кірхгофа довільно приймається правило знаків, наприклад: струми, що входять у вузол беруться зі знаком «плюс», а ті, що виходять, зі знаком «мінус». Так, для вузла, наведеного на рис.5.3 цей закон буде мати вигляд:  $I_1 - I_2 + I_3 - I_4 + I_5 = 0$ .



**Рис. 5.3.** Схема вузла зі струмами

Перший закон Кірхгофа витікає із закону збереження електричного заряду. У розгалуженому електричному колі завжди можна виділити деяку кількість замкнених кіл, які складаються з однорідних і неоднорідних ділянок. Такі замкнені кола називають контурами. На різних ділянках виділеного кола можуть протікати різні струми. На рис.5.4. представлено простий приклад розгалуженого електричного кола.

Коло має два вузла  $a$  і  $d$ , в яких сходяться однакові струми; тому тільки один із вузлів є незалежним. В колі можна виділити три контури  $abcd, adef, abcdef$ . З них тільки два незалежні (наприклад,  $abcd, adef$ ), так як третій не вміщує ніяких нових ділянок.

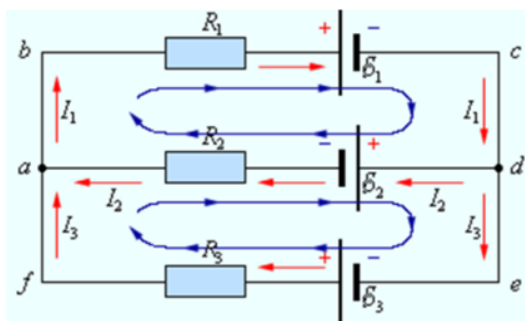


Рис. 5.4. Схема розгалуженого електричного кола.

За **другим законом Кірхгофа** алгебраїчна сума ЕРС ( $\mathcal{E}$ ) в замкненому контурі дорівнює алгебраїчній сумі напруг на опорах (резисторах) контуру:

$$\sum_{i=1}^m \varepsilon_k = \sum_{i=1}^n I_i R_i \quad (5.3).$$

Для запису другого закону Кірхгофа довільно вибирається напрям обходу контуру, наприклад, за годинниковою стрілкою (на рис.5.4 напрям обходу контурів зображено синьою стрілкою). ЕРС які співпадають із напрямом обходу записуються зі знаком «плюс», не співпадаючі - зі знаком «мінус». Напруги на резисторах співпадаючі з напрямом обходу контуру записуються зі знаком «плюс», не співпадаючі - зі знаком «мінус».

Для наведеного електричного кола другий закон Кірхгофа запишеться наступним чином:

$$\text{для контуру } abcd: I_1 R_1 + I_2 R_2 = -\varepsilon_1 - \varepsilon_2$$

$$\text{для контуру } adef: -I_2 R_2 + I_3 R_3 = \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

Згідно першого закону Кірхгофа, для вузла маємо рівняння:  $I_2 + I_3 - I_1 = 0$ .

Перше і друге правило Кірхгофа, які записані для всіх незалежних вузлів і контурів розгалуженого кола, дають у сукупності необхідну і достатню кількість алгебраїчних рівнянь для розрахунку значень напруг і сил струму в електричному колі.

## 5.2. Робота і потужність струму

При проходженні електричного струму через електричне коло можуть проходити різні явища. Крім нагрівання провідників, можуть мати місце хімічні зміни в них (провідники другого роду).

При проходженні електричного струму через будь-яке тіло, електрична енергія може перетворюється в теплову (провідник нагрівається), механічну (електродвигун приводить у рух машини і механізми), хімічну (заряджається акумулятор) тощо, а будь яке перетворення енергії з одного виду в інший характеризується виконанням роботи.

У дослідах Джоуля і Ленца струм проходив через нерухомі металеві провідники. Тому єдиним результатом проходження струму було нагрівання цих провідників і, відповідно, за законом збереження енергії, вся робота, виконана струмом, перетворювалась в теплову енергію. Роботу електричних сил в цьому випадку легко підрахувати. Відомо, що напруга на кінцях ділянки кола дорівнює елементарній роботі, яка виконується при перенесенні зарядженими частинками в цій ділянці одиничного позитивного заряду:

$$U = \frac{dA}{dq} \quad (5.5).$$

З формули (5.5) отримаємо:  $dA = U dq$  (5.6).

Електричний заряд  $dq$ , що переноситься при проходженні електричного струму за час  $dt$ , можна визначити, якщо відома сила струму:  $dq = I dt$ .

Підставивши останню формулу в (5.6), отримаємо вираз, який визначає елементарну роботу, виконану струмом:

$$dA = UI dt \quad (5.7).$$

Одиницею вимірювання роботи електричного струму, як і будь-якого іншого виду роботи, є джоуль, який дорівнює роботі, що виконується електричним струмом силою в  $1\text{А}$  при напрузі в  $1\text{В}$  протягом  $1\text{с}$ .

$$1 \text{ Дж} = 1\text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{с}$$

Якщо необхідно знайти повну роботу на протязі деякого певного інтервалу часу, необхідно вираз (5.6) проінтегрувати:

$$A = \int_0^{\tau} U I dt \quad (5.8).$$

Для постійного електричного струму (сила струму не змінюється з часом) повну роботу, що виконується струмом на протязі часу  $\tau$  можна визначити за формулою:

$$A = U I \tau \quad (5.9).$$

Враховуючи закон Ома роботу електричного струму можна визначити через інші параметри:

$$A = I^2 R \tau \quad \text{або} \quad A = \frac{U^2}{R} \tau \quad (5.10).$$

В розглянутому випадку вся робота перетворюється в теплоту, тобто  $A = Q$ ,  $Q$  - кількість теплоти, відповідно

$$Q = U I \tau \quad (5.11).$$

Слід звернути увагу на те, що робота струму повністю переходить в теплову енергію лише у випадку нерухомих провідників першого роду. Якщо струм, крім нагрівання, виконує механічну роботу (двигун), то робота, виконана струмом, лише частково перетворюється в теплоту, інша частина іде на виконання зовнішньої роботи (двигун). В такому випадку  $A > Q$ , тобто використання формули (5.11) при теоретичних розрахунках для оцінки кількості теплоти, що виділяється, можливе лише у випадках, коли вся ця робота перетворюється у теплоту, тобто коли на досліджуваній ділянці електричного кола відсутні процеси, що супроводжуються виконанням роботи іншого виду.

Для вимірювання роботи електричного струму потрібно мати прилад, який би враховував напругу, силу струму і час його проходження. Прикладами таких

приладів є лічильники електричної енергії, які, як відомо, найчастіше бувають індукційної системи. В основі принципу дії приладів індукційної системи використовується дія змінних магнітних полів, створюваних електромагнітами, на вихрові струми, які індукуються цими полями в алюмінієвому диску. На диск діє обертаючий момент. Знаючи роботу, що виконується струмом за деякий проміжок часу, можна розрахувати і потужність струму, під якою розуміють роботу, що виконується за одиницю часу. В загальному випадку:

$$P = \frac{dA}{dt} \quad (5.12).$$

де  $P$ - це потужність електричного струму. Використовуючи (5.9) і (5.10), отримаємо формулу для потужності постійного електричного струму

$$P = U I = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (5.13).$$

Одиницею вимірювання потужності є джоуль за секунду або ватт.

$$1 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1 \text{ Вт}$$

Один ватт - це потужність, яка виділяється в провіднику, між кінцями якого прикладена напруга один вольт і через який протікає струм в один ампер. В енергетиці та на практиці часто використовується при вимірюванні потужності кВт (1кВт=1000Вт). Також зручно використовувати позасистемну одиницю вимірювання роботи електричного струму - кВт-год,

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

### 5.3. Закон Джоуля-Ленца в диференціальній та інтегральній формах.

При проходженні електричного струму в провіднику, останній нагрівається. Це явище пояснюють тим, що носії струму рухаючись направлено, зустрічають опір середовища провідника. Джоуль та Ленц незалежно один від одного експериментально прийшли до висновку, що кількість теплоти, що виділяється в провіднику на ділянці кола, прямо пропорційна квадрату величини струму, опорів провідника та часові проходження струму, тобто

$$Q = I^2 R \tau \quad (5.14).$$

Цей вираз називають математичним записом закону Джоуля–Ленца в інтегральному вигляді. Закон Джоуля–Ленца виражає величину енергії джерела, яка перетворюється у внутрішню енергію провідника.

У середовищі, в якому протікає електричний струм, виділимо трубку струму (рис.5.5), розглянемо її частину нескінченно малої довжини  $dl$  та об'єму  $dV = dl \cdot dS$ .

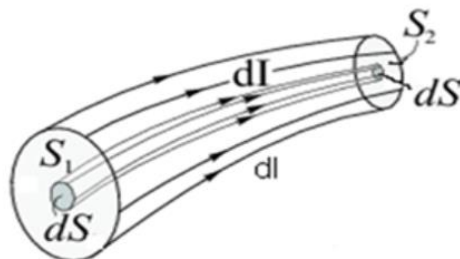


Рис. 5.5. Трубка струму

Введемо поняття **густини теплової потужності** ( $\omega$ )- кількість теплової енергії, яка виділяється в одиниці об'єму середовища, по якому протікає струм за одиницю часу. Згідно з означенням,

$$\omega = \frac{dQ}{dV dt} \quad (5.15),$$

де  $dQ$ - кількість теплоти, що виділяється в середовищі об'єму  $dV$ , в якому протікає струм протягом часу  $dt$ . Використовуючи закон Джоуля-Ленца в інтегральній формі та враховуючи, що сила струму, який проходить по виділеній трубці струму -  $dI$ , можемо записати

$$dQ = dI^2 \cdot dR \cdot dt \quad (5.16).$$

Підставимо 5.16 в 5.15 та, врахувавши, що опір можна подати через геометричні параметри трубки струму ( $dl$  і  $dS$ ), та питомий опір  $\rho$  середовища, в якому протікає струм,  $dR = \rho \frac{dl}{dS}$ , отримаємо

$$\omega = \frac{(dI)^2 dt}{dV dt} \rho \frac{dl}{dS}$$

Провівши спрощення та використовуючи, що  $dV = dl dS$  та  $dI = j dS$ , отримаємо

$$\omega = j^2 \rho \quad (5.17)$$

або

$$\omega = \frac{j^2}{\sigma} \quad (5.18).$$

Часто виникає потреба,  $E$  щоб у формулах 5.17 та 5.18 входила напруженість електричного поля. Врахувавши закон Ома в диференціальній формі, запишемо:

$$\omega = \sigma E^2 \quad (5.19),$$

$$\omega = j E \quad (5.20).$$

Оскільки напруженість електричного поля та густина струму – векторні величини, то (5.19) запишемо у векторній формі,

$$\omega = (\vec{j} \cdot \vec{E}) \quad (5.21).$$

формули (5.17), (5.18), (5.19), (5.20), (5.21) виражають закон Джоуля-Ленца в диференціальній формі.

**Густина теплової потужності** визначатиметься, як скалярний добуток вектора густини струму на напруженість електричного поля  $\vec{E}$ .

Закон Джоуля - Ленца лежить в основі роботи багатьох електронагрівальних приладів. В таких приладах використовують нагрівальний елемент, що є провідником з високим опором. Підвищення опору досягається вибором сплаву з високим питомим опором (наприклад, ніхрому, константану), збільшенням довжини провідника і зменшенням його поперечного перерізу.

### **Завдання для самоконтролю**

1. Чому дорівнює опір кола послідовно і паралельно з'єднаних  $n$  провідників?
2. В чому полягає перший та другий закон Кірхгофа?
3. Чому дорівнює робота і потужність струму?
4. Який вигляд має закон Джоуля-Ленца в інтегральній формі?
5. Який вигляд має закон Джоуля-Ленца в диференціальній формі?
6. В чому полягає поняття густини теплової потужності?

## РОЗДІЛ 6. Електричний струм у металах, вакуумі і газах.

### Термоелектронна емісія

#### 6.1. Елементарна класична теорія електропровідності металів

Для виявлення природи струму в металах було поставлено декілька дослідів. В 1901 році Ріке взяв два мідних і один алюмінієвий циліндр, відшліфував торці, зважив їх і склав у наступній послідовності: мідь – алюміній – мідь. Таким чином утворився провідник. Через нього неперервно пропускали електричний струм одного напрямку протягом року. За весь час через провідник пройшов електричний заряд  $3,5 \cdot 10^6$  Кл.

Після цього циліндри зважили знову, і виявилось, що їх маси не змінились. Під мікроскопом вивчали місця з'єднання металів. Проникнення одного металу в інший не відбулося.

Таким чином було встановлено, що перенесення заряду відбувалось не атомами самого циліндру, а іншими частинками (електронами). Потрібно було визначити знак і числове значення питомого заряду носіїв струму, щоб переконатися, що це саме електрони [5-9].

Досліди, які були поставлені пізніше, базувались на міркуваннях: якщо в металах є заряджені частинки, які можуть переміщуватись, то при гальмування металічного провідника ці частинки повинні деякий час продовжувати свій рух по інерції. Тоді в провіднику виникне імпульс струму і буде перенесений певний заряд.

Перший такий дослід у 1913 році поставили німецький фізик Мандельштам і російський фізик Топалевський. Кількісний результат у 1916 році отримали Толман і Стюарт. Вони взяли котушку довжиною **500 м** і приводили її в рух, при якому лінійна швидкість витків була **300 м/с**. Котушку різко гальмували і за допомогою балістичного гальванометра вимірювали величину заряду, що протікав в колі за весь час гальмування. Знайдене значення відношення заряду до маси було близьке до відповідного значення для електрона. Таким чином було встановлено, що носіями струму в металах є електрони [1-6].

Струм в металах можна викликати за допомогою малої різниці потенціалів. Це дає змогу вважати, що носії струму переміщуються по металу практично вільно.

Існування електронів в металах можна пояснити також наступними міркуваннями: при утворенні кристалічної решітки відщеплюються найменш зв'язані електрони (валентні), які стають „колективною власністю” всього шматка металу. Якщо від кожного атому відщепити ще по електрону, то концентрація вільних електронів матиме значення

$$n = \frac{\rho}{M} N_A \quad (6.1).$$

де  $\rho$  – густина металу. Отримаємо  $n = 10^{28} \div 10^{29} \text{ м}^{-3}$ .

Розглянемо елементарну класичну теорію Друде-Лоренца.

Друде вважав, що електрони провідності металів ведуть себе подібно до молекулам ідеальних газів. Тобто в проміжках між ударами електрони вільно рухаються і проходять в середньому відстань  $\langle l \rangle$ . Електрони стикаються переважно не між собою, а з іонами, які утворюють кристалічну решітку металу. Ці зіткнення призводять до встановлення теплової рівноваги між електронним газом і кристалічною решіткою.

Враховуючи, що на електронний газ можуть бути поширені результати молекулярно кінетичної теорії газів, оцінку теплової швидкості руху електронів можна проводити за формулою:

$$\langle V \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \approx 10^5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (6.2).$$

На цей тепловий рух електронів в металах накладається впорядкований рух електронів з швидкістю  $\langle v \rangle$ . Величина цієї швидкості може бути знайдена з формули  $j = en\langle v \rangle$ :

$$\langle v \rangle = \frac{j}{en} \approx 10^{-3} \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (6.3).$$

Таким чином, навіть при дуже великих значеннях густини струму, середня швидкість впорядкованого руху електронів у  $10^8$  разів менша швидкості теплового руху:  $\langle V \rangle \approx 10^8 \langle v \rangle$ .

Тому при розрахунках результуючу швидкість  $\langle V \rangle + \langle v \rangle$  можна замінювати модулем середньої швидкості теплового руху  $\langle V \rangle$ .

Нехай в металевому провіднику існує електричне поле напруженістю  $E = const$ . Зі сторони поля на електрон зарядом  $e$  діє сила  $F = eE$ , а отже, він набуває прискорення  $a = \frac{eE}{m_e}$ . Таким чином під час вільного пробігу електрони рухаються рівноприскорено, набуваючи вкінці вільного пробігу швидкості  $v_{max} = \frac{eE\langle t \rangle}{m_e}$ , де  $\langle t \rangle$  - середній час між двома послідовними співударями електронів з іонами решітки.

Згідно теорії Друде-Лоренца, у кінці вільного пробігу електрон, зіштовхуючись з іонами кристалічної решітки, віддає їм накопичену в електричному полі енергію, тому швидкість його впорядкованого руху стає рівною нулю. Відповідно середня швидкість впорядкованого руху електрона буде визначатися за формулою:

$$\langle v \rangle = \frac{(v_{max}+0)}{2} = \frac{eE\langle t \rangle}{2m_e} \quad (6.4).$$

Класична теорія металів не враховує розподілу електронів по швидкостям, тому середній час  $\langle t \rangle$  вільного пробігу визначається середньою довжиною вільного пробігу  $\langle l \rangle$  і середньою швидкістю руху електронів відносно кристалічної ґратки провідника, рівній  $\langle V \rangle + \langle v \rangle$ . Оскільки  $\langle v \rangle \ll \langle V \rangle$ , то  $\langle t \rangle = \frac{\langle l \rangle}{\langle V \rangle}$ . Підставивши це значення у рівняння 6.4, отримаємо:  $\langle v \rangle = \frac{eE\langle l \rangle}{2m\langle V \rangle}$ .

Таким чином густина струму в провіднику буде визначатися за формулою:

$$j = ne\langle v \rangle = \frac{ne^2\langle l \rangle}{2m\langle V \rangle} E \quad (6.5),$$

звідки видно, що густина струму пропорційна напруженості електричного поля, тобто вираз (6.5), отриманий на основі класичної теорії електропровідності металів співпадає з **законом Ома в диференціальному вигляді** ( $j = \sigma E$ ).

Коефіцієнт пропорційності між  $j$  і  $E$  є не чим іншим, як питома електропровідність металу

$$\sigma = \frac{ne^2\langle l \rangle}{2m\langle v \rangle} \quad (6.6),$$

яка тим більша, ніж більша концентрація електронів і середня довжина їх вільного пробігу.

У кінці вільного пробігу електрон під дією електричного поля набуває додаткову кінетичну енергію

$$\langle E_k \rangle = \frac{mv_{max}^2}{2} = \frac{e^2\langle l \rangle^2}{2m\langle v \rangle^2} E^2.$$

При зіткненні електрону з іоном ця енергія повністю передається решітці і йде на збільшення внутрішньої енергії металу, тобто на його нагрівання. За одиницю часу електрон отримує у середньому  $\langle Z \rangle$  зіткнень з вузлами решітки:

$$\langle Z \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle l \rangle}.$$

Якщо  $n$ - концентрація електронів, то за одиницю часу відбувається  $n\langle Z \rangle$  зіткнень і решітці передається енергія  $\omega = n\langle Z \rangle \langle E_k \rangle$ , яка йде на нагрівання провідника. Підставивши в останній вираз наступні, отримаємо енергію, яка передається решітці в одиниці об'єму провідника за одиницю часу:

$$\omega = \frac{ne^2\langle l \rangle}{2m\langle v \rangle} E^2 \quad (6.7)$$

Величина  $\omega$  називається **питомою тепловою потужністю струму**. Коефіцієнт пропорційності між  $\omega$  і  $E^2$  за формулою (6.6) є питомою електропровідністю; отже вираз (6.7) – є **закон Джоуля-Ленца** в диференціальній формі, який було наведено в одній із попередніх лекцій.

Метали володіють як достатньо великою електропровідністю, так і високою теплопровідністю. Це пояснюється тим, що носіями струму і теплоти в металах є одні і тіж частинки – вільні електрони, які, переміщуючись у металі, переносять не тільки електричний заряд, а й належну їм енергію хаотичного теплового руху, тобто здійснюють перенос теплоти.

Відеманом і Францем у 1853 році експериментально встановлено закон, згідно якому відношення теплопровідності до питомої електропровідності для

всіх металів при одній і тій же самій температурі однаково і збільшується пропорційно термодинамічній температурі:

$$\frac{\lambda}{\sigma} = \beta T, \quad (6.8)$$

де  $\beta$ - постійна, яка не залежить від роду металу. Рівняння (6.8) носить назву **закону Відемана-Франца**.

Елементарна класична теорія електропровідності металів дозволила отримати значення  $\beta = 3 \left(\frac{k}{e}\right)^2$ . Це значення добре узгоджується з дослідними даними. Однак, як виявилось пізніше, це узгодження теоретичного значення з дослідними даними випадкове. Лоренц, застосувавши до електронного газу статистику Максвелла-Больцмана, отримав  $\beta = 2 \left(\frac{k}{e}\right)^2$ , що призвело до розходження теорії з дослідом.

Таким чином, класична теорія електропровідності металів пояснила закони Ома і Джоуля-Ленца, а також дала якісне пояснення закону Відемана-Франца. Однак ця теорія крім розглянутих протиріч у законі Відемана-Франца зіткнулася ще з рядом труднощів при поясненні різних дослідних даних. Розглянемо деякі з них.

З формули питомої електропровідності (6.6) слідує, що опір металів (величина обернено пропорційна питомій електропровідності) повинен зростати пропорційно  $\langle V \rangle$ , а отже і пропорційно  $\sqrt{T}$ , що протирічить дослідним даним, згідно яких опір пропорційний  $T$ .

Щоб отримати за формулою (6.6) значення, яке б співпадало з дослідними даними, необхідно прийняти значно більшою, ніж це потребує теорія, тобто електрон повинен без зіткнень з іонами ґратки проходити сотні міжвузельних відстаней, що не узгоджується з теорією Друде-Лоренца.

Теплоємність метала складається з теплоємності його кристалічної ґратки і теплоємності електронного газу. Тому атомна (тобто розрахована на 1 моль) теплоємність метала повинна бути значно більшою, ніж атомна теплоємність діелектриків, у яких вільних електронів немає. Згідно закону Дюлонга-Пті,

теплоємність одноатомного кристала рівна  $3R$ . Врахуємо, що теплоємність одноатомного електронного газу рівна  $\frac{3}{2}R$ .

Таким чином, атомна теплоємність металів повинна бути рівною  $4,5R$ . Однак дослід доводить, що вона рівна  $3R$ . Отже наявність електронів провідності практично не впливає на значення теплоємності, що не пояснюється класичною електронною теорією.

Указані неузгодження теорії з дослідом можна пояснити тим, що рух електронів у металах не підлягає законам класичної механіки, а описується законами квантової механіки, і, відповідно, поведінку електронів провідності необхідно описувати не статистикою Максвела-Больцмана, а квантовою статистикою. Тому пояснити недоліки класичної теорії електропровідності металів можна лише квантовою теорією, яка буде розглянута пізніше. Однак треба відмітити, що класична теорія електропровідності металів не втратила свого значення і до теперішнього часу, так як у багатьох випадках вона дає правильні і якісні результати і являється у зрівняння з квантовою теорією достатньо простою і наглядною.

## 6.2. Емісійні явища та їх застосування.

Вільні електрони в металах утримуються позитивним іонами, які знаходяться у вузлах кристалічної решітки, силами електростатичного притягання, тому при невеликих температурах електрони практично не покидають метал. Робота, яку необхідно виконати, щоб вирвати електрони з поверхні металу у вакуум, називають **роботою виходу** [4-9].

Якщо електрон за певних умов покидає метал, то на його місці виникає надлишковий позитивний заряд (оскільки метал у цілому був нейтральний) і електрон притягується до індукованого їм самим позитивного заряду. Електрони, які покинули метал і відійшли від його поверхні на невелику відстань (порядку міжатомної відстані), створюють над поверхнею металу «електронну хмару», густина якої швидко зменшується з відстанню. Ця хмара разом з шаром позитивних іонів решітки утворюють так званий **подвійний електричний шар**, поле якого подібне полю плоского конденсатора. Товщина такого шару рівна

декільком міжатомним відстаням ( $10^{-10}$ – $10^{-9}$ м). Цей шар не створює поля у зовнішньому просторі, але перешкоджає виходу вільних електронів з металу.

Таким чином, електрон при виході з металу, повинен здолати затримуюче його електричне поле подвійного шару. Різниця потенціалів у цьому шарі, називається **поверхневим стрибком потенціалу** і визначається за формулою:

$$\Delta\varphi = \frac{A}{e},$$

де  $A$  - робота виходу,  $e$  - заряд електрона.

Робота виходу вимірюється в **електрон-вольтах (eВ)**: **1eВ** рівний роботі, яка виконується при переміщенні елементарного заряду (рівного заряду електрона) при проходженні ним різниці потенціалів в **1В**. (**1eВ =  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Дж**).

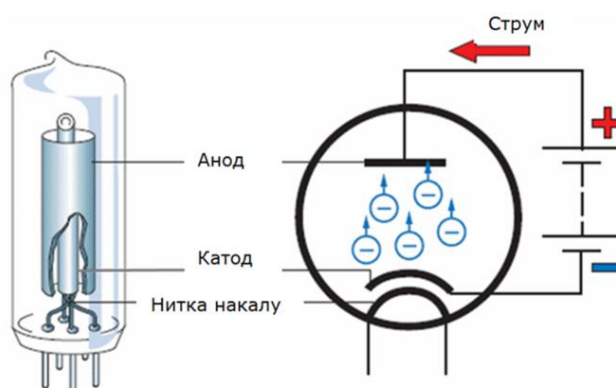
Робота виходу електрона залежить від хімічної природи металів і від чистоти їх поверхні і коливається у межах декількох електрон-вольт (наприклад, у калія  $A_{\text{вих}} = 2,2\text{eВ}$ , а у платини  $A_{\text{вих}} = 6,3\text{eВ}$ ). Роботу виходу можна значно зменшити, якщо на поверхню металу нанести певне покриття. Наприклад, якщо нанести на поверхню вольфраму ( $A_{\text{вих}} = 4,5\text{eВ}$ ) шар оксиду лужно-земельного металу (***Ca, Sr, Ba***), то робота виходу зменшиться до **2eВ**.

Якщо надати електронам у металах енергію, необхідну для подолання подвійного електричного шару, то в результаті цього буде спостерігатися явище випускання металами електронів – **явище електронної емісії**.

В залежності від способу надання електронам енергії розрізняють термоелектронну, фотоелектронну, вторинну електронну і автоелектронну емісії.

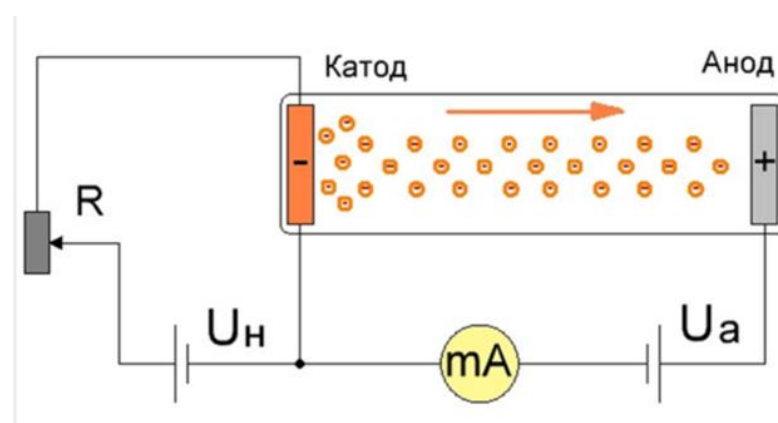
**Термоелектронна емісія** – це випускання електронів нагрітими металами. Концентрація вільних електронів у металах достатньо висока, тому навіть при невеликому підвищенні температури деякі електрони набувають енергії, достатньої для подолання подвійного електричного шару. З подальшим підвищенням температури, кінетична енергія теплового руху електронів збільшується та стає більшою за роботу виходу, і явище термоелектронної емісії стає помітним.

Дослідження закономірностей термоелектронної емісії можна провести за допомогою **вакуумного діода**, який представляє собою відкачаний балон, що має два електрода – катод  $K$  і анод  $A$ . У найпростішому випадку в якості катода може служити нитка з тугоплавкого металу (наприклад, вольфраму), яка розжарюється електричним струмом. Анод, як правило, має форму металевого циліндру навколо катода (рис.6.1).



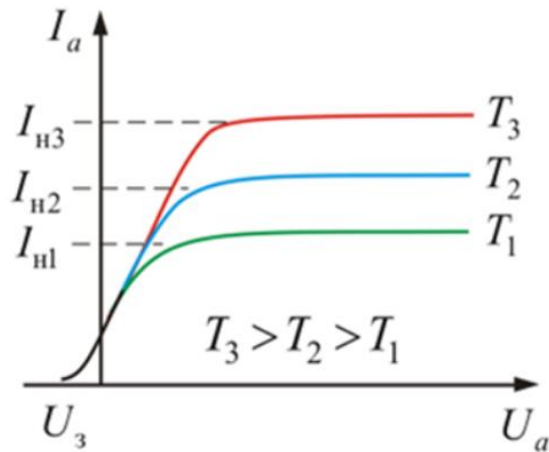
**Рис. 6.1.** Вакуумний діод

Якщо діод увімкнути у коло, як показано на рис.6.2, то при нагріванні катода і подачі на анод додатної напруги  $U_A$  (відносно катода) у анодному колі діода виникає струм. Якщо поміняти полярність джерела анодного струму, то струм припиниться, як би не нагрівали катод (напругою  $U_H$ ). Отже катод випускає від'ємно заряджені частинки – електрони.



**Рис.6.2.** Схема увімкнення діода у коло

Якщо підтримувати температуру накалу катода постійною і зняти залежність анодного струму  $I_A$  від анодної напруги  $U_A$  – **вольт-амперну характеристику** (рис.6.3), то виявляється, що вона не є лінійною.



**Рис. 6.3.** Вольт-амперні характеристики для різних температур катода

Залежність термоелектронного струму від анодної напруги в областях невеликих напруг описується **законом трьох других**:

$$I = BU^{\frac{3}{2}}, \quad (6.8)$$

де  $B$  - коефіцієнт, який залежить від форми і розмірів електродів, а також їх взаємного положення.

При збільшенні анодного струму струм зростає до деякого максимального значення  $I_{\text{нас}}$ , яке називають струмом насичення. Це означає, що майже всі електрони, які виходять з катода, досягають аноду, тому подальше збільшення напруженості поля не може призвести до збільшення термоелектронного струму. Таким чином, густина струму насичення характеризує емісійну здатність матеріалу катода.

Густина струму насичення визначається **формулою Річардсона-Дешмана**, яку було отримано на основі квантової статистики:

$$j_{\text{нас}} = CT^2 e^{-A/kT}, \quad (6.9)$$

де  $C$  - постійна, теоретично однакова для всіх металів, але це не підтверджується експериментально, що пояснюється поверхневими ефектами.

На рис.6.3 представлено вольт-амперні характеристики для різних температур катода: чим вища температура, тим випускання електронів більш інтенсивне, а отже і більший струм насичення. При  $U_A = 0$  спостерігається анодний струм, тобто деякі електрони, що вилітають з катода, мають енергію,

достатню для подолання подвійного шару і досягають аноду без прикладання електричного поля. Якщо прикласти анодну напругу у протилежній полярності, то при невеликих значеннях напруги анодний струм припиняється; така напруга називається **затримуючою напругою** (на графіку позначено  $U_3$ ).

Явище термоелектронної емісії використовується у приладах, в яких необхідно отримати потік електронів у вакуумі, наприклад в електронних лампах, рентгенівських трубках, електронних мікроскопах і т.д. Електронні лампи використовуються в електро- і радіотехніці, автоматиці і телемеханіці для випрямлення змінних струмів, посилення електричних сигналів і змінних струмів, генерування електромагнітних коливань.

### **Завдання для самоконтролю**

1. В чому полягає класична теорія електропровідності металів Друде-Лоренца?
2. В чому полягає опит Рікке?
3. Який результат отримали Толман і Стюарт?
4. Який фізичний зміст роботи виходу електрона з металу?
5. В чому полягає явище термоелектронної емісії?
6. Що таке вольт-амперна характеристика?
7. Запишіть формулу Річардсона-Дешмана.

## **РОЗДІЛ 7. Магнітне поле і його характеристики. Закон Біо-Савара-Лапласа і його застосування**

### **7.1. Магнітне поле і його характеристики.**

Магнітні явища тисячоліття тому були виявлені на природних матеріалах. Досвід засвідчував, що деякі залізні руди мають властивість притягувати до себе на близьких відстанях невеликі предмети (залізні ошурки, рудний порошок тощо). Цю властивість руд було названо магнетизмом, а самі предмети – природними магнітами.

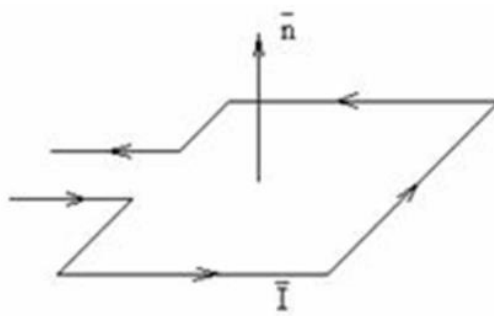
У 1820 р. датський фізик Ерстед помітив, що магнітна стрілка, розміщена поблизу провідника з струмом, відхиляється від початкового стану. Дослідження показали, що стрілка повертається і намагається розміститися так, щоб її вісь була перпендикулярна до провідника. Із зміною напрямку струму змінюється і

напрям повертання магнітної стрілки. Відкриття Ерстеда вказувало на існування суттєвих зв'язків між електричними і магнітними явищами [1-6].

Отже, подібно до того, як у просторі, що оточує електричні заряди, виникає електростатичне поле, так і у просторі, що оточує провідники зі струмом і постійні магніти, виникає силове поле, яке називають магнітним полем.

**Магнітне поле** – особливий вид матерії, що створюється рухомими електричними зарядами (струмами) і діє на рухомі заряди, провідники зі струмом та постійні магніти.

Подібно до того, як при дослідженні електростатичного поля використовувалися пробні точкові заряди, так при дослідженні магнітного поля використовують замкнений плоский контур зі струмом (рамку зі струмом), розміри якої малі у зрівнянні з відстанню до джерел досліджуваного магнітного поля. Орієнтація контуру в просторі характеризується напрямком позитивної нормалі  $\vec{n}$  до цього контуру. В якості позитивного напрямку нормалі приймається напрямок, пов'язаний зі струмом **правилом правого свердлика**, тобто за напрямком позитивної нормалі приймається напрямок поступального руху свердлика, головка якого обертається в напрямку струму, що протікає у рамці (рис. 7.1).



**Рис. 7.1.** Позитивний напрямок нормалі

Досліди показують, що магнітне поле певним чином орієнтує вміщений в нього контур зі струмом, тобто на контур з боку магнітного поля діє обертаючий момент сили:

$$\vec{M} = [\vec{P}_m \vec{B}] \quad (7.1).$$

Обертаючий момент сил залежить як від властивостей магнітного поля, що характеризується **вектором магнітної індукції**  $\vec{B}$ , так і від властивостей самого контуру, що характеризується його **магнітним моментом**  $\vec{P}_m$ .

Цей момент дорівнює нулю в рівноважному положенні контуру, а в деякому положенні він – максимальний.

Для плоского контуру зі струмом магнітний момент визначається за формулою:

$$\vec{P}_m = IS\vec{n} \quad (7.2),$$

де  $I$  - сила струму у контурі;  $S$ - площа контуру.

Якщо в дану точку магнітного поля поміщати рамки зі струмом з різними магнітними моментами, то на них будуть діяти різні обертаючі моменти, однак відношення максимального обертаючого моменту до магнітного моменту рамки для всіх контурів однакове і може служити характеристикою магнітного поля, яку називають магнітною індукцією:

$$B = \frac{M_{max}}{P_m} \quad (7.3).$$

Таким чином, **магнітна індукція** у даній точці однорідного магнітного поля визначається максимальним обертаючим моментом, що діє на рамку зі струмом з магнітним моментом, рівним одиниці, коли нормаль до рамки перпендикулярна до напрямку поля.

Напрямок  $\vec{B}$  визначається за напрямком магнітного моменту контуру зі струмом, який перебуває в рівноважному положенні.

В міжнародній системі СІ магнітна індукція вимірюється в Теслах:

$$[B] = [\text{Тл}]; \quad \text{Тл} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

У випадку довільної орієнтації контуру відносно поля, на нього діє обертовий момент:

$$M = BP_m \sin \alpha \quad (7.4),$$

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

В магнетизмі всі струми поділяються на **макроструми**, що зумовлені напрямленим рухом вільних носіїв (електронів, дірок, іонів), і **мікроструми**, що

зумовлені рухом електронів в атомах і молекулах; саме мікроструми створюють магнітні поля постійних магнітів. При відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні моменти мікрострумів, завдяки тепловому руху атомів, орієнтовані хаотично і їх магнітні поля компенсують одне одного. В зовнішньому магнітному полі магнітні моменти атомів орієнтуються вздовж ліній поля; сумарне поле мікрострумів стає відмінним від нуля і додається до поля макроструму. Тому результуюче магнітне поле в середовищі буде відрізнятися від поля макроструму:  $B = \mu B_0$ , де  $\mu$  - магнітна проникність середовища (магнетика), яка показує, у скільки разів магнітне поле в середовищі відрізняється від поля макроструму у вакуумі, тобто

$$\mu = \frac{B}{B_0} \quad (7.5).$$

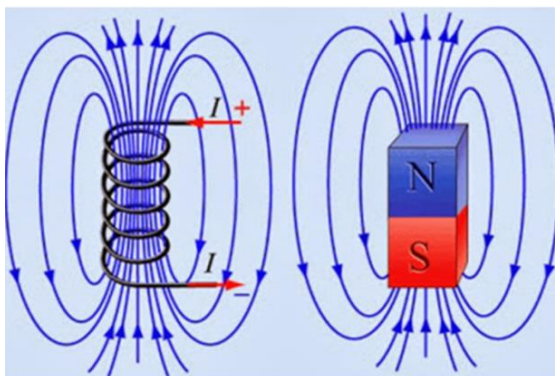
Для вакууму  $\mu = 1$ .

Історично склалось так, що поле макрострумів характеризується іншою характеристикою – **напруженістю магнітного поля ( $H$ )**. В системі СІ напруженість магнітного поля вимірюється в  $[H] = \left[ \frac{A}{m} \right]$ . Між двома характеристиками магнітного – індукцією і напруженістю поля існує зв'язок:

$$B = \mu \mu_0 H \quad (7.6),$$

$$\text{де } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{A^2}.$$

Для графічного зображення магнітного поля використовують лінії магнітної індукції, які проводяться так, щоб дотична до них в кожній точці співпадала з напрямком вектора  $\vec{B}$  в цій точці. Лінії магнітної індукції проводяться з такою густиною, щоб число ліній, які перетинають нормальну до них площадку одиничної площі чисельно дорівнювало модулю вектора індукції магнітного поля в даному місці простору. Лінії магнітної індукції не мають ні початку, ні кінця, вони або замикаються навколо провідників зі струмом, або ідуть з нескінченності в нескінченність. Їх напрямок встановлюється згідно з правилом свердлика. На рис.7.2 наведено приклад зображення силових ліній постійного магніту (зправа) і котушки зі струмом (зліва).



**Рис. 7.2.** Силлові лінії постійного магніту і котушки зі струмом

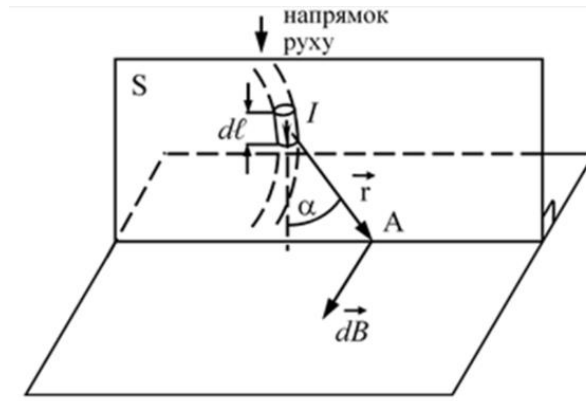
Магнітне поле називається однорідним, якщо у всіх його точках. Лінії індукції однорідного поля – паралельні прямі, проведені з однаковою густиною. Прикладом практично однорідного поля є поле всередині нескінченно довгого соленоїда (рис.7.2).

## 7.2. Принцип суперпозиції. Закон Біо-Савара-Лапласа.

Для магнітних полів справедливий **принцип суперпозиції**: індукція магнітного поля, створеного в певній точці простору кількома струмами, дорівнює векторній сумі індукцій полів, створених в цій точці кожним струмом зокрема,

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n \quad (7.7).$$

Магнітне поле, створене провідником зі струмом залежить від форми провідника, сили струму у ньому і відстані від провідника до даної точки поля. Магнітне поле постійних струмів різної форми вивчалось французькими вченими Ж. Біо і Ф. Саваром. Результати цих дослідів були узагальнені французьким математиком і фізиком П. Лапласом. Тому закон, за допомогою якого можна розрахувати магнітне поле, створене провідником зі струмом носить назву **закону Біо-Савара-Лапласа**: будь-який елемент провідника довжиною  $dl$  зі струмом  $I$  створює в точці  $A$  на відстані  $r$  від елемента провідника магнітне поле, магнітна індукція  $d\vec{B}$  якого прямо пропорційна довжині елемента  $dl$ , величині струму  $I$ , синусу кута  $\alpha$  між напрямом струму та радіус-вектором  $\vec{r}$ , що з'єднує даний елемент із точкою поля, та обернено пропорційна квадрату довжини радіус-вектора (рис.7.3).



**Рис. 7.3.** Магнітне поле провідника зі струмом

Математично закон Біо і Савара-Лапласа у диференціальній формі записується наступним чином:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3} \quad (7.8).$$

Вектор  $d\vec{B}$  перпендикулярний до площини  $S$ , в якій лежать вектори  $\vec{r}$  і  $d\vec{l}$  (цей вектор співпадає з напрямком струму), а його напрямок визначається за правилом правого свердлика: якщо обертати рукоятку свердлика від кінця вектору  $d\vec{l}$  до кінця вектору  $\vec{r}$  по найкоротшому шляху, то поступальний рух свердлика співпадає з напрямком вектору  $d\vec{B}$  (рис.7.3).

Модуль вектору  $d\vec{B}$  визначається виразом:

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin\alpha}{r^2} \quad (7.9),$$

де  $\alpha$ - кут між елементом провідника  $d\vec{l}$  і радіус вектором  $\vec{r}$ .

Розрахунок індукції магнітного поля за наведеним законом у певних випадках достатньо складний. Однак, якщо розподіл струму має певну симетрію, то застосування закону Біо-Савара-Лапласа разом з принципом суперпозиції дозволяє достатньо просто розрахувати певні поля.

### **7.3. Застосування закону Біо-Савара-Лапласа для знаходження індукції магнітного поля.**

Закон Біо-Савара-Лапласа у диференціальній формі (7.8) і (7.9) дозволяє розрахувати індукцію магнітного поля створеного елементом провідника зі

струмом. Згідно принципу суперпозиції загальна індукція магнітного поля створеного провідником в цілому буде рівна векторній сумі індукцій полів, створених кожним елементом провідника в окремоті, тобто для провідника довжиною  $l$  на певній відстані від провідника індукцію можна знайти за формулою:

$$\vec{B} = \int_L d\vec{B} = \int_L \frac{\mu\mu_0 I [d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3} \quad (7.10).$$

Таким чином для знаходження індукції магнітного поля створеного провідником зі струмом, необхідно розбити цей провідник на елементарні частини довжиною  $dl$  і проінтегрувати по всій довжині провідника згідно рівнянню (7.10).

Розглянемо наступні приклади знаходження індукції магнітного поля провідників зі струмом.

### 1. Магнітне поле прямого струму.

У довільній точці  $A$  (рис.7.4), віддаленій від прямого провідника на відстань  $r_0$ , вектори  $d\vec{B}$  від усіх елементів струму мають однаковий напрямок, перпендикулярний до площини малюнку («від нас»).

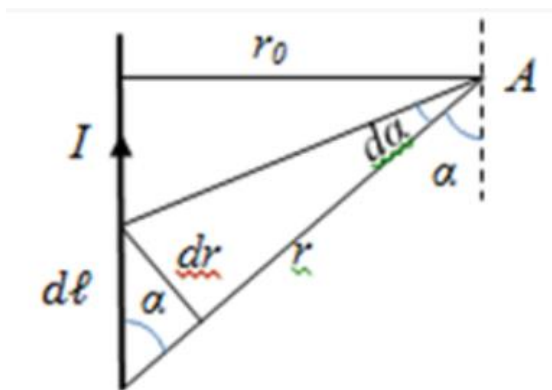


Рис. 7.4. Магнітне поле прямого струму

Тому складання векторів  $d\vec{B}$  можна замінити складанням їх модулів. В якості постійної інтегрування виберемо кут  $\alpha$  (між  $dl$  і  $\vec{r}$ ), виразивши через нього усі інші параметри. З рис.7.4 слідує, що:

$$r = \frac{r_0}{\sin\alpha} \quad dl = \frac{r d\alpha}{\sin\alpha}$$

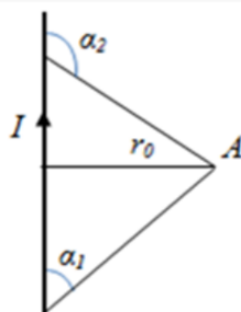
Підставимо ці величини у рівняння закону Біо-Савара-Лапласа (7.9), отримаємо магнітну індукцію, що створюється у даній точці одним елементом провідника:

$$dB = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r_0} \sin\alpha \, d\alpha.$$

Отже індукція магнітного поля створеного прямим провідником у точці  $A$ , віддаленій від провідника на відстань  $r_0$  можна визначити, розрахувавши інтеграл:

$$B = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r_0} \sin\alpha \, d\alpha \quad (7.11).$$

Для провідника прямого кінцевої довжини,  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  (рис.7.5) приймають певні значення в залежності від довжини провідника і відстані до даної точки.



**Рис. 7.5.** Магнітне поле прямого провідника кінцевої довжини

Результат інтегрування в певних межах кута  $\alpha$  дасть нам формулу, за допомогою якої можна розрахувати індукцію магнітного поля **прямого провідника зі струмом**:

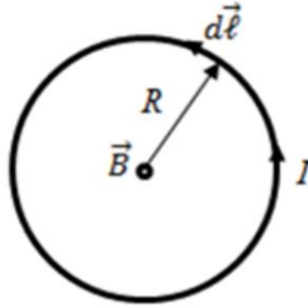
$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) \quad (7.12).$$

Прямий провідник вважають нескінченно довгим, якщо. Для даного випадку межі інтегрування виразу (7.11) будуть від  $0$  до  $\pi$ . Отже індукцію магнітного поля **прямого нескінченно довгого провідника зі струмом** можна розрахувати за формулою:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi r_0} \quad (7.13).$$

## 2. Магнітне поле у центрі колового провідника зі струмом.

Розіб'ємо коловий провідник радіусом  $R$ , по якому проходить струм  $I$  на елементарні частини  $d\vec{l}$ . (рис.7.6). Кожен з елементів колового провідника створює у центрі кола поле  $d\vec{B}$  однакового напрямку (на даному рисунку – «на нас»).



**Рис. 7.6.** Магнітне поле у центрі колового провідника зі струмом

Тому складання векторів  $d\vec{B}$  можна замінити складанням їх модулів. Оскільки всі елементи провідника перпендикулярні до радіус-вектору ( $\sin\alpha = 1$ ) і відстань від всіх елементів провідника до центру кругового витка однакова і рівна  $R$ , то  $dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^2} dl$ .

Отже індукція загального поля створеного **круговим витком зі струмом у його центрі**:

$$B = \int_0^L \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^2} dl = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^2} \int_0^{2\pi R} dl = \mu\mu_0 \frac{I}{2R};$$
$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2R} \quad (7.14).$$

### Завдання для самоконтролю

1. Чим відрізняється магнітне поле від електричного?
2. Як визначається магнітна індукція у даній точці однорідного магнітного поля?
3. Який зв'язок між індукцією і напруженістю магнітного поля?
4. Який вигляд має закон Біо-Савара-Лапласа у диференціальній формі?
5. За якою формулою розраховується індукцію магнітного поля прямого провідника зі струмом та провідника кінцевої довжини.

6. За якою формулою розраховується магнітне поле у центрі колового витка зі струмом та у його центрі?

## РОЗДІЛ 8. Дія магнітного поля на струм і рухомий заряд. Ефект Хола

### 8.1. Закон Ампера. Взаємодія паралельних струмів

У попередніх лекціях було з'ясовано, що магнітне поле діє на рухомі електричні заряди, а отже і на провідники зі струмом. Узагальнюючи результати дослідів по дії магнітного поля на різні провідники зі струмом, Ампер встановив, що сила  $d\vec{F}$  (сила Ампера), з якою магнітне поле діє на елемент провідника  $d\vec{l}$  зі струмом (напрямок елемента провідника співпадає з напрямком струму в ньому), який знаходиться в магнітному полі, прямо пропорційна силі струму  $I$  в провіднику і векторному добутку елемента  $d\vec{l}$  провідника на магнітну індукцію  $\vec{B}$ :

$$d\vec{F} = I[d\vec{l}, \vec{B}] \quad (8.1).$$

У скалярному вигляді модуль сили Ампера розраховують за формулою:

$$dF = IBdl \sin\alpha \quad (8.2),$$

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

Напрямок сили Ампера може бути визначено за загальним правилом векторного добутку, або за **правилом лівої руки**: якщо долоню лівої руки розмістити так, щоб в неї входив вектор  $\vec{B}$ , а чотири витягнутих пальці вказували на напрямок струму в провіднику, то відігнутий великий палець вкаже на напрямок сили Ампера, що діє на струм (рис.8.1) [1-10].

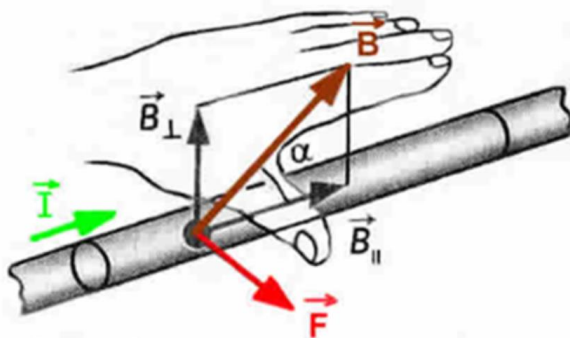


Рис. 8.1. Напрямок сили Ампера

Іноді виникають труднощі при використанні правила лівої руки у випадку, коли кут  $\alpha$  достатньо малий. Важко визначити де повинна знаходитися відкрита долонь. Тому для спрощення застосування цього правила долонь розміщують так, щоб в неї входив вектор нормальної складової вектора  $\vec{B}$  (перпендикулярної до елемента провідника).

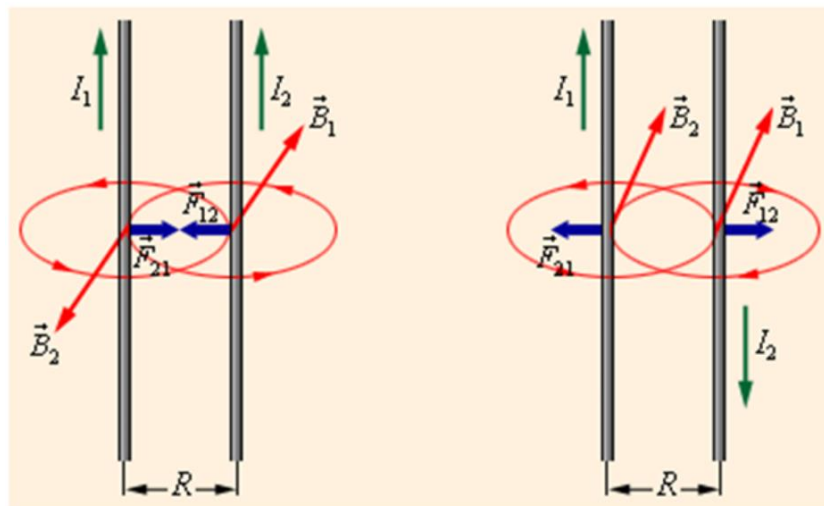
Формули (8.1) і (8.2) дозволяють визначати силу Ампера, що діє на малий елемент провідника зі струмом. Щоб знайти силу Ампера, яка діє на провідник кінцевої довжини  $L$ , необхідно просумувати дії цієї сили на кожний елемент провідника, тобто проінтегрувати:

$$F = \int_L IBdl \sin\alpha \quad (8.3).$$

Для прямого провідника зі струмом формула (8.3) дає вираз:

$$F = IBL \sin\alpha \quad (8.4).$$

Закон Ампера застосовують для визначення сили взаємодії двох струмів. Розглянемо взаємодію двох прямих нескінченно довгих провідників зі струмом, розміщених паралельно один одному на відстані  $R$  (рис.8.2).



**Рис. 8.2.** Взаємодію двох прямих нескінченно довгих провідників зі струмом

Дослід показує, що такі провідники притягуються один до одного, якщо струми в них мають однаковий напрям (паралельні), і відштовхуються, коли струми напрямлені протилежно (антипаралельні). Взаємодію паралельних струмів неважко пояснити, якщо врахувати, що кожний із провідників створює

магнітне поле, яке, за законом Ампера, діє на інший провідник зі струмом. Визначимо спочатку силу  $\vec{F}_{21}$ , з якою діє магнітне поле з індукцією  $\vec{B}_2$ , що створюється струмом  $I_2$ , на провідник зі струмом  $I_1$ :

$$F_{21} = I_1 B_2 l \sin\alpha \quad (8.5).$$

де  $l$  - довжина елемента першого провідника, на який діє сила  $\vec{F}_{21}$ .

$\sin\alpha$ ;  $B_2 = \frac{\mu\mu_0 I_2}{2\pi R}$  - за законом Біо-Савара-Лапласа.

Отже 
$$F_{21} = I_1 \frac{\mu\mu_0 I_2}{2\pi R} l \quad (8.6).$$

Аналогічно можна дістати формулу для сили  $\vec{F}_{12}$ , з якою магнітне поле, що створюється струмом  $I_1$ , діє на провідник зі струмом  $I_2$ :

$$F_{12} = I_2 \frac{\mu\mu_0 I_1}{2\pi R} l \quad (8.7).$$

Отже, сили  $\vec{F}_{21}$  і  $\vec{F}_{12}$  однакові за значенням і напрямлені протилежно, якщо струми мають однаковий напрямок, тобто такі провідники притягаються один до одного; якщо струми спрямовані в протилежних напрямках, то такі провідники відштовхуються один від одного з однаковими за модулем силами. Таким чином, сила взаємодії двох прямолінійних нескінченно довгих паралельних провідників у розрахунку на відрізок провідника прямо пропорційна добутку сил струмів і обернено пропорційна відстані між ними. Це твердження називається законом взаємодії струмів:

$$F_l = \frac{F}{l} = \frac{\mu\mu_0 I_1 I_2}{2\pi R} \quad (8.8).$$

Користуючись законом взаємодії струмів, можна встановити одиницю сили струму, за яку в СІ беруть ампер (А) — силу такого постійного струму, при проходженні якого по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини і дуже малої площі колового поперечного перерізу, що містяться у вакуумі на відстані 1 м один від одного, виникає сила електромагнітної взаємодії між провідниками, яка дорівнює  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на кожний метр довжини.

Виходячи з цього визначення Ампера та формули (8.8), неважко довести, що  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{А}\cdot\text{м}}$

Магнітна індукція виражається в теслах (Тл). Тесла — магнітна індукція такого однорідного магнітного поля, що діє з силою  $1\text{Н}$  на кожний метр довжини прямолінійного провідника, який розміщений перпендикулярно до напрямку поля, якщо по цьому провіднику проходить струм силою  $1\text{А}$ :

$$1\text{Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А}\cdot\text{м}}.$$

За одиницю напруженості магнітного поля, яку називають ампер на метр ( $\text{А}/\text{м}$ ), беруть напруженість такого поля  $[\text{Н}]$ , магнітна індукція якого у вакуумі дорівнює  $4\pi \cdot 10^{-7}\text{Тл}$ .

## 8.2. Сила Лоренца.

Дослід показує, що магнітне поле діє не тільки на провідники зі струмом, а й на окремі заряди, що рухаються у магнітному полі. Сила, що діє на електричний заряд  $q$ , що рухається у магнітному полі  $\vec{B}$  із швидкістю  $\vec{v}$ , називається **силою Лоренца** і виражається формулою:

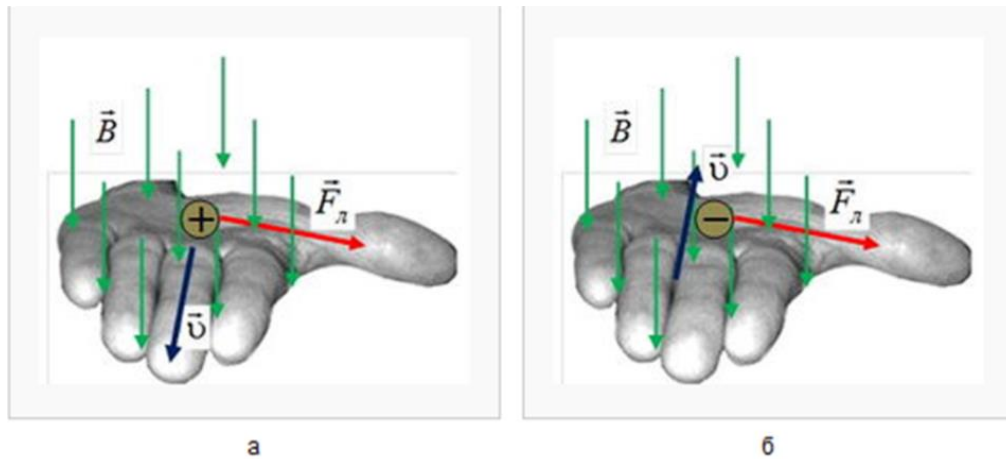
$$\vec{F}_L = q[\vec{v} \vec{B}] \quad (8.9).$$

Напрямок сили Лоренца визначається за **правилом лівої руки**: якщо долоню лівої руки розмістити так, щоб в неї входив вектор магнітної індукції  $\vec{B}$ , а чотири витягнутих пальці були спрямовані вздовж напрямку руху позитивного заряду, то відігнутий великий палець вкаже на напрямок сили Лоренца (рис.8.3а) [1-10]. Якщо необхідно знайти напрямок сили Лоренца, що діє на негативний заряд, то чотири пальці необхідно спрямувати проти напрямку руху заряду (рис.8.3б).

Модуль сили Лоренца визначається за формулою:

$$F_L = qvB \sin\alpha \quad (8.10),$$

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



**Рис. 8.3.** Напрямок сили Лоренца

Зазначимо ще раз, що магнітне поле діє лише на **рухомий заряд**. У цьому відмінність магнітного поля від електричного. Електричне ж поле діє як на рухомий, так і на нерухомий заряд.

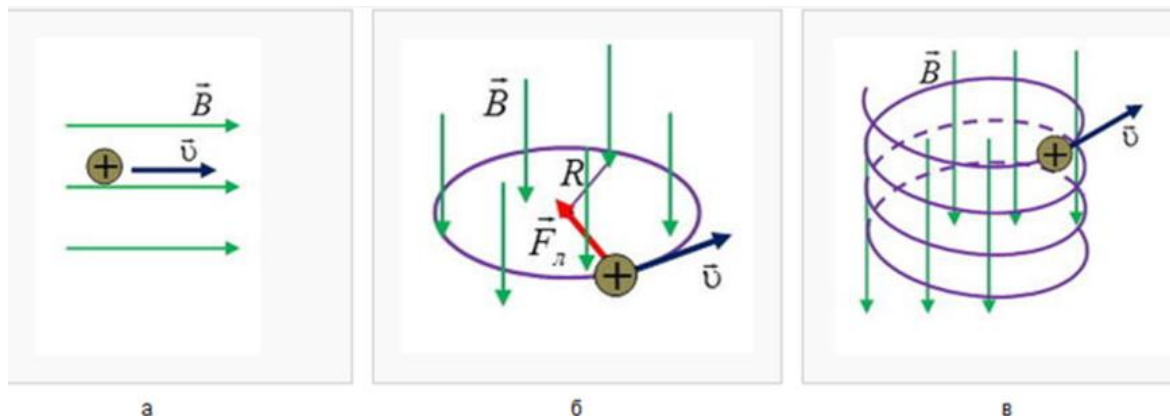
Сила Лоренца завжди перпендикулярна до напрямку вектора швидкості заряду, тому вона змінює лише напрямок руху, не змінюючи модуль швидкості. Іншими словами, постійне магнітне поле не виконує роботи над зарядом, що рухається і кінетична енергія зарядженої частинки при русі у магнітному полі не змінюється.

Вираз (8.9) для сили Лоренца дозволяє знайти ряд закономірностей руху заряджених частинок у магнітному полі.

Якщо заряджена частинка рухається у магнітному полі із швидкістю  $\vec{v}$  вздовж ліній магнітної індукції, то кут  $\alpha$  рівний або  $0$ , або  $\pi$ . Тоді, згідно формулі (8.10), сила Лоренца буде рівна нулю, тобто магнітне поле на заряджену частинку не діє і вона буде рухатися прямолінійно і рівномірно (рис.8.4а).

Якщо заряджена частинка рухається у магнітному полі із швидкістю  $\vec{v}$  перпендикулярно до ліній магнітної індукції ( $\alpha = 90^0$ ), то сила Лоренца буде постійною за модулем, рівною  $F_L = qvB$  і нормальною до траєкторії руху частинки. Згідно законам динаміки, ця сила створює доцентрове прискорення, отже частинка буде рухатися по колу радіусом  $R$  (рис.8.4б), який визначається з умови:  $qvB = \frac{mv^2}{R}$  (де  $m$ - маса зарядженої частинки), звідки

$$R = \frac{m v}{q B} \quad (8.11).$$



**Рис. 8.4.** Рух зарядженої частинки в магнітному полі

Оскільки частинка рухається по колу з постійною за модулем швидкістю, то її рух можна характеризувати періодом обертання:

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{B q} \quad (8.12).$$

Таким чином, період обертання зарядженої частинки у магнітному полі визначається лише величиною, оберненою до питомого заряду  $\left(\frac{q}{m}\right)$  частинки, і магнітної індукції поля, але не залежить від її швидкості. На цьому заснований принцип роботи циклічних прискорювачів заряджених частинок.

Якщо швидкість  $\vec{v}$  зарядженої частинки спрямована під деяким кутом  $\alpha$  (відмінним від нуля і не рівним  $90^\circ$ ) до ліній магнітної індукції, то її рух можна представити, як накладання рівномірного прямолінійного руху вздовж поля з швидкістю  $v_{\parallel} = v \cos\alpha$  і рівномірного руху зі швидкістю  $v_{\perp} = v \sin\alpha$  по колу радіусом  $R$ , що визначається формулою (8.11), в якій  $v = v_{\perp}$ . В результаті накладання таких видів руху виникає рух по спіралі (рис.8.4в), вісь якої паралельна лініям магнітної індукції. Крок гвинтової лінії:

$$h = v_{\parallel} T = v T \cos\alpha \quad (8.13).$$

Напрямок, у якому закручується спіраль залежить від знаку зарядженої частинки.

Якщо швидкість  $\vec{v}$  зарядженої частинки складає кут  $\alpha$  з напрямком вектора  $\vec{B}$  **неоднорідного** магнітного поля (тобто такого, що змінюється від однієї до іншої точки простору), індукція якого зростає в напрямку руху

частинки, то  $R$  і  $h$  зменшуються зі зростанням  $\vec{B}$ . На цьому засновано принцип фокусування пучку заряджених частинок у магнітному полі.

### 8.3. Ефект Холла

Електричний струм у провідниках або напівпровідниках представляє собою впорядкований рух заряджених частинок. Якщо провідник або напівпровідник, по якому йде електричний струм помістити у магнітне поле, яке спрямовано перпендикулярно напрямку електричного струму, то на носії заряду буде діяти магнітне поле.

На рис.8.5а зображено перетин металевого провідника прямокутної форми, по якому протікає електричний струм. Електрони провідності схематично зображені кружечками зі знаком “-”, а позитивні іони, що утворюють жорстку кристалічну ґратку суцільного металевого провідника, – кружечками зі знаком “+”. Під впливом електричного поля напруженістю  $\vec{E}$  електрони дрейфують ліворуч зі швидкістю  $\vec{v}$ .

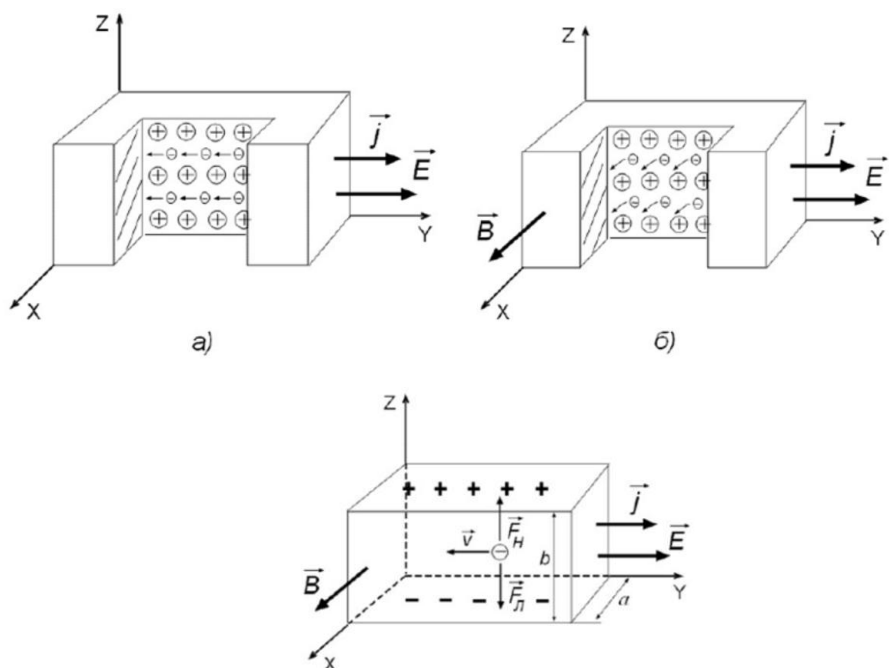


Рис. 8.5. Ефект Холла

Оскільки заряди електронів негативні, то струм протікає у напрямку осі  $Y$ . Густина струму  $\vec{j}$ , згідно з законом Ома у диференціальній формі:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \text{ де } \sigma \text{ – питома електропровідність металу.}$$

Якщо у напрямку осі  $X$  увімкнати зовнішнє магнітне поле з індукцією  $\vec{B}$ , то під дією сили Лоренца напрямок дрейфової швидкості руху електронів зміниться (рис.8.5б). Електрони відхилятимуться вниз і скупчуватимуться на нижній грані провідника, тому на нижній грані провідника створюватиметься підвищена “концентрація електронів”, а відповідно на верхній грані – занижена (надлишок позитивних зарядів). У результаті виникає поперечне електричне поле, напруженість якого  $\vec{E}_H$ , спрямована від верхньої грані до нижньої. Це поле діє на кожен вільний електрон із силою:  $\vec{F}_H = -e\vec{E}_H$ , спрямованою від нижньої до верхньої грані провідника. Процес збільшення “концентрації електронів” на нижній грані провідника і відповідного збільшення позитивних зарядів на верхній грані провідника відбуватиметься доти, доки величини сил поперечного електричного поля і магнітного поля, що діють на вільний електрон, не зрівноважаться (як видно з рис.8.5в, вони спрямовані протилежно). Отже, можна записати таке співвідношення:  $e\vec{E}_H = e[\vec{v} \vec{B}]$  або, з урахуванням напрямку векторів,  $eE_H = evB$ , звідки:

$$E_H = vB \quad (8.14).$$

У стаціонарному стані (якого досягають дуже швидко) рух електронів у середньому має горизонтальний напрямок (за умов, вказаних на рис.8.5а) всередині металу з’являється поперечне електричне поле, напруженість якого визначається за формулою (8.14). Це поле діє на позитивні іони кристала із силою, спрямованою донизу. Провідник при цьому притискується до опори, а за її відсутності – прискорено рухається донизу.

Виникнення у металі (або напівпровіднику) зі струмом густиною  $\vec{j}$ , поміщеному в магнітне поле з індукцією  $\vec{B}$ , електричного поля, спрямованого перпендикулярно до напрямку струму і магнітного поля, називається **ефектом Холла**.

Це явище, вперше виявлене у 1879 р. американським фізиком Е.Х. Холлом на пластинці золота, і було назване **ефектом Холла**, або поперечним

гальваномагнітним явищем, оскільки тоді ще не було з'ясовано природи провідності металів [5-9].

Визначимо залежність напруженості поперечного електричного поля від сили струму, який протікає по провіднику, індукції зовнішнього магнітного поля та розмірів пластини.

Запишемо густину струму у вигляді:

$$j = nev, \quad \text{де } n - \text{ концентрація носіїв заряду. Звідки:}$$

$$v = \frac{j}{ne} \quad (8.15).$$

Підставимо рівняння (8.15) у (8.14) і одержимо:

$$v = \frac{1}{ne} B_j = R_H B_j, \quad (8.16)$$

$$\text{де} \quad R_H = \frac{1}{ne} \quad (8.17)$$

**постійна Холла**, одержана без урахування розподілу електронів за швидкостями.

Точніший розрахунок, з урахуванням закону розподілу електронів за швидкостями і з використанням класичної статистики, приводить до виразу для сталої Холла:

$$R_H = \frac{3\pi}{8en} \quad (8.18).$$

У разі використання статистики Фермі–Дірака одержуємо вираз (8.17).

До напівпровідників, в яких концентрація електронів менша ніж у металах, застосовують класичну статистику, а для обчислення постійної Холла використовують формулу (8.18).

Постійна Холла обернено пропорційна до концентрації носіїв електричного заряду. Одиниці її вимірювання у системі СІ:  $[R_H] = \frac{\text{м}^3}{\text{Кл}}$ .

На практиці зручніше вимірювати не напруженість електричного поля  $E_H$ , а **різницю потенціалів Холла**  $U_H$ , що виникає між гранями металевої пластинки, та силу струму  $I$  замість густини струму  $j$ . Для цього рівняння (8.14)

помножимо на площу поперечного перерізу пластини  $S = a b$  (див. рис.8.5в).

Тоді  $a b E_H = R_H B j S = R_H B I$ .

Вважаючи холлівське електричне поле в пластині однорідним, можна записати

$$U_H = b E_H \quad (8.19).$$

Отже,

$$U_H = R_H \frac{B I}{a}, \quad (8.20)$$

де  $a$  – лінійний розмір пластини у напрямку магнітного поля.

Величини  $U_H$ ,  $B$ ,  $I$  та  $a$  можна виміряти експериментально і за їх значеннями обчислити постійну Холла:

$$R_H = \frac{U_H a}{B I}, \quad (8.21).$$

За виміряними значеннями постійної Холла можна визначити:

- 1) концентрацію носіїв струму в провідниках і напівпровідниках;
- 2) тип провідності, тобто знак носіїв струму в напівпровіднику, оскільки знак постійної Холла збігається зі знаком заряду носіїв струму.

### **Завдання для самоконтролю**

1. За якою формулою розраховують модуль сили Ампера?
2. Як визначається напрямок сили Ампера?
3. За якою формулою розраховують модуль сили Лоренца?
4. Як визначається її напрямок?
5. За якою формулою розраховується радіус траєкторії і період обертання зарядженої частинки в магнітному полі?
6. В чому полягає ефект Холла?

## **ГЛАВА 9. Явище електромагнітної індукції. Коливальний контур. Змінний струм. Магнітне поле у речовині**

### **9.1. Явище електромагнітної індукції. Самоіндукція**

Відкриття Ерстеда та Ампера про існування магнітного поля навколо провідника зі струмом (1820 р.) сформували припущення, що електричні та

магнітні явища досить суттєво пов'язані і електричне поле можна одержати за рахунок магнітного. Зв'язок магнітного поля з і струмом призвела до багатьох чисельних спроб збудити струм у контурі за допомогою магнітного поля. Ця фундаментальна задача була блискуче розв'язана 1831 році англійським фізиком М. Фарадеєм, який показав, що змінне в часі магнітне поле супроводжується змінним електричним струмом. Це явище названо електромагнітною індукцією.

Явище, відкрите Фарадеєм, виявляється найпростішим дослідом: коли провідник та магніт знаходяться у відносному спокої, чутливий гальванометр не фіксує наявності електричного струму; якщо ж провідник чи магніт приводяться у відносний рух – в колі відразу ж з'являється електричний струм. Цей струм існує доти, поки здійснюється відносний рух провідника та магніту. Напрямок струму залежить від напрямку переміщення провідника та напрямку вектора індукції магнітного поля [1-4].

Цей струм названо індукційним, а причину його виникнення, на перший погляд, можна пояснити дією сили Лоренца на рухомі електричні заряди. Під час руху провідника разом із ним переміщуються вільні електричні заряди (електрони), на які діє сила Лоренца. Під дією цієї сили електрони зміщуються до одного з кінців провідника, внаслідок чого другий кінець провідника зарядиться позитивно. Отже, між кінцями провідника виникає різниця потенціалів, що на перший погляд, і є причиною руху носіїв струму в зовнішньому електричному колі.

Явище виникнення індукційного струму ефективніше досліджувати не за допомогою прямого провідника, а за допомогою котушки незмінної форми із значною кількістю витків дроту, оскільки при цьому величина індукційного струму зростає пропорційно до кількості витків в котушці. Фарадеєм було проведено ряд різноманітних дослідів, які дозволили встановити природу електромагнітної індукції. Розглянемо деякі з них.

Індукційний струм у замкненому контурі (котушці) може спостерігатися у наступних випадках:

- при русі магніту відносно котушки (або навпаки);

- при русі двох котушок відносно одна одної (якщо через одну з котушок пропускають електричний струм);
- при зміні струму в колі однієї з котушок (за допомогою реостату, або при замиканні чи розмиканні кола), які вставлені одна в одну;
- при обертанні замкненого контуру у постійному магнітному полі;
- при обертанні постійного магніту всередині замкненого контуру.

Здогадка Фарадея використати в якості джерела магнітного поля іншу котушку остаточно переконала його в тому, що він дійсно відкрив нове явище природи, яке не можна пояснити дією сили Лоренца. Дійсно, якщо зміна електричного струму в одній з котушок буде призводити до виникнення струму в іншій котушці, причому його напрямок буде залежати як від напрямку зміни сили струму, так і від того, розмикається чи замикається коло, то в даному випадку не рухається ні провідник, ні магнітне поле, але індукційний струм виникає.

Оскільки магнітне поле не діє на нерухомі заряди в провіднику, то можна припустити, що під час зміни індукції магнітного поля, яке пронизує контур замкнутого провідника, навколо цього змінного поля виникає індукційне електричне поле, яке й діє на нерухомі електричні заряди і викликає індукційний струм в замкнутому провіднику. Важливо зрозуміти, що виникнення індукційного електричного поля навколо змінного магнітного зовсім не пов'язано з наявністю в цій точці простору провідника. Наявність провідника лише дає змогу виявити це поле за збудженим ним електричним струмом.

Таким чином можна узагальнити: **явище електромагнітної індукції** полягає в тому, що змінне магнітне поле супроводжується виникненням у навколишньому просторі індукційного електричного поля, яке в свою чергу збуджує в замкнутому провіднику індукційний струм.

Кількісний опис явища електромагнітної індукції виконують на основі встановлення зв'язку між ЕРС індукції і фізичною величиною, яку називають магнітним потоком, що залежить від значень вектора магнітної індукції  $\vec{B}$  не в одній точці, а в усіх точках поверхні, обмеженої плоским замкненим контуром.

**Магнітним потоком** (або потоком вектора магнітної індукції  $\vec{B}$ ) через деяку елементарну поверхню  $dS$  називається скалярна фізична величина, що визначається скалярним добутком:

$$d\Phi = (\vec{B}, d\vec{S}) = B dS \cos\alpha = B_n dS \quad (9.1)$$

де  $\alpha$ - це кут між позитивною нормаллю  $\vec{n}$  до елементарної поверхні  $dS$  і вектором індукції  $\vec{B}$ .

Напрямок вектора елементарної поверхні  $d\vec{S}$  співпадає з напрямком позитивної нормалі  $\vec{n}$ , напрямком якої, в свою чергу, визначається за допомогою «правила свердлика», оскільки зазвичай потік вектора  $\vec{B}$  зв'язують з певним контуром, по якому йде електричний струм  $i$ .

В системі СІ магнітний потік вимірюють у веберах  $[\Phi] = [Вб]$ .

Магнітний потік, рівний 1 Вб, створюється магнітним полем з індукцією 1 Тл, яке пронизує по напрямку нормалі плоский контур площею 1 м<sup>2</sup>.

Потік вектора магнітної індукції  $\Phi$  через довільну поверхню  $S$  рівний:

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B_n dS \quad (9.2)$$

Для однорідного поля  $\vec{B}$  і плоскої поверхні площею  $S$ , нормаль якої розміщена під кутом  $\alpha$  до вектора індукції, визначається за формулою:

$$\Phi = BS \cos\alpha \quad (9.3)$$

**Теорема Гауса для поля  $\vec{B}$ :** потік вектора магнітної індукції через будь-яку замкнену поверхню рівний нулю:

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (9.4)$$

Ця теорема відображає факт відсутності магнітних зарядів, внаслідок чого лінії магнітної індукції не мають ні початку, ні кінця, тобто являються замкненими.

Узагальнюючи результати своїх дослідів, Фарадей прийшов до кількісного закону електромагнітної індукції. Він показав, що кожного разу, коли виникає

зміна зціпленого з контуром магнітного потоку, в контурі виникає індукційний струм; виникнення в контурі індукційного струму вказує на наявність в колі електрорушійної сили, яку називають **ЕРС електромагнітної індукції** ( $\varepsilon_i$ ). Значення індукційного струму, а відповідно, і ЕРС електромагнітної індукції *визначається тільки швидкістю зміни магнітного потоку*.

За **законом електромагнітної індукції Фарадея** (перший закон Фарадея), яка б не була причина зміни потоку магнітної індукції через замкнений провідний контур, ЕРС електромагнітної індукції, що виникає в цьому контурі чисельно дорівнює і протилежна за знаком швидкості зміни магнітного потоку крізь поверхню, обмежену цим контуром:

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (9.5)$$

Знак «-» в цьому законі є математичним виразом **правила Ленца** – загального правила для знаходження напрямку індукційного струму: індукційний струм в контурі має завжди такий напрямок, щоб створене ним магнітне поле протидіяло зміні магнітного поля, яке визвало цей індукційний струм.

Як вже було зазначено, при проходженні електричного струму крізь провідник, навколо нього виникає магнітне поле, індукція якого прямо пропорційна (за законом Біо-Савара-Лапласа) силі струму. Отже магнітний потік  $\Phi$ , зчеплений з замкненим контуром по якому йде електричний струм, буде теж прямо пропорційний силі струму  $I$  у контурі:

$$\Phi = LI \quad (9.6)$$

де коефіцієнт пропорційності  $L$  називається **індуктивністю контуру**. В системі СІ індуктивність вимірюється у генрі:  $[L] = [\text{Гн}]$ ,  $1\text{Гн} = 1 \frac{\text{Вб}}{\text{А}} = 1 \frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{А}}$ . Індуктивність котушки (соленоїду) залежить від її геометричної форми і розмірів, кількості витків, а також магнітної проникності середовища всередині котушки. Так, наприклад, індуктивність нескінченно довгого соленоїда (довжина якого набагато менша за лінійні розміри поперечного перерізу) визначається за формулою:

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l} \quad (9.7)$$

де  $N$  - кількість витків;  $S$  - площа поперечного перерізу;  $l$  - довжина соленоїда;  $\mu$  - магнітна проникність середовища всередині соленоїда.

При зміні сили струму в контурі буде змінюватися також і зціплений з ним магнітний потік. Відповідно у контурі буде виникати ЕРС (за першим законом Фарадея).

Явище виникнення ЕРС індукції у провідному контурі при зміні в ньому сили струму називається **самоіндукцією**.

Застосовуючи для явища самоіндукції перший закон Фарадея і враховуючи (9.6), отримаємо формулу для ЕРС самоіндукції ( $\mathcal{E}_{si}$ ), яка є узагальненим математичним виразом другого закону Фарадея:

$$\mathcal{E}_{si} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(LI) = -\left(L\frac{dI}{dt} + I\frac{dL}{dt}\right) \quad (9.8)$$

Якщо контур не деформується (не змінює своєї форми) і не змінюється магнітна проникність середовища, тобто якщо індуктивність контуру не змінюється, то формула (9.8) спрощується:

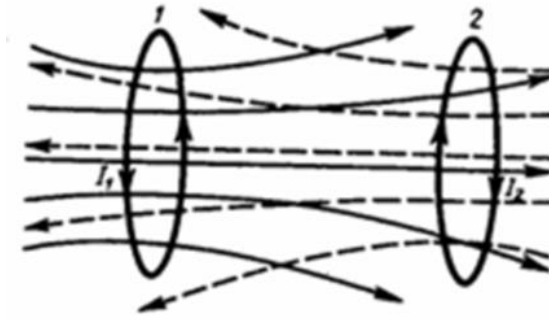
$$\mathcal{E}_{si} = -L\frac{dI}{dt} \quad (9.9)$$

Знак «-», обумовлений правилом Ленца, показує, що наявність індуктивності в контурі призводить до сповільнення струму в ньому.

Отже, за **законом електромагнітної самоіндукції (другим законом Фарадея)**, ЕРС самоіндукції у замкненому провідному контурі прямо пропорційна і протилежна за знаком швидкості зміни електричного струму, який протікає в цьому контурі, а коефіцієнтом пропорційності виступає індуктивність контуру.

Практичний інтерес представляє явище **взаємної індукції** – це явище виникнення ЕРС в одному з контурів при зміні сили струму в іншому контурі (контури нерухомі і розміщені достатньо близько один відносно іншого).

Розглянемо два нерухомі контури 1 і 2, розміщених достатньо близько один від одного (рис.9.1).



**Рис. 9.1.** Явище взаємної індукції

Якщо в контурі 1 йде струм  $I_1$ , то магнітний потік, що створюється цим струмом (силові лінії цього поля позначені суцільними лініями), пропорційний силі струму  $I_1$ . Позначимо через  $\Phi_{21}$  ту частину потоку, яка пронизує контур 2. Тоді  $\Phi_{21} = L_{21}I_1$ , де  $L_{21}$  - коефіцієнт пропорційності. Якщо струм  $I_1$  змінюється, то в контурі 2 індуктується ЕРС  $\mathcal{E}_{12}$ , яка за першим законом Фарадея рівна і протилежна за знаком швидкості зміни магнітного потоку  $\Phi_{21}$ , створеного струмом, який йде у першому контурі і пронизує другий контур:

$$\mathcal{E}_{12} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad (9.10)$$

Аналогічно, при протіканні в контурі 2 струму  $I_2$  магнітне поле (його силові лінії на рис.9.1 зображено пунктирними лініями) буде пронизувати перший контур. Якщо позначити  $\Phi_{12}$ - ту частину цього потоку, який пронизує контур 1, тоді при зміні струму  $I_2$ , у першому контурі буде виникати ЕРС:

$$\mathcal{E}_{21} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -L_{12} \frac{dI_2}{dt} \quad (9.11)$$

Коефіцієнти пропорційності  $L_{21}$  і  $L_{12}$  називають **взаємною індуктивністю контурів**. Розрахунки, що підтверджуються дослідами, показують, що  $L_{12} = L_{21}$ . Взаємна індуктивність контурів залежить від їх геометричної форми, розмірів, взаємного положення і магнітної проникності середовища.

Для прикладу наведемо формулу для розрахунку взаємної індуктивності котушок, що намотані на загальне тороїдальне осердя:

$$L_{12} = L_{21} = \mu\mu_0 \frac{N_1 N_2}{l} S \quad (9.12)$$

де  $\mu$  - магнітна проникність матеріалу сердечника;  $l$  - довжина сердечника по середній лінії;  $N_1$  і  $N_2$  відповідно кількість витків першої і другої котушки;  $S$  - площа поперечного перерізу сердечника.

На основі явища взаємної індукції працюють дуже розповсюджені електричні прилади – **трансформатори**, які використовують для підвищення або пониження напруги змінного струму. Вперше трансформатори були сконструйовані і уведені у практику електротехніком П.М. Яблочковим і фізиком І.Ф. Усагіним.

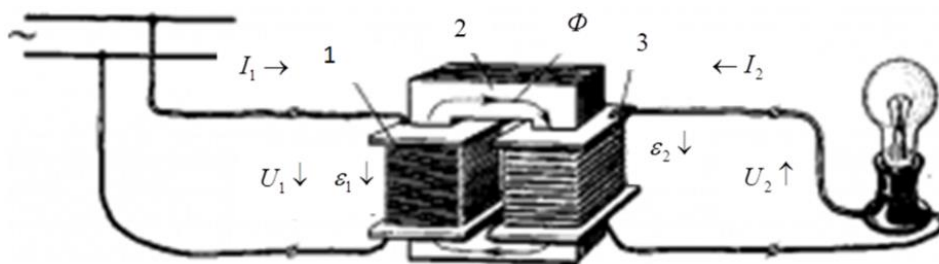
Трансформатори дозволяють значно збільшувати напругу, яка виробляється джерелами змінного струму, встановлених на електричних станціях, і здійснювати передачу електроенергії на дальні відстані при високих напругах (110, 220, 500, 750 і 1150кВ). Завдяки цьому значно зменшуються втрати енергії в проводах і забезпечується можливість значного зменшення площі перерізу проводів ліній електропередач.

У місцях живлення електроенергії висока напруга, що подається від високовольтних ліній електропередач, знову знижується трансформаторами до порівняно невеликих значень (127, 220, 380 і 660 В), при яких працюють електричні споживачі, що встановлені на фабриках, заводах, в депо жилих будинках. На електрорушійних потягах змінного струму трансформатори застосовують для зменшення напруги, що подається з контактної мережі до тягових двигунів і допоміжних ланцюгів.

Крім трансформаторів, що застосовуються в системах передачі і розподілення електроенергії, промисловістю випускаються трансформатори: тягові, для випрямляючих приладів, лабораторні з регулюванням напруги, для живлення радіоапаратури і т.д. Всі ці трансформатори називають силовими. Трансформатори використовують також для ввімкнення електровимірювальних приладів у ланцюзі високої напруги (їх називають вимірювальними), для

електрозварки та інших цілей. Трансформатори бувають однофазні і трьохфазні, двох- і багатообмоточні.

Розглянемо принцип дії найпростішого двохобмоточного однофазного трансформатора (рис.9.2), який складається з сталюого магнітопроводу 2 і двох обмоток 1 і 3. Обмотки виконані з ізолюваного проводу і електрично не зв'язані. До однієї з обмоток (першої) подається електрична енергія від джерела змінного струму. Цю обмотку називають первинною. До другої обмотки підключають споживач (безпосередньо, або через випрямляч).



**Рис. 9.2.** Двохобмоточний однофазний трансформатор

При підключенні трансформатора до джерела змінного струму (електромережі) у витках його первинної обмотки протікає змінний струм  $I_1$ , створюючи змінний магнітний потік  $\Phi$ . Цей потік проходить по магнітопроводу трансформатора і, пронизуючи витки первинної і вторинної обмоток, індукує в них змінні ЕРС  $\varepsilon_1$  (самоіндукції) і  $\varepsilon_2$  (взаємної індукції). Якщо до вторинної обмотки під'єднати споживач, то під дією  $\varepsilon_2$  по електричному ланцюгу піде струм  $I_2$ .

Струм  $I_1$  первинної обмотки визначається згідно закону Ома:

$$\varepsilon_1 - \frac{d}{dt}(N_1\Phi) = I_1 R_1$$

де  $N_1$  - кількість витків первинної обмотки,  $R_1$  - опір первинної обмотки.

Падіння напруги  $I_1 R_1$  у швидкозмінних полях мале у зрівнянні з кожною з двох ЕРС, тому  $\varepsilon_1 \approx N_1 \frac{d\Phi}{dt}$ .

ЕРС взаємної індукції, що виникає у вторинній обмотці:

$$\varepsilon_2 = -\frac{d}{dt}(N_2\Phi) = -N_2\frac{d\Phi}{dt}.$$

Зрівнюючи формули, що визначають ЕРС у первинній і вторинній обмотці, отримаємо:

$$\varepsilon_2 = -\frac{N_2}{N_1}\varepsilon_1 \quad (9.13)$$

де знак «-» вказує, що ЕРС у первинній і вторинній обмотках протилежні за фазою.

Відношення

$$k = \frac{N_2}{N_1} \quad (9.14)$$

яке показує, у скільки разів ЕРС у вторинній обмотці трансформатора більша (або менша), ніж у первинній, називається **коефіцієнтом трансформації**.

Знехтуючи втратами енергії (які у сучасних трансформаторах не перевищують 2% і пов'язані в основному з виділенням в обмотках трансформатора джоулевої теплоти і виникненням вихрових струмів) і застосувавши закон збереження енергії, можемо записати, що потужності струму в обох обмотках трансформатора практично однакові:  $\varepsilon_1 I_1 \approx \varepsilon_2 I_2$ , звідки, враховуючи (9.13), знайдемо:

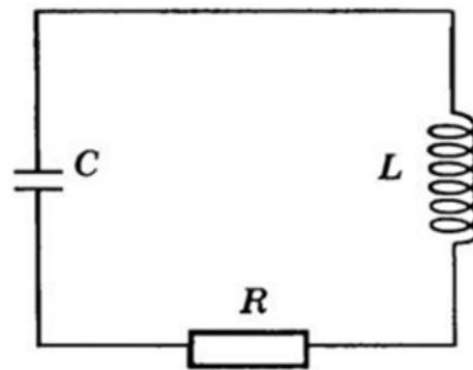
$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (9.15)$$

Тобто струми в обмотках обернено пропорційні кількості витків в цих обмотках. Якщо  $k > 1$ , то маємо справу з **підвищувальним трансформатором**, який підвищує змінну ЕРС і понижує струм (використовується, наприклад, для передачі електроенергії на великі відстані). Якщо  $k < 1$ , то трансформатор буде **понижувальним**, тобто таким, що понижує ЕРС і підвищує струм (використовується, наприклад, при електрозварюванні).

## 9.2. Коливальний контур. Змінний струм

Серед різних електричних явищ особливе місце займають електромагнітні коливання, при яких електричні величини (заряди, струми) періодично змінюються і супроводжуються взаємними перетвореннями електричного і магнітного полів. Для збудження і підтримання електромагнітних коливань використовують **коливальний контур** – коло, що складається із увімкнених

послідовно котушки індуктивністю  $L$ , конденсатора ємністю  $C$  і резистора опором  $R$  (рис.9.3).



**Рис. 9.3.** Коливальний контур

Розглянемо послідовні стадії коливального процесу в ідеалізованому контурі, опір якого нескінченно малий ( $R \approx 0$ ) (рис.9.4). Для збудження у контурі коливань конденсатор попередньо заряджають, надаючи його обкладинкам заряди  $\pm q_0$ . Тоді в початковий момент часу  $t = 0$  між обкладинками виникає електричне поле напруженістю  $\vec{E}$  (рис.9.4а), енергія якого

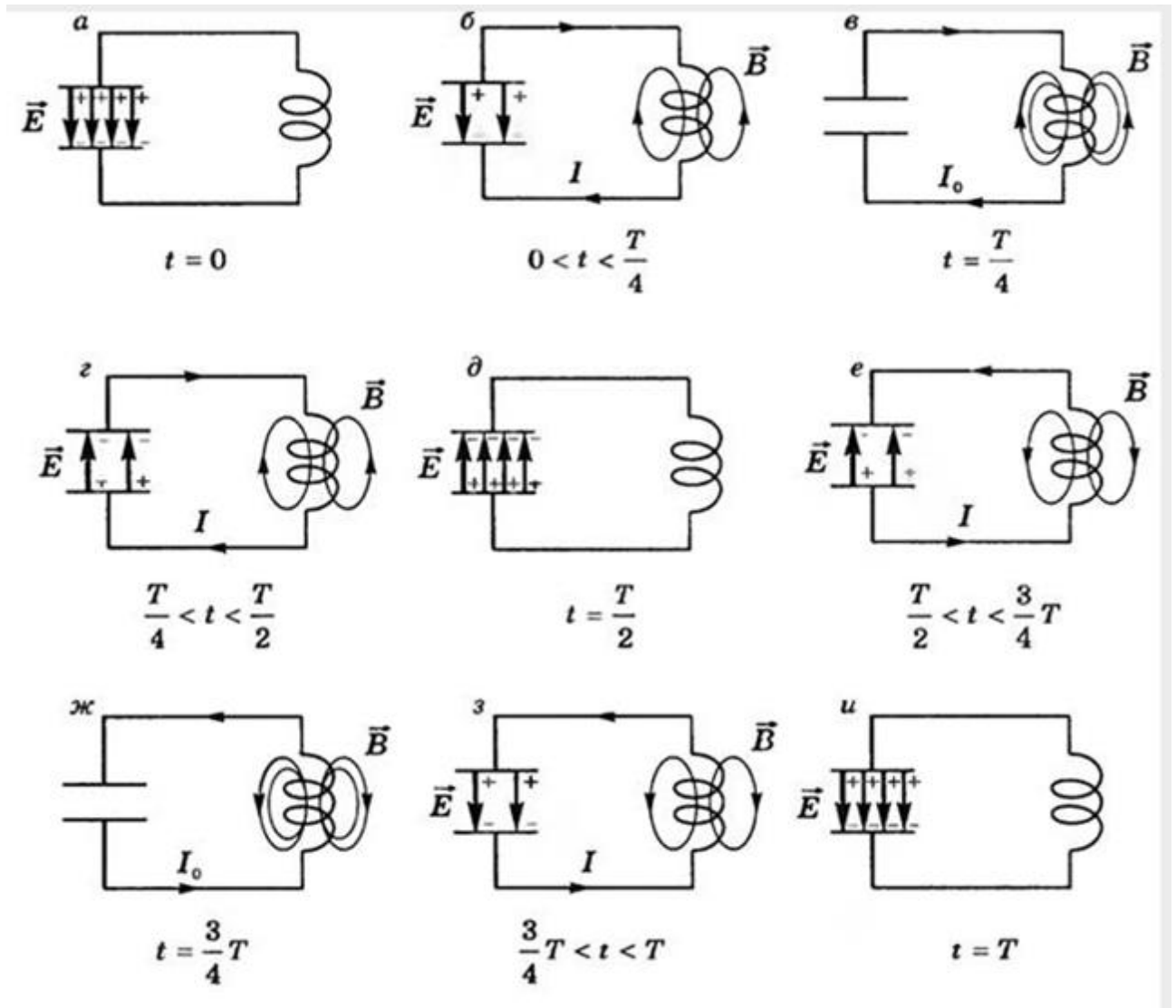
$$W_{e \max} = \frac{q_0^2}{2C}.$$

Якщо замкнути конденсатор на котушку, то він почне розряджатися і по контуру піде зростаючий у часі струм  $I$  (рис.9.4б). В результаті цього енергія електричного поля буде зменшуватися, а енергія магнітного поля котушки

$W_M = \frac{LI^2}{2}$  - зростати. Так як  $R \approx 0$ , то, згідно закону збереження енергії, повна енергія  $W = \frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} = \text{const}$ , так як вона не використовується на нагрівання. В момент часу  $t = \frac{1}{4}T$  ( $T$  - період коливань в даному контурі), конденсатор повністю розрядиться (рис.9.4в), енергія електричного поля обернеться у нуль, а енергія магнітного поля (а відповідно і струм), досягне максимального значення

$W_{M \max} = \frac{LI_0^2}{2}$ . Починаючи з цього моменту, струм у контурі почне зменшуватися; відповідно, почне зменшуватися і магнітне поле котушки, і в ній буде індуктуватися струм, який спрямований (згідно правила Ленца) в тому ж напрямку, що і струм розрядки конденсатора. Конденсатор почне

перезаряджати, виникне електричне поле, яке намагатиметься послабити струм (рис.9.4г). В момент часу  $t = \frac{1}{4}T$ , конденсатор повністю перезарядиться, струм зникне; енергія магнітного поля перейде повністю в енергію електричного поля. Далі ті ж процеси почнуть протікати у зворотному напрямку (рис.9.4 е,ж,з) і в момент часу  $t = T$  система повернеться у початковий стан (рис.9.4и).



**Рис. 9.4.** Електромагнітні коливання в контурі

Таким чином у контурі виникають електромагнітні коливання, які супроводжуються послідовними перетвореннями енергії електричного поля в енергію магнітного поля. Треба зауважити, що коливання будуть протікати без втрати енергії, якщо контур близький до ідеального, тобто такий, опір якого нескінченно малий.

У розглянутому колі електрорушійною силою є ЕРС самоіндукції  $\varepsilon_{si}$ , яка виникає у котушці. Електричний струм з'являється за рахунок різниці потенціалів  $U_C$  між обкладинками конденсатора, отже:  $U_C = \varepsilon_{si}$ .

Враховуючи, що  $\varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt}$ ,  $U_C = \frac{q}{C}$ ,  $I = \frac{dq}{dt}$ , отримаємо диференціальне рівняння електромагнітних коливань:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{1}{LC}q = 0 \quad (9.16)$$

Це рівняння представляє собою рівняння вільних гармонійних коливань, що здійснюються з циклічною частотою

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (9.17)$$

або періодом

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (9.18)$$

Формула (9.3) вперше була отримана У.Томсоном і носить назву **формула Томсона**.

Розв'язком диференціального рівняння (9.16) є рівняння, яке описує гармонійні коливання заряду на обкладинках конденсатора:

$$q = q_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (9.19)$$

Оскільки сила струму  $I = \frac{dq}{dt}$ , то зміна сили струму з часом у коливальному контурі буде описуватися рівнянням:

$$I = -q_0\omega \sin(\omega t + \varphi) = I_0 \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (9.20)$$

Отже коливання струму опереджає коливання заряду на  $\frac{\pi}{2}$ , відбувається з такою ж частотою і має амплітуду  $I_0 = q_0\omega$ .

Оскільки  $U_C = \frac{q}{C}$ , то враховуючи (9.19), отримаємо рівняння коливань напруги на обкладинках конденсатора:

$$U_C = U_0 \cos(\omega t + \varphi) \quad (9.21)$$

де  $U_0 = \frac{q_0}{C}$ - амплітуда напруги.

### **Завдання для самоконтролю**

1. В чому полягає явище електромагнітної індукції?
2. Як визначається магнітний потік через поверхню?
3. Сформулюйте теорему Гауса для потіка вектора магнітної індукції?
4. Як знаходиться напрямок індукційного струму за правилом Ленца?
5. Яка формула індуктивності нескінченно довгого соленоїда?
6. В чому полягає явища самоіндукції і взаємоіндукції?
7. За якою формулою визначаються період і циклічна частота вільних коливань?

## **ВСТУП ДО ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ**

Лабораторні роботи призначені для опанування освітньої компоненти «Електрика і магнетизм» за спеціальністю А4Середня освіта (А4.08 Середня освіта (Фізика та астрономія)), освітньо-професійна програма «STEM-навчання» та для використання студентами денної та безвідривної форми навчання всіх спеціальностей УДУНТу під час вивчення розділу електрика і магнетизм при опануванні освітньої компоненти «Фізика». В тексті наведено опис лабораторних робіт, що виконуються студентами всіх спеціальностей на кафедрі фізики та прикладної математики УДУНТу. У них міститься необхідна інформація щодо підготовки, виконання та звітності про лабораторну роботу [11-14].

У кожній лабораторній роботі подається короткий виклад понять, законів, явищ та фізичної основи використаного методу, описані експериментальні установки та методики вимірювань, наведені завдання, контрольні запитання. Виконання вказаних лабораторних робіт має сприяти більш глибокому розумінню фізичних явищ.

Особлива увага надається безпосереднім вимірюванням та обробці результатів. Щоб правильно оцінити їх надійність і точність, необхідно мати чітке уявлення про розмірність досліджуваної величини, знати правила користування основними обчислювальними і вимірювальними приладами, а також основи теорії похибок [12].

### **Вимоги з охорони праці під час виконання лабораторних робіт**

1. До виконання лабораторної роботи допускаються студенти, що вивчили та засвоїли правила поведінки в лабораторії, знають методику проведення лабораторних робіт, пройшли відповідний інструктаж.

2. Для виконання робіт використовують тільки придатні для роботи прилади та інструменти. Перед виконанням роботи керівник повинен особисто перевірити справність приладів і дати дозвіл на виконання роботи.

3. Забороняється вмикати або вимикати джерела електричної та світлової енергії без дозволу керівника робіт.

4. Про усі недоліки в роботі приладів та обладнання студент повинен негайно повідомити викладача.

5. Якщо виявляється несправність приладу або ненормальний режим діючої установки, то її варто негайно відключити від джерела живлення і повідомити про те, що трапилося, викладачу.

6. Перед закінченням роботи послідовно вимкнути всі споживачі електроенергії. Візуально перевірити справність стенду, установки.

## Е Л Е К Т Р О С Т А Т И К А

### Лабораторна робота № 8-1

#### ВИВЧЕННЯ ЕЛЕКТРОСТАТИЧНОГО ПОЛЯ

**Мета роботи:** вивчення електростатичного поля, знаходження положень екіпотенціальних поверхонь та побудові по ним силових ліній.

**Приладдя:** установка для вивчення електростатичного поля, яка включає в себе гальванометр, потенціометр, пантограф.

#### 1. Теоретичні відомості

**Електричне поле** – це особливий вид матерії, який нерозривно пов'язаний з електричними зарядами та який передає дію одних зарядів на інші. Якщо електричне поле розглядати в системі відліку, що є нерухомою відносно зарядів, які створюють поле, то таке поле є електростатичним. Характеристиками електростатичного поля в кожній точці є напруженість та потенціал.

**Напруженість** електричного поля  $E$  у даній точці – це векторна фізична величина, що чисельно дорівнює силі  $F$ , з якою поле діє на одиничний позитивний заряд  $q$ , вміщений в цю точку, тобто

$$E = F/q.$$

Напрямок вектора напруженості збігається з напрямком сили, що діє на позитивний заряд, вміщений в дану точку поля. Одиниця напруженості в  $SI$  –  $1 \text{ В/м}$ .

**Потенціал**  $\varphi$  – це фізична величина, що чисельно дорівнює роботі  $A$ , яку виконує електричне поле при переміщенні одиничного позитивного заряду  $q$  з даної точки поля на нескінченність:

$$\varphi = A/q$$

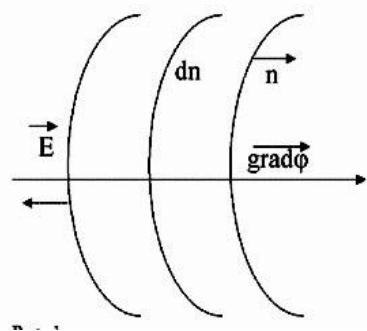


Рис. 1

Потенціал – скалярна величина. Знак потенціалу визначається знаком заряду, що створює поле. Одиниця потенціалу в  $SI$  –  $1 \text{ В}$ .

Графічно електричне поле відображується силовими лініями та екіпотенціальними поверхнями.

**Силова лінія** – це лінія, напрям дотичної до якої в кожній точці співпадає з напрямом вектора

напруженості електричного поля. **Еквіпотенціальна поверхня** – це поверхня, всі точки якої мають однакові потенціали.

Між напруженістю та потенціалом електростатичного поля існує зв'язок: напруженість чисельно дорівнює градієнту потенціалу; вона спрямована в бік зменшення потенціалу (рис.1), тобто  $E = -grad\phi$ , де  $grad\phi = \frac{d\phi}{dn}$  – градієнт скаляра, що чисельно дорівнює зміні потенціалу на одиницю довжини у напрямку, перпендикулярному до еквіпотенціальних поверхонь. Силкові лінії в будь-якій точці поля направлені за нормаллю до еквіпотенціальної поверхні в цій точці.

Вивчення електростатичного поля замінено вивченням електричного поля малого струму, сталого в часі, оскільки лінії густини струму  $j$  співпадають по напрямку з силковими лініями електростатичного поля  $E$ . Згідно з законом Ома в диференційній формі

$$j = \gamma E$$

де  $j$  – вектор густини струму, напрям якого співпадає з напрямом руху позитивного заряду;

$\gamma$  – питома провідність електроліту;

$E$  – вектор напруженості в даній точці поля.

Зазначимо, що поверхню провідника в полі струму можна вважати еквіпотенціальною, якщо питома електропровідність оточуючого середовища значно менша електропровідності провідника. В цій роботі середовищем, яке проводить струм, є вода ( $\gamma = 10^{-7} \frac{1}{\text{Ом м}}$ ); електрод – металевий ( $\gamma = 10^7 \frac{1}{\text{Ом м}}$ ).

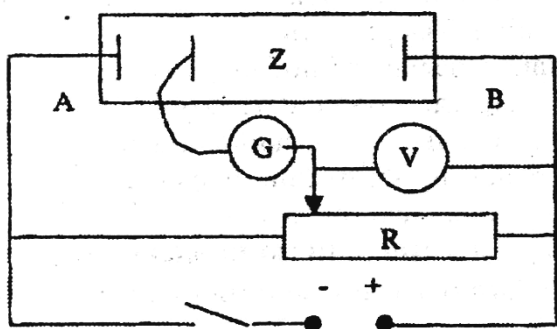


Рис. 2

На рис.2 показана схема установки. В ванну, яка виготовлена з ізолюючого матеріалу, вміщено металеві електроди, на які подається постійна напруга 3 вольта. Ванна заповнюється водою. Для визначення розподілу потенціалу в електричному полі струму застосовано пересувний електрод  $Z$ , який через гальванометр

$G$  приєднано до потенціометра  $R$ , за допомогою якого можна плавно змінювати різницю потенціалу між електродами  $B$  і  $Z$  в межах 1 - 3 вольта.

Потенціал електрода  $Z$  дорівнює потенціалу регулятора потенціометра  $i$ , коли цей електрод знаходиться в точці поля з таким же потенціалом, як у регулятора, струм через гальванометр дорівнює нулю. Оскільки потенціал електрода  $B$  дорівнює нулю, вольтметр показує потенціал точки поля, в якій знаходиться електрод.

## 2. Порядок виконання роботи.

1. У ванні з водою встановити систему з двох електродів  $A$  і  $B$ .
2. Покласти аркуш паперу в затискачі пантографа.
3. Обвести електродом  $Z$  контури поверхонь електродів  $A$  і  $B$  і зафіксувати їх горизонтальний переріз за допомогою пантографа.
4. Включити живлення установки.
5. Розмістити пересувний електрод  $Z$  біля того з електродів, який має нульовий потенціал (вольтметр показує 0). Цей електрод – електрод  $B$  на схемі рис.2.
6. За допомогою регулятора потенціометра встановити на вольтметрі потенціал 0,5 В; пересувним електродом знайти 6-10 точок, які відповідають цьому потенціалу поля (при цьому гальванометр показує нульовий струм).
7. Поєднавши всі ці точки, побудувати еквіпотенціальну лінію.
8. Теж саме зробити для потенціалів 1,0 В, 1,5 В, 2,0 В, 2,5 В, 3,0 В.
9. Побудувати 5-7 силових ліній поля, враховуючи, що силові лінії поля і еквіпотенціальні лінії завжди ортогональні між собою.
10. Визначити величину  $grad\phi$  в декількох областях поля, враховуючи масштаб малюнка.

### 3. Контрольні запитання

1. Що таке електричне поле?
2. Дайте визначення напруженості та потенціалу електричного поля.
3. В яких одиницях в СІ вимірюються напруженість та потенціал електричного поля?
4. Який зв'язок між потенціалом та напруженістю електричного поля?
5. Сформулюйте теорему Остроградського - Гауса.
6. Яке поле називається однорідним?
7. Побудувати графічне зображення електричного поля зарядженої провідної сфери.
8. Чому дорівнює потенціал і напруженість всередині зарядженої провідної сфери?
9. За допомогою теореми Остроградського-Гауса вивести формулу напруженості зарядженої площини.

### Лабораторна робота № 8-2

#### ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЄМНОСТІ КОНДЕНСАТОРА

**Мета роботи:** визначення електроємності конденсатору та системи конденсаторів (паралельне та послідовне з'єднання)

**Приладдя:** гальванометр, мікроамперметр, конденсатори.

#### 1. Теоретичні відомості

**Конденсатором** називається система, що складається з двох провідників (обкладинок), розділених діелектриком. Заряди на обкладинках однакові за величиною та протилежні за знаком. Напруженість поля в кожній точці в середині конденсатору пропорційна заряду на його обкладинках. Різниця потенціалів двох точок середині конденсатору також пропорційна до їх заряду. Таким чином:

$$q = C(\varphi_1 - \varphi_2) = CU,$$

де  $C$  - електроємність конденсатору. Звідки

$$C = \frac{q}{U} \quad (1)$$

Отже, **електроємність** конденсатору є фізична величина, яка чисельно дорівнює заряду, який потрібно надати одній з обкладинок, щоб змінити різницю потенціалу на його обкладинках на одиницю.

Величина ємності залежить від форми, геометричних розмірів конденсатора, а також від діелектричної проникності середовища, яке заповнює простір між обкладинками. Для плоского конденсатору:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$$

На практиці застосовується з'єднання конденсаторів в батареї. Загальна ємність батареї розраховується за формулами:

$$\frac{1}{C} = \sum_i \frac{1}{C_i} \text{ - при послідовному з'єднанні конденсаторів;}$$

$$C = \sum_i C_i \text{ - при паралельному з'єднанні конденсаторів.}$$

Для вимірювання електроємності розроблено багато методів з використанням ланцюгів постійного та змінного струму. В даній роботі для визначення електроємності конденсатора вимірюється заряд, який віддав конденсатор при розряді. Щоб визначити заряд, необхідно знати залежність сили струму від часу розряду від часу. В даній роботі досліджується ця залежність і за отриманими даними будується графік  $I = f(t)$ . Площа, яка обмежена графіком і осями координат, чисельно дорівнює заряду, що віддав конденсатор. Визначивши таким чином заряд і вимірявши вольтметром різницю потенціалів на обкладинках конденсатора на початку розряду, визначають ємність за формулою (1).

### Порядок виконання роботи:

1. Зібрати ланцюг за схемою (рис.1).
2. Зарядити конденсатор. Записати в зошит напругу на обкладинках.
3. Розрядити конденсатор через мікроамперметр. При цьому через кожні 5-10 с (по вказівці викладача) фіксуєте силу струму і записуйте її значення в таблицю. Повторіть дослід 5 разів.

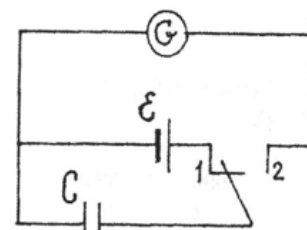


Рис.1

Таблиця

Сила струму розряду, А													
Час, с													
Середній час, с													

4. Обчислити середні значення сили струму.
5. За даними таблиці побудуйте графік залежності сили струму (середні значення) при розряді конденсатора від часу (по осі абсцис відкладайте час в секундах, а по осі ординат – силу струму в амперах).

6. Визначте, якому заряду в кулонах відповідає на графіку площа в  $1 \text{ см}^2$ : для цього помножте час в секундах (відповідно  $1 \text{ см}$  по осі абсцис) на силу струму в амперах (відповідно  $1 \text{ см}$  по осі ординат).

7. Підрахуйте площу в квадратних сантиметрах, обмежену графіком і осями координат. Визначте заряд, відповідно всієї цієї площі.

8. Знаючи напругу і заряд, визначте ємність конденсатора, виразіть її у фарадах і мікрофарадах.

### 3. Контрольні запитання

1. Що розуміють під електроємністю?
2. Виведіть формулу ємності для послідовного з'єднання конденсаторів.
3. Виведіть формулу ємності для паралельного з'єднання конденсаторів.
4. Виведіть формулу ємності плоского конденсатора.
5. Чому дорівнює енергія конденсатора?
6. Запишіть формулу для конденсатора з багатошаровим діелектриком.
7. Які типи конденсаторів ви знаєте?
8. Де знаходять застосування конденсатори?
9. Чи зміниться електроємність плоского конденсатора, якщо посередині між обкладинками вставити тонку металеву пластинку?
10. Порівняти геометричні розміри двох плоских конденсаторів, що мають однакову ємність, але різні робочі напруги.
11. Чи однакова робота витрачається на зарядку конденсатора від  $0$  до  $10 \text{ В}$  та від  $10$  до  $20 \text{ В}$ ?
12. Відстань між пластинами зарядженого конденсатора збільшили у  $2$  рази. Як це вплинуло на його заряд, ємність, напруженість поля, напругу між обкладинками?

### Лабораторна робота № 8-3

#### ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРОЄМНОСТІ ПОСЛІДОВНОГО ТА ПАРАЛЕЛЬНОГО З'ЄДНАННЯ КОНДЕНСАТОРІВ

**Мета роботи:** визначення електроємності конденсатору та системи конденсаторів (паралельне та послідовне з'єднання)

**Приладдя:** три конденсатора (ємність одного відома, два конденсатора невідомої ємності), гальванометр, джерело постійного струму.

## 1. Теоретичні відомості

**Конденсатор** - є система, яка складається з двох провідників (обкладинок), відокремлених діелектриком, в якій при наявності електричного поля між провідниками усі лінії електричного зміщення замикаються в середині системи. Таким чином, заряди на обкладинках однакові за величиною та протилежні за знаком. Напруженість поля в кожній точці в середині конденсатору пропорційна заряду на його обкладинках.

Різниця потенціалів двох точок поля в середині конденсатору:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \int_l E_l dl \quad (1)$$

де  $E_l$ - проекція вектору напруженості електричного поля на переміщення  $dl$ .

Тоді напруга теж пропорційна заряду:

$$q = C(\varphi_1 - \varphi_2) = CU \quad (2)$$

де  $C$  – електроємність конденсатору. Звідки  $C = \frac{q}{U}$ . (3)

Таким чином, **електроємність конденсатору** є фізична величина, яка чисельно дорівнює заряду, який треба надати одній з обкладинок, щоб змінити різницю потенціалу на його обкладинках на одиницю.

Величина ємності залежить від форми, геометричних розмірів конденсатору, а також від діелектричної проникності середовища, яке заповнює простір між обкладинками. Для плоского конденсатору:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} \quad (4)$$

На практиці застосовується з'єднання конденсаторів в батареї. Загальна ємність батареї розраховується за формулами:

$$\frac{1}{C} = \sum_i \frac{1}{C_i} \text{ - при послідовному з'єднанні конденсаторів}$$

(5)

$$C = \sum_i C_i \text{ - при паралельному з'єднанні конденсаторів}$$

(6)

Якщо зарядити конденсатор невідомої ємності  $C_X$  і розрядити крізь гальванометр, то відхилення стрілки буде пропорційне пропущеному заряду:

$$q_X = C_X U = k N_X \quad (7)$$

де  $U$  – різниця потенціалу на обкладинках конденсатору, а  $N_X$  – число поділок відхилення стрілки гальванометра..

Якщо ж тепер зарядити конденсатор з відомою ємністю від того ж джерела та розрядити його через гальванометр, то:

$$q_0 = C_0 U = k N_0 \quad (8)$$

З (7) та (8) отримаємо: 
$$\frac{C_X}{C_0} = \frac{N_X}{N_0} \quad (9)$$

Звідки: 
$$C_X = C_0 \frac{N_X}{N_0} \quad (10)$$

### 2. Порядок виконання роботи:

- Зібрати ланцюг за схемою (рис.1).
  - Встановити стрілку гальванометру на нуль.
  - Зарядити конденсатор з відомою ємністю ( $C_0$ ).
  - Розрядити конденсатор крізь гальванометр.
  - Повторити пункти 3, 4 для кожного з конденсаторів з невідомою ємністю  $C_{X1}$  та  $C_{X2}$
- Розрахувати їх ємність за формулою (10).

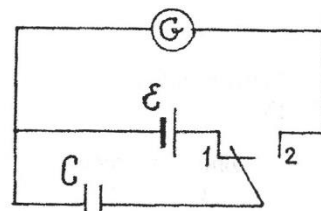
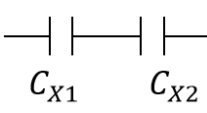
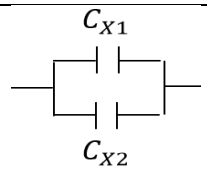


Рис.1

- Повторити пункти 3, 4 для паралельного та послідовного з'єднання конденсаторів  $C_{X1}$ ,  $C_{X2}$ . Порівняти експериментальні та розрахункові значення електроємностей для цих випадків.
- Результати вимірювань занести в таблицю.

8. Зробити висновок по роботі, в якому проаналізувати отримані результати, відносну похибку, зазначити точність вимірювальних приладів.

Таблиця

	№	N	$C_X, \Phi$	$\bar{C}_X, \Phi$	$\Delta C, \Phi$	$\delta, \%$
$C_0$	1					
	2					
	3					
$C_{X1}$	1					
	2					
	3					
$C_{X2}$	1					
	2					
	3					
 $C_{X1}$ $C_{X2}$	1					
	2					
	3					
 $C_{X1}$ $C_{X2}$	1					
	2					
	3					

### 3. Контрольні запитання

#### 1. Що розуміють під електроємністю?

2. В яких одиницях в СІ вимірюється електроємність?
3. Вивести співвідношення ємності для послідовного з'єднання конденсаторів.
4. Вивести співвідношення ємності для паралельного з'єднання конденсаторів.
5. Вивести формулу для ємності плоского конденсатора.
6. Чому дорівнює енергія конденсатора?
7. Запишіть формулу для конденсатора з багат шаровим діелектриком.
8. Чи зміниться електроємність плоского конденсатора, якщо посередині між обкладинками вставити тонку металеву пластинку?
9. Порівняти геометричні розміри двох плоских конденсаторів, що мають однакову ємність, але різні робочі напруги.
10. Де знаходять застосування конденсатори?

#### Лабораторна робота № 8-4

#### ВИЗНАЧЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОНИКНОСТІ ДІЕЛЕКТРИКА

**Мета роботи:** визначення діелектричної проникності діелектрика в керамічному конденсаторі з невідомою ємністю.

**Приладдя:** гальванометр типу М 213-9; джерело електроспоживання для практикуму ІЕПП-1; вольтметр постійного струму МН5М; конденсатор на 30 мкФ; керамічний конденсатор невідомої ємності; штангенциркуль, 15 см комплект з'єднуючих провідників.

#### 1. Теоретичні відомості

Ємність плоского конденсатора прямо пропорційна площі  $S$  його пластин, діелектричній проникності матеріала  $\varepsilon$  та обернено пропорційна відстані  $l$  між пластинами:

$$C_X = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{l}, \quad \text{звідки} \quad \varepsilon = \frac{C_X l}{\varepsilon_0 S} \quad (1)$$

Товщину  $l$  шару діелектрика можна виміряти мікрометром, площину  $S$  його пластин розрахувати, вимірюючи штангенциркулем їх довжину та ширину;  $\varepsilon_0$  – електрична стала. Залишається невідомою ємність конденсатора  $C_X$ ; її можна визначити методом порівняння.

Для цього конденсатор з відомою ємністю  $C$  та конденсатор з невідомою ємністю  $C_X$  вмикають по чергово в електричне коло, схема якого зображена на рис.1. В положенні І перемикача конденсатор заряджається від випрямляча і накопичує кількість заряду  $q = CU$ , де  $U$  – напруга, яка подається на обкладинки конденсатора від випрямляча.

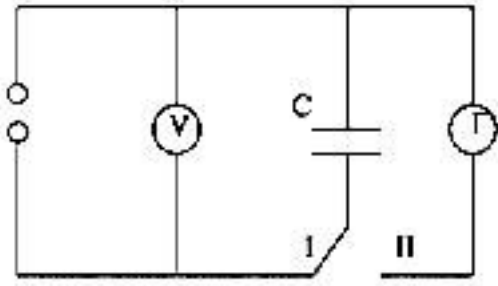


Рис.1.

Якщо перемикач установити в положення II, тобто з'єднати конденсатор з гальванометром, то заряд  $q$  потече через гальванометр і виникне короточасний викид стрілки гальванометра на деяке число поділок  $n$  його шкали, цей викид пропорційний заряду:

$$n = kq, \quad (2)$$

де  $k$  - коефіцієнт пропорційності, який залежить від конструкції приладу.

Підставляючи у це рівняння вираз, який визначає заряд -  $q = CU$ , отримуємо:

$$n = kCU \quad (3)$$

Якщо замість конденсатора  $C$  увімкнути в електричне коло конденсатор з невідомою ємністю  $C_x$  то при тих же умовах досліду виникне другий викид стрілки на  $n_x$  поділок:

$$n_x = kC_x U \quad (4)$$

Поділивши вираз (4) на вираз (3), отримаємо:

$$\frac{n_x}{n} = \frac{kC_x U}{kCU}, \quad \text{або} \quad C_x = \frac{n_x}{n} C \quad (5)$$

Визначивши таким чином ємність конденсатора, можна за формулою (1), знайти діелектричну проникність  $\epsilon$  діелектрика, який заповнює простір між його обкладинками.

## 2. Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричний ланцюг за схемою наведеною на рис.1.
2. Занотувати в зошиті таблицю для запису результатів вимірів та обчислень.

$C, \Phi$	$N$	$n_x$	$C_x, \Phi$	$l, \text{мм}$	$S, \text{см}^2$	$\epsilon$

3. Увімкнути конденсатор з відомою ємністю в електричне коло за схемою, зображеною на рис.1. Від джерела постійної напруги подати на його обкладинки напругу 30 В.

4. Перемикачем з'єднати заряджений конденсатор з гальванометром та занотувати кількість поділок  $n$ , на яку здійснився викид стрілки. Дослід повторити три рази та знайти середнє значення  $n_{\text{сер}}$ .

5. Увімкнути в електричне коло керамічний конденсатор з невідомою ємністю. Подати на його обкладки напругу 30 В.

6. Занотувати кількість поділок  $n_x$ , на яке здійснюється викид стрілки гальванометра при вмиканні до нього конденсатора з невідомою ємністю  $C_x$ . Дослід повторіти три рази та знайти середнє значення  $n_{\text{сер}}$ .

7. Визначити ємність невідомого конденсатора  $C_x$  за формулою (5).

8. Використовуючи штангенциркуль, виміряти лінійні розміри та розрахувати площу  $S$  пластин конденсатора, визначити товщину  $l$  діелектрика та обчислити його діелектричну проникність  $\varepsilon$ . Результати вимірів та обчислень занести до таблиці.

### 3. Контрольні запитання

1. Як класифікуються речовини за електричними властивостями?
2. Пояснити механізм поляризації діелектриків.
4. Навести класифікацію полярних та неполярних діелектриків.
5. Що таке діелектрична проникність?
6. Дати визначення електроємності.
7. Отримати формулу ємності плоского конденсатора.
8. Отримати формулу (5).
9. Охарактеризувати види конденсаторів.
10. Дати визначення напруженості електричного поля.
11. Отримати формулу для визначення напруженості електричного поля у конденсаторі?

## ПОСТІЙНИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

### Лабораторна робота № 9-1

#### ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ОПОРУ ПРОВІДНИКА

**Мета роботи:** визначення питомого опору провідника за допомогою методу точного вимірювання сили струму та точного вимірювання напруги. Перевірка закону Ома у диференціальній формі.

**Приладдя:** прилад FPM-01, мікрометр.

#### 1. Теоретичні відомості

У 1826 р. німецький фізик Г. Ом експериментально встановив, що сила струму в провіднику прямо пропорційна напрузі на кінцях провідника і обернено пропорційна опору цього провідника:

$$I = \frac{U}{R} \quad (1)$$

Співвідношення (1) називається *законом Ома для однорідної ділянки кола в інтегральній формі*. Користуючись ним, можна дістати одиницю опору. В СІ

опір провідника вимірюється в омах. 1 Ом – опір такого провідника, в якому виникає сила струму в один ампер, коли різниця потенціалів на його кінцях становить один вольт.

Дослід показує, що опір однорідного провідника прямо пропорційний його довжині і обернено пропорційний площі поперечного перерізу:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2)$$

Коефіцієнт пропорційності  $\rho$ , що характеризує матеріал, з якого виготовлено провідник, називають питомим опором речовини провідника. В СІ питомий опір вимірюється в Ом м.

В диференціальній формі закон Ома має такий вигляд:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (3),$$

де 
$$j = \frac{I}{S} \quad (4),$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (5),$$

$$E = \frac{U}{l} \quad (6)$$

В формулах (3), (4), (5), (6)  $\vec{j}$  – густина струму в провіднику,  $\vec{E}$  – напруженість електричного поля всередині провідника,  $\rho$  – питомий опір речовини провідника,  $\sigma$  – питома електропровідність речовини провідника,  $I$  – струм у провіднику,  $U$  – напруга на кінцях провідника,  $l$  – довжина провідника,  $S$  – площа перерізу провідника.

В цій роботі питомий опір провідника  $\rho$  знаходять за формулою (2). Опір провідника  $R$  визначають за допомогою закону Ома, площу перерізу провідника обчислюють за формулою:  $S = \pi d^2 / 4$ .

Напругу  $U$  на кінцях провідника, силу струму  $I$  в ньому, а також довжину провідника  $l$  та його діаметр  $d$  вимірюють безпосередньо.

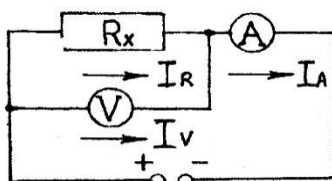


Рис.1

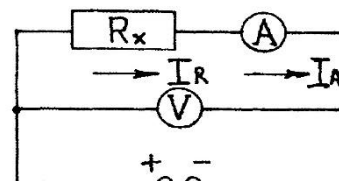


Рис.2

Для визначення опору провідника за формулою (1) існує два методи:

1. Метод точного визначення напруги на кінцях провідника (електрична схема рис.1).

2. Метод точного визначення струму в провіднику (електрична схема на рис.2).

В першому випадку (рис.1) вольтметр показує напругу на кінцях провідника  $U$ , опір якого визначається, а амперметр – суму струмів, які протікають через цей провідник і вольтметр:  $I_A = I_R + I_V$ . Оскільки

$$R_X = \frac{U}{I_R}, \quad I_V = \frac{U}{R_V}, \quad I_R = I_A - I_V$$

остаточно маємо:

$$R_X = \frac{U}{I_A - \frac{U}{R_V}} \quad (8)$$

При застосуванні електричної схеми, приведеної на рис.2, амперметр показує струм в провіднику –  $I$ , а вольтметр показує суму напруг на опорі та амперметрі:  $U_V = U_R + U_A$ . В цьому випадку  $\frac{U_V}{I} = R_X + R_A$  (струми в провіднику та амперметрі – однакові). Отже:

$$R_X = \frac{U_V}{I} - R_A \quad (9)$$

З обох схем видно, що найменші відхилення в результатах вимірів, будуть досягнені, коли опір вольтметра буде набагато більший, а опір амперметра набагато менший опору ділянки кола, в якій вимірюються напруга та струм.

## 2. Порядок виконання роботи

1. За допомогою рухомого затискача встановити довжину провідника  $l$ .
2. Мікрометром виміряти діаметр провідника.
3. Увімкнути установку до джерела змінного струму 220 В.
4. Перемикач виду робіт встановити в положення, яке відповідає рис. 1 – точному вимірюванню напруги. Для трьох значень напруги та струму, зробити підрахунки за формулою (8). Опір вольтметра  $R_V = 2500 \text{ Ом}$ .
5. Перемикач виду робіт встановити в положення, яке відповідає рис. 2 – точному вимірюванню струму. Тричі виміряти напругу і струм, зробити підрахунки за формулою (9). Опір амперметра  $R_A = 0,15 \text{ Ом}$ .
6. Визначити середнє значення опору провідника.
7. За формулою (2) визначити питомий опір провідника; при цьому за величину опору провідника взяти його середнє значення.
8. За формулами (4), (5), (6) відповідно визначити густину струму, питому електропровідність, напруженість електричного поля всередині провідника.
9. Перевірити правильність закону Ома в диференціальній формі – рівняння (3).
10. Результати занести в таблицю.

Таблиця

Режим	№	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$R_X, \text{Ом}$	$R_{\text{сеп}}, \text{Ом}$	$\rho, \text{Ом м}$	$\sigma, (\text{Ом м})^{-1}$	$l, \text{м}$	$d, \text{м}$	$E, \frac{\text{В}}{\text{м}}$	$j, \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$

Точне вимірюв. струму	1										
	2										
	3										
Точне вимірюв. напруги	1										
	2										
	3										

### 3. Контрольні запитання

1. Від чого залежить опір провідника?
2. Запишіть закон Ома в інтегральній формі.
3. Що таке питомий опір?
4. Від чого залежить питомий опір?
5. Дати визначається густині струму.
6. Запишіть закон Ома у диференціальній формі.
7. Що таке питома електропровідність?
8. В яких одиницях в СІ вимірюються опір, питомий опір, питома електропровідність?
9. У чому полягає метод точного визначення напруги та точного визначення струму, які використано у даній роботі?
10. Як визначається напруженість електричного поля усередині провідника?

### Лабораторна робота № 9-2

#### ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ РЕЗИСТОРА ЗА ДОПОМОГОЮ МОСТА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

**Мета роботи:** визначення опору резистора

**Приладдя:** 2 резистори з невідомим опором, реохорд, джерело постійного струму, чуттєвий гальванометр, магазин опорів, ключ, провідники .

#### 1. Теоретичні відомості

Мостова схема постійного струму, яка скорочено називається мостом Уїтстона, являє собою замкнутий чотирикутник, складений з чотирьох резисторів, з'єднаних між собою проводами. В одну з діагоналей цієї схеми включається джерело струму  $\varepsilon$ , в іншу - гальванометр  $G$  (рис.1). Якщо струм, через гальванометр  $G$ , дорівнює нулю, то потенціали крапок  $C$  і  $D$  ( $\varphi_C = \varphi_D$ ) рівні, а тому і струми  $I_1 = I_2$ ,  $I_3 = I_4$

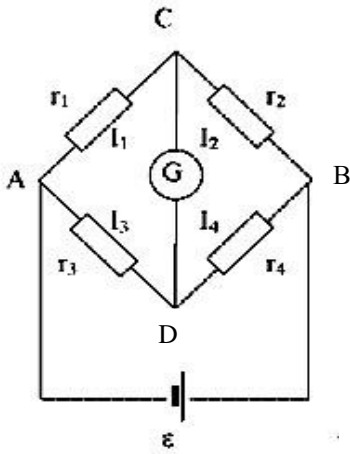


Рис.1

рівні.

За законом Ома для ділянки ланцюга  $AC$ ,  $CB$ ,  $AD$ ,  $DB$  струми  $I_1, I_2, I_3, I_4$  рівні:

$$I_1 = \frac{\varphi_A - \varphi_C}{r_1}; \quad I_2 = \frac{\varphi_C - \varphi_B}{r_2};$$

$$I_3 = \frac{\varphi_A - \varphi_D}{r_3}; \quad I_4 = \frac{\varphi_D - \varphi_B}{r_4};$$

Так як  $I_1 = I_2$ ;  $I_3 = I_4$  отримуємо:

$$\frac{\varphi_A - \varphi_C}{r_1} = \frac{\varphi_C - \varphi_B}{r_2}; \quad \frac{\varphi_A - \varphi_D}{r_3} = \frac{\varphi_D - \varphi_B}{r_4}$$

Отже

$$\frac{r_1}{r_3} = \frac{r_2}{r_4}$$

(1)

Формула (1) дозволяє визначити кожний з чотирьох опорів, що включені у плечі моста, якщо відомі три інші.

Мостова схема, яку застосовують в практиці, представлена на рис.2. В одне з плечей моста включається відомий опір  $r_{ет}$ , (магазин опорів), в інше – вимірюваний опір  $r_x$ . Третє і четверте плечі моста  $AD$  і  $DB$  є опорами ділянок реохорда  $AB$ .

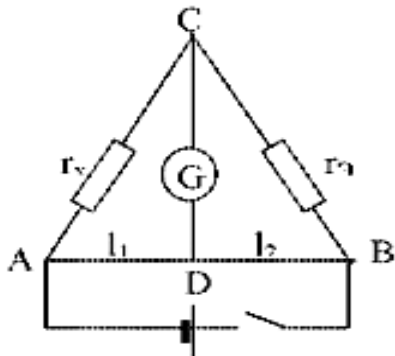


Рис. 2

Реохорд – це натягнутий металевий дріт із міліметровою шкалою. Сполучення гальванометра з реохордом відбувається за допомогою контактної повзунка, що ходить уздовж реохорду.

Якщо опір дроту  $R_{AD} = r_1$ , а  $R_{DB} = r_2$ ,

$$\text{то } \frac{r_x}{r_e} = \frac{r_1}{r_2}, \quad \text{звідки: } r_x = r_e \frac{r_1}{r_2}. \quad (2)$$

Враховуючи, що опір провідника прямо пропорційний до його довжини, отримаємо то

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{l_1}{l_2}$$

(3)

## 2. Порядок виконання роботи

1. Зібрати електричний ланцюг за схемою (рис.2).

2. Для різних відношень плечей реохорда  $l_1$  і  $l_2$ , заданих викладачем, і кожного з невідомих опорів, визначити еталонний опір  $r_e$  за допомогою магазину опорів (не менш 3 разів для кожного опору), який відповідає балансу моста ( $I = 0$ ).

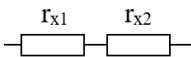
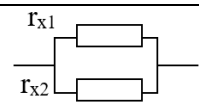
3. Повторити п.2 для послідовного і паралельного з'єднання невідомих опорів.

4. Визначити за формулою (2) величини опорів  $r_{x1}$ ,  $r_{x2}$ .

5. Результати вимірів порівняти з теоретичними значеннями.

6. Результати вимірів занести в таблицю.

Таблиця

	№	$l_1, \text{м}$	$l_2, \text{м}$	$r_e, \text{Ом}$	$r_x, \text{Ом}$	$r, \text{Ом}$	$\Delta r, \text{Ом}$	$\delta, \%$
$r_{x1}$	1							
	2							
	3							
$r_{x2}$	1							
	2							
	3							
	1							
	2							
	3							
	1							
	2							
	3							

### 3. Контрольні запитання

1. Що називають опором ?
2. Одиниці виміру опору в СІ.
3. Від чого залежить опір металевого провідника?
4. Фізичне пояснення існування питомого опору провідника?
5. Які фактори впливають на питомий опір провідника?
6. Одиниці виміру питомого опору в СІ.
7. Виведіть розрахункову формулу (2).
8. Як отримали співвідношення (3)?
9. Виведіть формулу для послідовного і паралельного з'єднання провідників.

### Лабораторна робота №9-3

### ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РОЗЖАРЮВАННЯ СПІРАЛІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЛАМПИ

**Мета роботи:** експериментальне підтвердження характеру залежності опору металевих провідників від температури.

**Приладдя:** плата №2 лабораторного столу К-4822-2; вольтметр змінного струму на 250 В; амперметр змінного струму на 500 мА; електрична лампа на 60, або 100 ватт (опір якої при кімнатній температурі –  $R_{20}$  становить відповідно 70 Ом та 40 Ом).

## 1. Теоретичні відомості

Носіями електрики в металах є вільні електрони, які перебувають в безладному, хаотичному русі. Інтенсивність цього руху залежить від температури речовини. Якщо до кінців провідника прикласти напругу, то на хаотичний рух електронів накладається їх упорядкований рух. Цьому руху заважають позитивні іони металу, які розташовані у вузлах кристалічної решітки і які коливаються відносно цих вузлів. При зростанні температури провідника теплові коливання іонів стають більш інтенсивними, що приводить до зростання опору провідника. Залежності питомого опору, а також опору провідників для невеликих інтервалів температур мають такий вигляд:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t) \quad (1) \qquad R = R_0(1 + \alpha t) \quad (2)$$

Тут  $\rho_0$  і  $R_0$  – відповідно питомий опір і опір при  $0^\circ\text{C}$ ;  $t$  – температура в градусах Цельсія;  $\alpha$  - температурний коефіцієнт опору.

**Фізичний зміст коефіцієнту опору такий:** він чисельно дорівнює відносному зростанню опору при збільшенні температури на один градус.

Спіраль електричної лампи, яка використовується для освітлення, виготовляється з вольфраму. Питомий опір вольфраму  $\rho$  в широкому діапазоні температур нелінійно залежить від температури; тому для визначення температури розжареної спіралі користуються таблицею залежності температури від співвідношення її опорів в стані розжарення і при кімнатній температурі -  $R_T/R_0$ . Температуру спіралі при кімнатній температурі -  $R_{20}$  - вимірюють омметром (за допомогою моста Уїтстона), а її температуру в стані розжарення –  $R_T$  – за законом Ома для ділянки кола

$$R_T = \frac{U}{I}, \quad (3)$$

де  $U$  – напруга, яка прикладена до лампи, а  $I$  – струм, який проходить через спіраль лампи.

Таблиця 1

$R_T/R_{20}$	1	1,03	1,47	1,92	2,41	2,93	3,46	4,00	4,54	5,08	5,65
$T, K$	293	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$R_T/R_{20}$	6,22	6,78	7,36	7,93	8,52	9,12	9,72	10,33	10,93	11,57	12,19
$T, K$	1300	1400	1500	1600	1700	1800	1900	2000	2100	2200	2300
$R_T/R_{20}$	12,83	13,47	14,12	14,76	15,43	16,10	16,77	17,76	18,15	19,53	20,24
$T, K$	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000	3100	3200	3400	3500

Примітки:  $3655^0 K$  – температура плавлення вольфраму.

## 2. Порядок виконання роботи

1. Скласти електричне коло згідно рис. 1.
2. Змінюючи напругу на лампі в межах 130 – 220 В (через 10 вольт), виміряти відповідну силу струму.
3. Визначити  $R_T$ , за законом Ома (формула (3)).

Таблиця 2

№	$R_{20}, \text{Ом}$	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$R_T, \text{Ом}$	$R_T/R_{20}$	$T, \text{К}$
1						
2						
3						
4						
5						

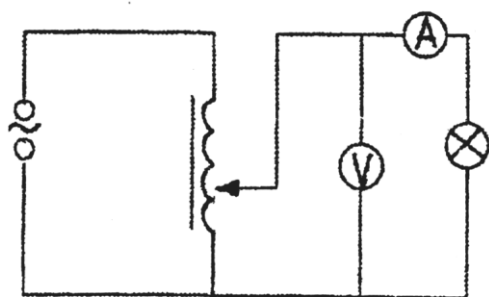


Рис. 1

4. Підрахувати співвідношення  $R_T/R_{20}$ .
5. Користуючись таблицею 1, визначити температуру розжарення спіралі лампи (з точністю до  $10^0$ ) при різних напругах.
6. Результати вимірів занести в таблицю 2.
7. Побудувати графіки залежності  $T = f(U)$  та  $R_T = f(T)$ .

## 3. Контрольні запитання

1. Що є носієм струму в металах?
2. Як залежить опір металевого провідника від температури?
3. Який фізичний зміст температурного коефіцієнта опору матеріалу?

4. В яких одиницях в СІ вимірюється температурний коефіцієнт опору?
5. Як експериментально визначається опір спіралі лампи в холодному та робочому станах ?
6. Чи є лінійною залежність опору вольфраму від температури в широкому діапазоні температур ?
7. Сформулюйте закон Ома для ділянки кола.
8. Який зв'язок між питомим та омичним опором металевго провідника?
9. Пояснити причину збільшення опору металевго провідника з температурою.

### **Лабораторна робота № 9-4**

#### **РОБОТА І ПОТУЖНІСТЬ В КОЛІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

**Метою роботи** є розрахунок роботи і потужності в колі постійного струму при послідовному і паралельному сполученні споживачів.

**Приладдя:** ВП 1–міліамперметр постійного струму 50 мА; ВП 2–вольтметр постійного струму 50 В; ВП 3–амперметр постійного струму 1 А.

#### **1. Теоретичні відомості**

Розглянемо ділянку кола постійного струму, до кінців якої прикладена напруга  $U$ . За час  $t$  через переріз провідника проходить заряд  $Q$ , при цьому виконується робота:

$$A = Q U = U I t \quad (1)$$

Враховуючи закон Ома для ділянки кола ( $U = I R$ ), цю формулу можна записати так:

$$A = I^2 R t \quad (2), \quad \text{або} \quad A = \frac{U^2}{R} t \quad (3)$$

Розділивши роботу  $A$  на час  $t$ , за який вона виконується, одержимо формулу потужності постійного струму:

$$P = \frac{A}{t} = I U = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (4)$$

Якщо на даній ділянці включено кілька споживачів електроенергії, то формули (1)–(4) мають такий же вигляд, але під  $R$  слід розуміти загальний опір кола.

#### **2. Порядок виконання роботи**

##### **Частина перша**

1. Скласти коло, зображене на рис.1.
2. Підключити коло до клем 0 – 30 В блоку живлення.

3. Зняти показання приладів при трьох різних положеннях ручки потенціометра.

4. Обчислити потужність, яку споживають резистори і роботу струму за 10 хвилин.

### Частина друга

1. Скласти коло, зображене на рис.2.

2. Підключити коло до клем 0 – 30 В блоку живлення.

3. Зняти покази приладів при трьох різних положеннях ручки потенціометра.

4. Обчислити потужність, яку споживають резистори і роботу струму за 10 хвилин.

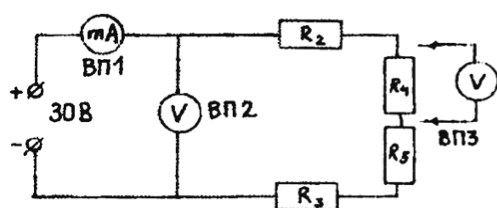


Рис.1

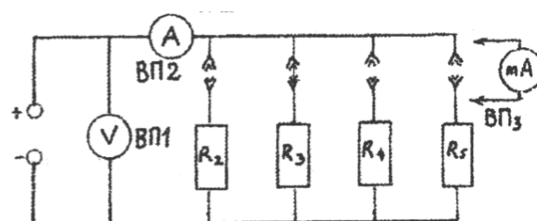


Рис.2

Таблиця

№ n/n	$I$ (мА)	$U$ (В)	$P$ (Вт)	$A$ (Дж)	З'єднання послідовне
1					
2					
3					
№ n/n	$I$ (мА)	$U$ (В)	$P$ (Вт)	$A$ (Дж)	З'єднання паралельне
1					
2					
3					

### 3. Контрольні запитання

1. Написати розрахункові формули роботи електричного струму.

2. Показати, як з формули (2), отримати формулу (3).

3. Що таке потужність електричного струму?

4. В яких одиницях в СІ вимірюється потужність електричного струму?

5. В які види енергії переходить енергія електричного поля?

6. При якому з'єднанні загальний опір у зовнішньому колі буде більший?
7. Записати закон Джоуля-Ленца для ділянки кола.
8. Записати закон Джоуля-Ленца в диференціальній формі.

### Лабораторна робота № 9-5

## ГРАДУЮВАННЯ ТЕРМОПАРИ

**Мета роботи:** вивчення принципу роботи термопари, градуювання термопари, визначення питомої термо-ЕРС.

**Приладдя та принадлежності:** термопара, мікроамперметр, електронагрівач, ртутний термометр.

### 1. Теоретичні відомості

Термопара являє собою два різнорідні металеві провідники, з'єднані між собою обома кінцями. Вона може бути використана для вимірювання різниці температур в двох певних точках або для генерування термо-ЕРС. Робота термопари заснована на дифузії електронів, внаслідок чого на межі двох різнорідних металів виникає контактна різниця потенціалів (рис.1).

Контактна різниця потенціалів обумовлена двома причинами:

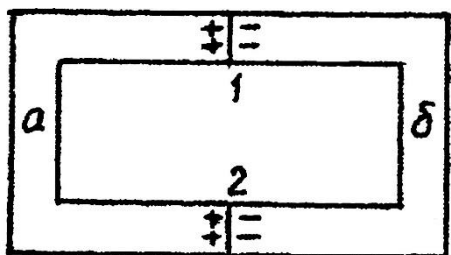


Рис.1

1. Різницею в роботах виходу  $A_1$  та  $A_2$  електронів з металу (а) і металу (б).  $A_1$  та  $A_2$  - робота, яку потрібно виконати, щоб звільнити електрон із металу в вакуум.
2. Різницею концентрацій вільних електронів в металах (а) та (б).

Згідно з уявленнями класичної фізики вільні електрони в металі утворюють електронний газ, тиск якого залежить від їх концентрації. Якщо припустити, що концентрація електронів в металі (а) більша, ніж в металі (б), то внаслідок різниці тисків електронного газу електрони з металу (а) будуть переходити в метал (б). Метал (а) буде при цьому заряджатись позитивно, метал (б) – негативно. На контакті виникне електричне поле, сили якого будуть гальмувати перехід електронів і коли ця сила буде рівною силі, що виникає від різниці тисків електронного газу в металах (а) та (б), подальший перехід електронів припиниться. На контакті встановиться різниця потенціалів:

$$\varphi_a - \varphi_b = \frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_a}{n_b} \quad (1)$$

де  $e$  – заряд електрона;  $k$  – стала Больцмана.

Доки на контактах "1" та "2" температура буде однаковою, струму в термопарі не буде. Якщо температури контактів різні, то виникає термоелектрорушійна сила, пропорційна різниці температур на контактах:

$$\varepsilon_T = \varepsilon_0(T_1 - T_2),$$

де  $\varepsilon_0$  – середня величина термоелектрорушійної сили, що виникає при різниці температур спаїв на один градус. Ця величина зветься питомою термо-ЕРС.

При великих різницях температур спаїв лінійна залежність термо-ЕРС від  $\Delta T$  порушується. Тому користуватись термопарою для вимірювання температур можна лише у випадку, якщо відома залежність її термо-ЕРС від різниці температур. Визначення експериментальним шляхом цієї залежності зветься градуюванням термопар.

На рис.2 наведена схема установки для градуювання термопар. Установка складається з електронагрівача  $H$  з термопарою  $T_n$  та термометром  $T$ .

## 2. Порядок виконання роботи

1. Визначити кімнатну температуру.
2. Помістити термометр в нагрівач.
3. Перемикач "ЛАТР" встановити в положення 0 – 250 В.
4. Встановити напругу на ЛАТР 20 – 25 В.
5. Провести не менше шести вимірювань температури і відповідних показань мікроамперметра.
6. За законом Ома для кожного значення струму визначити термо-ЕРС, прийнявши опір мікроамперметра 2000 Ом.
7. Результати занести в таблицю.
8. Побудувати графік  $\varepsilon = f(T)$ .
9. Визначити середнє значення питомої термо-ЕРС.

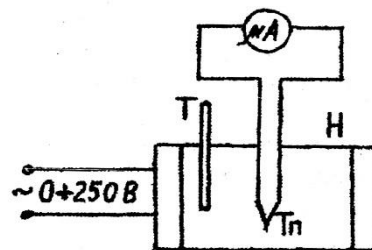


Рис.2

Таблиця

№ вимірювань	Температура		Показання мікроамперметра, мкА	Термо-ЕРС, мкВ	Питома термо-ЕРС, В/К
	холодного спаю, К	гарячого спаю, К			

--	--	--	--	--	--

### 3. Контрольні запитання

1. Що собою представляє термопара?
2. Яке практичне застосування термопари?
3. Що таке контактний потенціал?
4. Якими причинами обумовлена контактна різниця потенціалів?
5. Що таке питома термо-ЕРС?
6. Навіщо необхідно градувати термопару?

### Лабораторна робота № 9-6

## ВИЗНАЧЕННЯ ВНУТРІШНЬОГО ОПОРУ І КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ

**Метою роботи** є розрахунок ККД джерела в колі постійного струму та внутрішнього опору джерела струму.

**Приладдя:** амперметр, батарея елементів, магазин опорів.

### 1. Теоретичні відомості

Під електрорушійною силою (ЕРС) джерела струму  $\varepsilon$  розуміють величину, що чисельно дорівнює роботі сторонніх сил по переміщенню по електричному колу одиничного позитивного заряду.

$$E = \frac{A_{\text{ст.сил}}}{q}$$

У випадку, коли до джерела струму приєднане зовнішнє навантаження, ЕРС можна розрахувати за формулою:

$$\varepsilon = IR + Ir = U + Ir,$$

де  $U$  - падіння напруги на навантаженні, що має опір  $R$  (закон Ома для ділянки кола);  $Ir$  - падіння напруги усередині джерела струму;  $r$  - внутрішній опір джерела струму.

У випадку, коли джерело струму замкнуте без зовнішнього навантаження ( $R = 0$ ), по колу протікає струм, який називається струмом короткого замикання:

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{\varepsilon}{r}.$$

Зовнішній ланцюг може складатися не лише з провідника з опором, але ще й з будь-якого пристрою, що споживає енергію від джерела струму; наприклад, електродвигуна постійного струму. У цьому випадку під  $R$  потрібно розуміти еквівалентний опір навантаження. Енергія, що виділяється у зовнішньому

ланцюгу, може частково або цілком перетворюватися не тільки в тепло, але й в інші види енергії, наприклад, у механічну роботу, виконану електродвигуном.

Тому питання про використання енергії джерела струму має велике практичне значення. Величина спожитої енергії прямо пропорційна напрузі на пристрої, що споживає енергію.

Розглянемо ділянку кола постійного струму, до кінців якої прикладемо напругу  $U$ . За час  $t$  через переріз провідника проходить заряд  $Q$ , при цьому виконується робота:

$$A = QU = IUt \quad (1)$$

Враховуючи закон Ома для ділянки кола, цю формулу можна записати так:

$$A = I^2 R t \quad (2), \quad \text{або} \quad A = \frac{U^2}{R} t \quad (3)$$

Поділивши роботу  $A$  на час  $t$ , за який вона виконується, одержимо формулу потужності постійного струму

$$P = \frac{A}{t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad (4)$$

Якщо на даній ділянці ввімкнене кілька споживачів електроенергії, то формули (1)-(4) мають такий же вигляд, але під  $R$  слід розуміти загальний опір кола.

Відношення:

$$\eta = \frac{A_{\text{кор}}}{A_{\text{зар}}} = \frac{P_{\text{кор}}}{P_{\text{зар}}} = \frac{U}{E} = \frac{IR}{Ir + IR} = \frac{R}{r + R} \quad (5)$$

називається **коефіцієнтом корисної дії джерела струму**.

## 2. Порядок виконання роботи

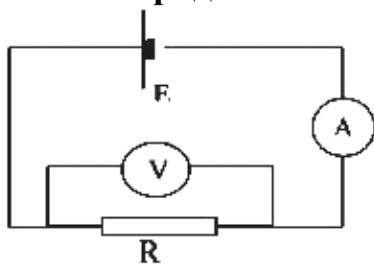


Рис. 1

1. Зібрати робочий ланцюг за схемою рис.1.
2. Підключити коло до клем 0 – 30 В блоку живлення.
3. Замкнути перемикач, зняти показання вольтметра на джерелі живлення та навантаженні, а також амперметра для п'яти різних положень ручки потенціометра.

потенціометра.

4. Розімкнути перемикач і замінити зовнішній опір.
5. Повторити виміри згідно п.2.
6. Розрахувати внутрішній опір джерела і його коефіцієнт корисної дії для різних номіналів опорів.
7. Результати розрахунків і вимірів занести в таблицю.

8. Побудувати графік залежності  $\eta$  від  $R$  та  $I$ .

Таблиця

№	$R, \text{Ом}$	$r, \text{Ом}$	$I, \text{А}$	$U, \text{В}$	$\varepsilon, \text{В}$	$\eta, \%$
1						
2						
3						

### 3. Контрольні запитання

1. Дати визначення таке ЕРС?
2. Дати визначення внутрішнього опору?
3. Який струм називають струмом короткого замикання?
4. Як визначається коефіцієнт корисної дії джерела струму?
5. Записати закон Ома для неоднорідної ділянки кола.
6. Записати закон Ома для повного кола.
7. Як залежить ККД від сили струму?
8. За яких умов у ланцюгу можна одержати максимальну корисну потужність?

## ЗМІННИЙ ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ

### Лабораторна робота № 10-1

#### **ВИЗНАЧЕННЯ ІНДУКТИВНОСТІ КОТУШКИ**

**Мета роботи:** опанування експериментального метода визначення індуктивності котушки.

**Приладдя:** амперметр, вольтметр, котушка, з'єднувальні провідники, осердя.

### 1. Теоретичні відомості.

Явище виникнення у замкненому контурі електрорушійної сили (ЕРС) при зміні магнітного потоку, що пронизує площу, обмежену контуром, називається електромагнітною індукцією. За законом Фарадея величина ЕРС індукції прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку  $\Phi$  через поверхню, обмежену контуром:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Знак “–” визначається правилом Ленца: індукційний струм завжди має такий напрямок, що створений ним магнітний потік намагається протидіяти зміні зовнішнього магнітного потоку.

Під час проходження в провіднику змінного струму магнітне поле, що створене цим струмом, теж змінюється, і в провіднику наводиться ЕРС індукції. Виникнення ЕРС індукції внаслідок зміни струму в колі називають явищем самоіндукції. Величина ЕРС самоіндукції пропорційна швидкості зміни струму:

$$\varepsilon_{si} = -L \frac{dI}{dt} \quad (2)$$

Коефіцієнт пропорційності  $L$  називають індуктивністю контуру. Індуктивність котушки – фізична величина, що чисельно дорівнює ЕРС самоіндукції, що виникає при зміні струму на одиницю за одиницю часу. Провідник має індуктивність в один генрі (1 Гн), якщо при зміні в ньому струму на 1 А за 1 с індукується ЕРС самоіндукції, що дорівнює 1 В.

Відомо ще одне визначення індуктивності: індуктивність контуру чисельно дорівнює магнітному потоку, створеному контуром при силі струму в 1 А. 1 генри – це індуктивність такого провідника, який створює магнітний потік в 1 вебер (1 Вб) при силі струму в контурі 1 А.

Індуктивність котушки залежить від геометричної форми, розмірів та магнітної проникності середовища  $\mu$ , що заповнює внутрішню частину котушки (соленоїда):

$$L = \mu\mu_0 n^2 S l, \quad (3)$$

де  $n$  – кількість витків на одиницю довжини котушки;  $S$  – площа перерізу котушки;  $l$  – довжина котушки.

Опір дроту котушки в колі постійного струму  $r$  називають активним опором.

Якщо ввімкнути котушку в коло змінного струму, то внаслідок періодичної зміни сили струму в котушці виникає ЕРС самоіндукції. Опір, що обумовлений ЕРС самоіндукції, називають реактивним (індуктивним) опором:

$$X_L = \omega L, \quad (4)$$

де  $\omega = 2\pi\nu$  - циклічна частота змінного струму;  $\nu$  – частота змінного струму (50 Гц);  $L$  – індуктивність котушки.

Повний опір контура змінному струму визначають за формулою:

$$Z = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (5)$$

Ємнісний опір котушки  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  значно малий, тому повний опір котушки можна розрахувати за формулою:

$$Z = \sqrt{r^2 + \omega L^2} \quad (6)$$

Звідси індуктивність котушки

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - r^2}}{\omega} \quad (7)$$

## 2. Порядок виконання роботи

1. Зібрати коло за схемою рис.1. Визначити активний опір котушки  $r = \frac{U}{I}$ .
2. Зібрати коло за схемою рис.2.
3. Визначити повний опір котушки в колі змінного струму: а) без залізного осердя, б) з розімкненим осердям, в) зі замкненим осердям, за законом Ома  $Z = \frac{U_D}{I_D}$ , де  $I_D$  та  $U_D$  - діючі (ефективні) значення струму та напруги.
4. Розрахувати індуктивність котушки за формулою (7).
5. Результати вимірювань та розрахунків занести в таблицю.

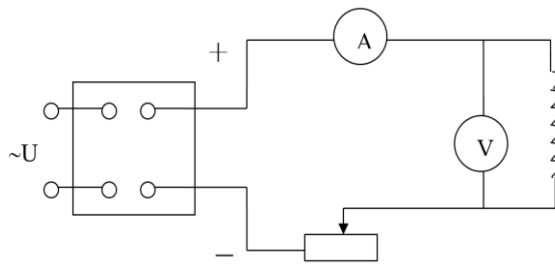


Рис.1

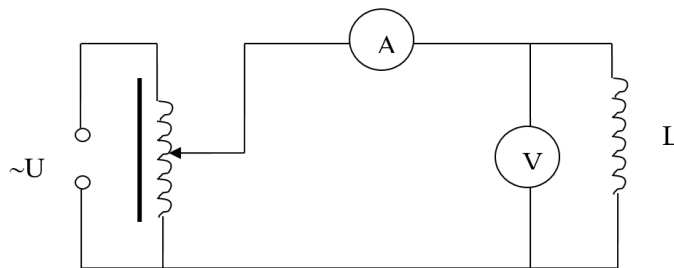


Рис.2

## 3. Контрольні запитання

1. Навести визначення явища електромагнітної індукції.
2. Що таке ЕРС?
3. Сформулювати закон Фарадея для електромагнітної індукції.
4. Дати визначення явища самоіндукції.

Таблиця

Вид струму	Положення осердя в котушці	№	$I, A$	$U, B$	$r, Ом$	$r_{сер}, Ом$	
Постійний	Котушка без осердя	1					
		2					
		3					
Змінний			$I, A$	$U, B$	$Z, Ом$	$Z_{сер}, Ом$	$L, Гн$

	Котушка без осердя	1					
		2					
		3					
	Котушка з розімкненим осердям	1					
		2					
		3					
	Котушка з замкненим осердям	1					
		2					
		3					

5. Сформулювати правило Ленца.
6. Що називають індуктивністю контура? Від чого вона залежить?
7. Одиниці вимірювання індуктивності. Навести визначення.
8. Чому опір котушки в колі змінного струму більший, ніж в колі постійного струму?
9. Від чого залежить повний опір контуру в колі змінного струму?
10. Що називають ємнісним та індуктивним опорами?
11. Чому опір котушки з осердям в колі змінного струму більший, ніж без осердя?

### Лабораторна робота №10-2

#### ВИВЧЕННЯ ЗАКОНУ ОМА ДЛЯ ЗМІННОГО СТРУМУ

**Мета роботи:** визначення індуктивності котушки, ємності конденсатора та електричного імпедансу.

**Приладдя:** котушка індуктивності, реостат, амперметр, вольтметр, ключ, набір осередків, конденсатор, міст Уітстона.

#### 1. Теоретичні відомості

Як відомо, змінне магнітне поле (якими б причинами ці зміни не були викликані) породжує в просторі вихрове електричне поле. Якщо розмістити провідний контур у цьому електричному полі, то у провіднику виникає ЕРС. За законом Фарадея:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

де  $\Phi$  – потік індукції магнітного поля.

Нехай джерело змінного струму замкнуте на котушку. Потік індукції магнітного поля  $\Phi$  пропорційний струму  $I$  в ланцюгу:

$$\Phi = L I,$$

де  $L$  - індуктивність котушки. Вона залежить від числа витків, геометричної форми і розмірів котушки, а також від магнітної проникності  $\mu$  магнетика навколо провідника. Якщо відбувається тільки зміна струму  $I$ , а індуктивність котушки не змінюється, то:

$$\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}. \quad (2)$$

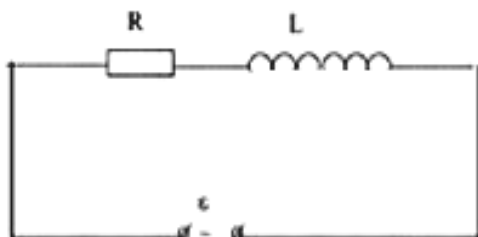


Рис. 1

Звідси індуктивність  $L$  чисельно дорівнює електрорушійній силі самоіндукції, наведеної в провіднику при зміні струму на  $1\text{ A}$  на протязі  $1\text{ c}$ .

Якщо число витків і розміри провідника такі, що при зміні струму на  $1\text{ A}$  за  $1\text{ c}$  наводиться ЕРС  $\varepsilon = 1\text{ В}$ , то його індуктивність дорівнює  $1\text{ Гн}$ .

Розглянемо ланцюг з омичним опором  $R$ , індуктивністю  $L$ , який містить джерело струму з ЕРС  $\varepsilon$  (рис.1).

Під  $R$  треба розуміти повний омичний опір усього ланцюга. Будемо вважати, що зовнішня ЕРС, прикладена до контуру, змінюється за законом синуса:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t,$$

де  $\varepsilon_0$  – амплітудне значення ЕРС,  $\omega = 2\pi\nu$  - циклічна або кругова частота (число повних коливань за  $2\pi$  секунд);  $\nu$  - число коливань у секунду.

Правила Кірхгофа встановлені для постійного струму. Але вони справедливі і для квазістаціонарного струму, миттєві значення якого у всіх перетинах ланцюга будуть практично однаковими. Правило Кірхгофа для розглянутого ланцюга запишеться так:

$$IR = \varepsilon + \varepsilon_{\text{самоінд}} \quad (3)$$

де  $I$ - струм, що тече у контурі.

Підставляючи в рівняння (3) значення  $\varepsilon$  і  $\varepsilon_{\text{самоінд}}$ , маємо:

$$IR = \varepsilon_0 \sin \omega t - L \frac{dI}{dt} \quad \text{чи} \quad L \frac{dI}{dt} + IR = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (4)$$

Це рівняння можна розглядати як **узагальнений закон Ома**, у якому член  $L \frac{dI}{dt}$  характеризує спадання напруги на індуктивності  $L$ . Тоді ЕРС зовнішнього ланцюга дорівнює сумі падінь напруг на опорі  $R$  і індуктивності  $L$ .

Частковим розв'язком цього рівняння буде:  $I = I_0 \sin(\omega t - \varphi)$ ,

де  $I$  - амплітудне значення струму;  $\varphi$  - початкова фаза, що визначає значення струму  $I$  у момент часу  $t = 0$ .

Визначимо амплітудне значення струму  $I_0$ . Для цього знайдемо  $\frac{dI}{dt}$  і  $I$  з рівняння (4).

$$\text{звідки} \quad I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} \quad (5)$$

Отримана формула є **законом Ома для ланцюга змінного струму**, що містить  $R$  і  $L$ , причому роль опору відіграє величина

$$R_{\Pi} = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}, \quad (6)$$

яка називається повним опором ланцюга. Величина  $L\omega$  називається **індуктивним опором** ( $R_{\text{інд}}$ ).

З виразу (6) видно, що при проходженні змінного струму опір ланцюга збільшується за рахунок індуктивного опору.

Розглянемо ланцюг змінного струму, що містить омичний опір  $R$ , індуктивність  $L$  і ємність  $C$  (рис.2).

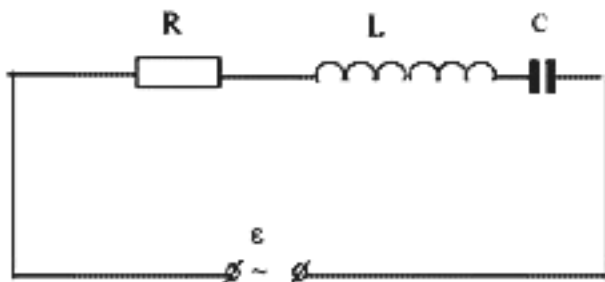


Рис.2

Якщо до обкладок конденсатора підключити джерело змінної напруги, то він буде перезаряджатися й у ланцюзі потече змінний струм. Припустимо, що прикладена змінна ЕРС змінюється за законом:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t.$$

Тоді відповідно до закону Кірхгофа

маємо:

$$IR + U = \varepsilon_0 \sin \omega t - L \frac{dI}{dt} \quad (7)$$

де  $IR$  – різниця потенціалів на омичному опорі;  $U$  – різниця потенціалів на ємності;  $L \frac{dI}{dt}$  - це ЕРС, що виникає на індуктивності.

Для будь-якого конденсатора справедлива рівність:  $Q = C U$ , де  $Q$  – заряд конденсатора.

За час  $dt$  заряд конденсатора зміниться на величину  $dQ$ , тоді:

$$dR = I dt, \quad I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt}.$$

Останній вираз можна представити у виді:  $\frac{dU}{dt} = \frac{I}{C}$ . Якщо продиференціювати вираз (7) по  $t$  і підставити значення  $\frac{dU}{dt}$  будемо мати:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} = \varepsilon_0 \omega \cos \omega t \quad (8)$$

Частковим розв'язком цього рівняння є:

$$I = I_0 \sin(\omega t - \varphi) \quad (9)$$

де  $I_0$  - амплітудне значення струму,  $\varphi$  - початкова фаза.

Визначимо амплітудне значення струму  $I_0$ . Для цього, розв'язавши спільно (8) і (9), одержимо остаточно **закон Ома для повного ланцюга змінного струму**:

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (10)$$

Знаменник  $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$  виразу (10) є **повним опором** (імпедансом). У випадку, коли ланцюг не містить ані омичного опору, ані індуктивності ( $R = 0, L = 0$ ), формула приймає наступний вид:

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\frac{1}{\omega C}} \quad (11)$$

де  $\frac{1}{\omega C}$  - ємнісний опір.

## 2. Порядок виконання роботи

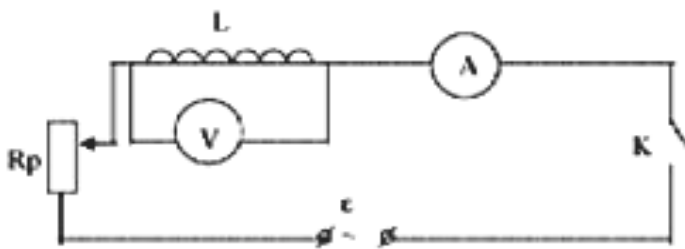


Рис.3

### Визначення індуктивності котушки

1. На мосту Уїтстона виміряти омичний опір  $R$  досліджуваної котушки.

2. Зібрати електричний ланцюг за рис.3.

3. Реостатом  $R_p$  задати різні струми  $I$  у ланцюгу і виміряти значення  $U$  на самій котушці, що відповідають встановленому струму  $I$ .

4. Результати вимірів занести у таблицю:

5. Обчислити повний опір  $R_{\Pi}$  за законом Ома:

Необхідно вимірювати опір  $R_{\Pi}$  при різних струмах (не менше трьох) і за остаточне значення приймати середнє арифметичне з окремих вимірів.

Таблиця

№	$R, \text{ Ом}$	$I, \text{ А}$	$U, \text{ В}$	$R_{\Pi}, \text{ Ом}$	$L, \text{ Гн}$	Примітки

Оскільки за даною схемою вимірюється різниця потенціалів безпосередньо на затискках самої котушки, то у виразі (5) під омичним опором треба розуміти опір тільки самої котушки. Підставивши у вираз (5) знайдені значення  $R_{\Pi}$  і  $R$

визначають  $L$  по формулі:  $L = \frac{\sqrt{R_{\Pi}^2 + R^2}}{\omega}$ .

#### *Дослідження впливу осердя на величину індуктивності*

Повторити вимір величини струму  $I$  і напруги  $U$  і обчислити коефіцієнт самоіндукції  $L$  при різних осередках.

#### *Вимір ємності конденсатора*

1. Зібрати електричний ланцюг за рис.4.

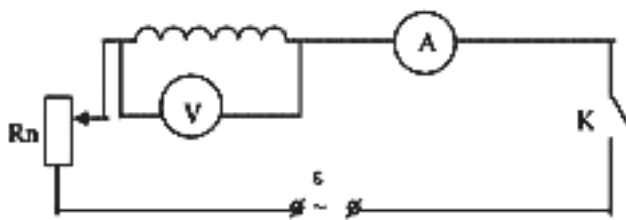


Рис. 4

2. Реостатом встановити у ланцюзі струм  $I$  і визначити напругу  $U$  на ємності  $C$ .

3. Обчислити ємнісний опір по формулі:  $R_C = \frac{U}{I}$ .  $R_C$  визначити для ряду значень струму і відповідних напруг.

4. За значенням  $R_C$  розрахувати ємність конденсатора  $C$ :

$$C = \frac{1}{\omega R_C}$$

#### *Визначення імпедансу ланцюга*

1. Зібрати ланцюг згідно рис.5.

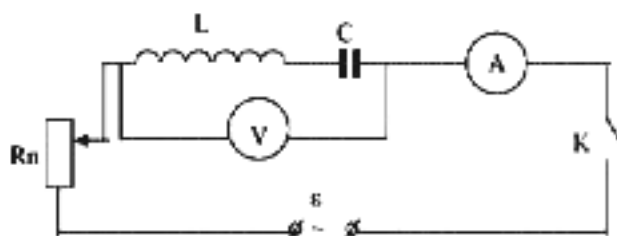


Рис.5

2. Встановити різні значення струму  $I$  у ланцюзі і визначити відповідні їм значення напруги  $U$ .

3. Визначити повний опір ланцюга, користуючись формулою:  $Z = \frac{U}{I}$ .

4. Порівняти значення імпедансу, отримані в результаті дослідів, з його значенням, знайденими за формулою:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \text{ де } R, L, C \text{ визначені досвідченим шляхом.}$$

### 3. Контрольні запитання

1. У чому полягає явище електромагнітної індукції?
2. Сформулюйте закон Фарадея.
3. Що називають індуктивністю контуру?
4. Сформулюйте закон Ленца.
5. Виведіть закон Ома для змінного струму.
6. Наведіть формулу періоду власних коливань контуру.
7. Що називають коефіцієнтом трансформації?
8. Як визначити корисну потужність у колі змінного струму?
9. Як зміниться період коливань контуру з плоским повітряним конденсатором, якщо відстань між його пластинами зменшити в  $k$  разів?
10. Як зміниться частота коливань у контурі, якщо у  $k$  разів зменшити індуктивність котушки і у таке саме число разів зменшити відстань між пластинами плоского конденсатора?

### Лабораторна робота №10-3

#### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТРАНСФОРМАЦІЇ І КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ ТРАНСФОРМАТОРА

**Мета роботи:** ознайомлення з роботою трансформатора, визначення коефіцієнта трансформації і ККД трансформатора.

**Приладдя:** два амперметра змінного струму до 1 А, два вольтметра змінного струму до 250 В, трансформатор із осердям, реостат на 350 Ом, ключ однополюсний, сполучні провідники.

#### 1. Теоретичні відомості

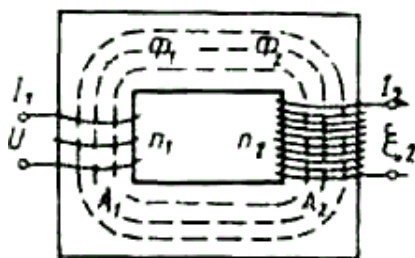


Рис.1

Трансформатор являє собою пристрій, заснований на явищі взаємодукції і призначений для перетворення напруги і сили змінного струму. Він має осердя замкнутої форми з магнітно-м'якого заліза чи магнітно-м'якого феромагнетика, що несе на собі дві обмотки – первинну і вторинну (рис.1).

Кінці первинної обмотки (вхід трансформатора) підключені до мережі змінного струму, а кінці вторинної обмотки (виходи) підключені до споживача електричної енергії. ЕРС індукції, що виникає у

вторинній обмотці, пропорційна числу витків у ній, і тому, змінюючи число витків, можна змінювати в широких межах напругу на виході трансформатора.

Розглянемо зв'язок між вхідною  $U_1$  і вихідною  $U_2$  напругами.

Припустимо, що  $\Phi$  – магнітний потік в осередді. У випадку змінного струму, що змінюється за законом  $I = I_0 \cos \omega t$ , і намагнічування осердя, далекого від насичення, магнітний потік буде також змінюватися по синусоїдальному закону  $\Phi = \Phi_0 \cos \omega t$ , де  $\omega$  - циклічна частота змінного струму,  $\Phi_0$  – максимальне значення потоку. У реальних трансформаторах частина ліній індукції, створених первинною обмоткою, виходить із осердя і замикається поза вторинною обмоткою (пунктир на рис.1), утворюючи так званий потік розсіювання.

Однак у гарних трансформаторах потік розсіювання малий у порівнянні з потоком у середині осердя, і тому ми будемо вважати, що той самий потік  $\Phi$  пронизує обидві обмотки. ЕРС, що виникає в первинній обмотці (ЕРС самоіндукції)

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\Phi}{dt} N_1 \quad (1)$$

$$\text{і ЕРС у вторинній обмотці} \quad \varepsilon_2 = -\frac{d\Phi}{dt} N_2 \quad (2)$$

де  $N_1$  і  $N_2$  - число витків у первинній і вторинній обмотці відповідно. Застосовуючи до обмоток трансформатора закон Ома для ділянки ланцюга який містить ЕРС, знаходимо напругу на вході трансформатора.

$$U_1 = I_1 r_1 - \varepsilon_1 = I_1 r_1 + \frac{d\Phi}{dt} N_1 \quad (3)$$

і напруга на виході:

$$U_2 = I_2 r_2 - \varepsilon_2 = I_2 r_2 + \frac{d\Phi}{dt} N_2 \quad (4).$$

Тут  $r_1$  і  $r_2$  - опори первинної і вторинної обмоток, а  $I_1$  і  $I_2$  – сили струму в них.

Обмежимося випадком розімкнутої вторинної обмотки ( $I_2 = 0$ ). Далі будемо вважати (звичайно виконується для всіх технічних трансформаторів), що  $I_1 r_1 \ll \varepsilon$ . Тоді, поділяючи почленно рівняння (3) і (4), знаходимо:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (5)$$

Відношення  $k = \frac{N_2}{N_1}$  називають коефіцієнтом трансформації. Він показує, у скільки разів вторинна напруга більше первинної в режимі холостого ходу.

Якщо трансформатор навантажений (вторинна обмотка замкнута на споживача), то спаданням напруги  $Ir$  не можна знехтувати в порівнянні з ЕРС індукції, і замість (5) одержуємо більш складне відношення.

Відношення корисної потужності трансформатора до споживаної потужності називається коефіцієнтом корисної дії трансформатора.

$$\begin{array}{ll} \text{Корисна потужність} & W_2 = I_2 U_2 \cos \varphi_2 , \\ & \end{array} \quad (6)$$

$$\begin{array}{ll} \text{споживана} & W_1 = I_1 U_1 \cos \varphi_1 , \\ & \end{array} \quad (7)$$

де  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  – кути зрушення фаз між відповідними струмами і напругами. Оскільки  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  невеликі, то  $\cos \varphi_1$  і  $\cos \varphi_2$  можна вважати рівними одиниці, тоді вираз для ККД приймає вид:

$$\eta = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1} \quad (8)$$

Коефіцієнт корисної дії трансформатора залежить від навантаження:

$\eta = f(I_2)$ . У сучасних трансформаторах ККД досягає 98 %.

Трансформатор, що утримує обидві обмотки на загальному залізному осередді, уперше винайдений ученим П. П. Яблочковим у 1876р. Це відкриття дало можливість застосовувати високу напругу для передачі електроенергії на великі відстані.

Застосування осердя забезпечує зменшення магнітного опору на шляху, по якому замикається основний магнітний потік  $\Phi$  трансформатора, що зв'язаний з обома його обмотками. Зменшення цього опору досягають за рахунок високої магнітної проникності залізного осердя.

Зменшуючи магнітний опір, ми тим самим значно збільшуємо індуктивний зв'язок між обмотками і створюємо сприятливі умови для передачі енергії у вторинну обмотку.

Пристрій, що споживає енергію (електромотор, лампи накалювання і т.д.) включають до вторинної обмотки трансформатора.

Для зменшення вихрових струмів Фуко і роботи втрати на намагнічування, обумовленої гістерезисом, осередок трансформатора роблять з магнітно-м'яких сортів трансформаторного заліза, виконаного у вигляді окремих пластин, розділених ізолюючими шарами. Товщина пластин для частоти 50 Гц складає від 0,35 до 0,5 мм. Трансформаторне залізо для збільшення питомого опору

звичайно містить близько 4 % кремнію, що істотно зменшує втрати на вихрові струми.

Трансформатор, виконаний П.П. Яблочковим, а слідом за ним И.Д. Усагіним, мав розімкнуте осердя. Зараз їх роблять замкнутими. За допомогою трансформаторів напругу, яку дає генератор змінного струму, значно підвищують. У нашій країні формується енергетична система з лініями передач змінного струму на напругах 500 000 В, 750 000 В, 1,5 МВ. На місцях споживання електричної енергії послідовним трансформуванням напругу зменшують до потрібної - 220 В, 127 В і т.д. У підвищувальному трансформаторі напруга зростає, а струм зменшується, а в знижувальному - навпаки. Втрати енергії на трансформаторах не перевищують 2 – 3 %.

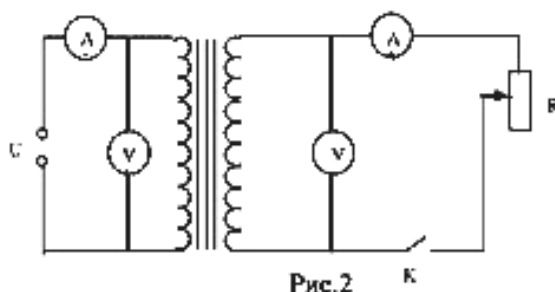


Рис.2 К

### *Експериментальна установка*

На схемі  $A_1$  і  $A_2$  -амперметри змінного струму до 1 А;  $V_1$  і  $V_2$  - вольтметри змінного струму на 250 В;  $Tr$ - трансформатор із осердям;  $K$ - однополюсний ключ. До схеми прикладена змінна напруга 220 В частотою 50 Гц.

### **2. Порядок виконання роботи**

1. Не підключаючи джерело струму, зібрати електричний ланцюг за рис.2.
2. Не замикаючи ключ  $K$ , включити джерело струму і визначити коефіцієнт трансформації за формулою (5).
3. Замкнути ключ  $K$ .
4. За допомогою реостата встановити струм навантаження  $I_2 = 0,1$  А та записати показання амперметра та вольтметра.
5. Аналогічно зробити виміри для наступних значень струму навантаження: **0,3; 0,5; 0,7; 0,9 А** або **0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 А**.
6. Розрахувати потужність, що підводиться і споживану, відповідно за формулами (6) і (7).
7. Визначити для кожного виміру ККД трансформатора за формулою (8).
8. Результати розрахунків записати в таблицю.

Таблиця

$N_2 n/n$	$I_1, A$	$U_1, B$	$W_1, Вт$	$I_2, A$	$U_2, B$	$W_2, Вт$	$K$	$\eta$

### 3. Контрольні питання

1. В чому полягає явище взаємної електромагнітної індукції?
2. В яких цілях використовують трансформатори?
3. Сформулювати другий закон Фарадея.
4. Які процеси відбуваються в навантаженому трансформаторі?
5. Як визначається коефіцієнт трансформації?
6. Чи можна трансформувати постійний струм?
7. Чому осердя виготовляють з листового заліза, виконаного у вигляді ізолюваних шарів, а не з цілого шматка?
8. З якого матеріалу треба виготовляти осердя трансформатора?
9. Яке значення має замкнута форма осердя?
10. Як буде поводити себе трансформатор, якщо його обмотку ввімкнути до джерела сталої напруги?

## МАГНІТНЕ ПОЛЕ

### Лабораторна робота № 11-1

### *ВИЗНАЧЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СКЛАДОВОЇ ІНДУКЦІЇ*

### МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ

**Мета роботи:** визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі за допомогою магнітного поля струму.

**Приладдя:** джерело сталого струму на 6 – 12 В, амперметр сталого струму, реостат, тангенс-гальванометр (ТГ), перемикач, ключ, провідники.

#### *1. Теоретичні відомості*

Земля являє собою природний магніт, полюси якого розташовані приблизно в 300 км від географічних полюсів. Магнітний полюс Землі, розташований на Півночі, зветь Південним магнітним полюсом, а магнітний полюс, розташований на півдні – північним магнітним полюсом. Через магнітні полюси Землі можна провести магнітні меридіани. Перпендикулярно до них проходять магнітні паралелі, тобто кожній точці Землі відповідають не тільки географічні, але і магнітні координати.

Якщо в деякій точці Землі підвісити магнітну стрілку, то вона розташується у напрямку вектора індукції магнітного поля Землі, яке нагадує поле прямого магніту. Силкові лінії цього поля на магнітних полюсах вертикальні, а на

магнітному екваторі – горизонтальні. В якій завгодно іншій точці земної поверхні вектор індукції, спрямований по дотичній до силової лінії, складає певний кут з вертикаллю та горизонталлю, тобто вектор індукції магнітного поля Землі має горизонтальну та вертикальну складові.

Магнітна стрілка, яка може обертатись на закріпленій вертикальній осі, встановлюється в площині магнітного меридіану під дією горизонтальної складової магнітного поля Землі, утворюючи кут з географічним меридіаном. Цей кут називають магнітним схиленням.

Визначення горизонтальної складової індукції магнітного поля Землі виконується за допомогою тангенс–гальванометра. Цей прилад являє собою плоску вертикальну котушку радіусом  $R$  з кількістю витків  $N$ . В центрі котушки горизонтально розташована коротка магнітна стрілка  $NS$ . Якщо розташувати витки тангенс–гальванометра в площині магнітного меридіана Землі, то й стрілка розташується в тій же площині.

Якщо через витки тангенс–гальванометра пропустити сталий струм  $I$ , то створюються магнітне поле, вектор індукції якого  $\vec{B}$  в центрі котушки спрямований перпендикулярно горизонтальній складовій  $\vec{B}_0$  індукції магнітного поля Землі (рис.1). Магнітна стрілка при цьому відхиляється на кут  $\alpha$ .

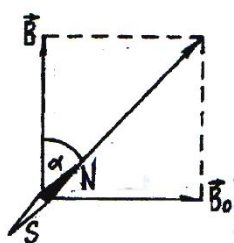


Рис.1

До речі, нагадаємо, що напрям магнітної індукції  $\vec{B}$  в центрі кругового витка зі струмом визначається за правилом свердлика.

Із рис.1 видно, що 
$$\frac{B_0}{B} = \text{tg } \alpha \quad (1)$$

Індукція магнітного поля  $B$  у центрі колових витків зі струмом  $I$  визначається за формулою:

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

де  $R$  – радіус витка;  $\mu$  – відносна магнітна проникненість середовища, для повітря  $\mu = 1$ ;  $\mu_0$  – магнітна стала,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ ,  $N$  – кількість витків.

Застосувавши (1) та (2), кінцеву розрахункову формулу одержимо у вигляді:

$$B_0 = \frac{\mu\mu_0 IN}{2R} \text{tg } \alpha \quad (3)$$

## 2. Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему (рис.2).
2. Встановити тангенс-гальванометр в площині магнітного меридіану.

3. Замкнути перемикачі  $K$  та  $K_1$ . Реостат при цьому має бути встановлено на максимальний опір.

4. За допомогою реостата  $r$  встановити певний струм, записати значення кута  $\alpha_1$ .

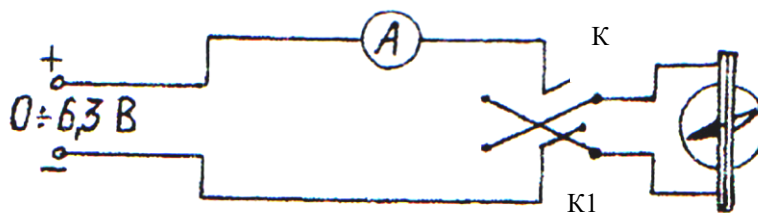


Рис.2.

5. Перемикачем  $K$  змінити напрям струму та записати значення кута відхилення стрілки  $\alpha_2$ . Для розрахунків взяти середнє значення  $\alpha$ .

Таблиця

№	$R, \text{ м}$	$N, \text{ Вт}$	$I, \text{ А}$	$\alpha_1, \text{ град.}$	$\alpha_2, \text{ град.}$	$\bar{\alpha}, \text{ град.}$	$B, \text{ Тл}$	$B_0, \text{ Тл}$	$\vec{B}_0, \text{ Тл}$	$B_0 \text{ табл}, \text{ Тл}$
1										
2										
3										
4										
5										

6. Вимірювання провести для п'яти значень струму.

7. Розрахувати для кожного значення струму величину горизонтальної складової магнітного поля Землі та її середнє значення.

8. Результати занести в таблицю. Одержане значення  $B_0$  порівняти з табличним.

### 3. Контрольні запитання

1. Що таке магнітне схилення?
2. Чому напрями магнітних та географічних меридіанів не співпадають?
3. Що являється джерелом магнітного поля?
4. Дати визначення індукції магнітного поля.
5. Запишіть закон Біо-Савара-Лапласа у диференціальній формі.
6. Напишіть формулу індукції магнітного поля в центрі кругового провідника зі струмом.
7. Як користуватись правилом свердлика?

### Лабораторна робота № 11–2

## ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ АМПЕРА

**Мета роботи:** співставити експериментально визначену величину сили Ампера із розрахованою аналітичним шляхом.

**Приладдя:** провідник, підвіс, постійний магніт, джерело постійного струму, амперметр, електричний ключ.

### 1. Теоретичні відомості

Навколо будь-якого рухомого заряду, крім електричного поля, існує також і магнітне поле. Електричне поле діє як на рухомі, так і на нерухомі електричні заряди. Магнітне поле діє лише на рухомі в цьому полі електричні заряди. Щоб охарактеризувати магнітне поле, треба розглянути його дію на певний струм.

Контур зі струмом в магнітному полі повертається, набуваючи рівноважного положення і його позитивна нормаль розміщується певним чином. Магнітна індукція в даному місці магнітного поля визначається максимальним обертовим моментом, що діє на контур з одиничним магнітним моментом або як сила, що діє на дуже маленьку магнітну стрілку, яка сама по собі не створює поле.

Одиниця магнітної індукції - тесла: 1 Тл - магнітна індукція такого магнітного поля, в якому на рамку з магнітним моментом  $1 \text{ А м}^2$  діє максимальний момент сили  $1 \text{ Н м}$ .

Лініями магнітної індукції називають такі лінії, дотичні до яких в кожній точці збігаються з напрямком вектора  $\vec{B}$  в цих точках поля. Лінії магнітної індукції охоплюють провідник зі струмом, який створює поле. Поблизу провідника лінії лежать в площині, що перпендикулярна до провідника. Лінії індукції магнітного поля ні в яких точках не можуть обриватися, вони завжди замкнені.

Напрямок ліній індукції магнітного поля струму визначається за правилом свердлика: якщо вкручувати свердлик за напрямком руху струму в провіднику, то напрямок руху його рукоятки покаже напрям ліній магнітної індукції.

Вигляд лінії магнітної індукції простих магнітних полів показаний на рис.1.

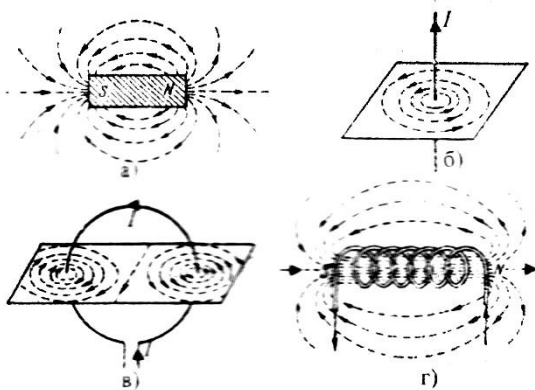


Рис.1

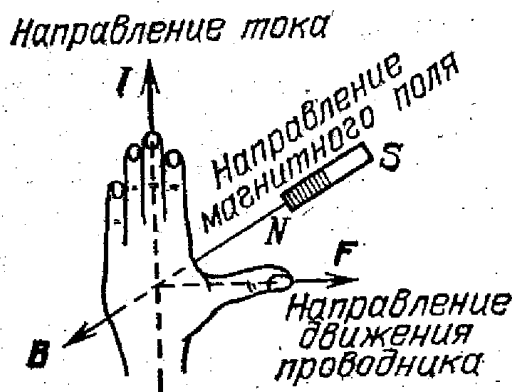


Рис.2

Лінії індукції постійного магніту виходять із його північного полюса і входять у південний. Північний полюс магніту збігається з тим кінцем соленоїда, з якого струм у витках тече проти стрілки годинника. Магнітне поле колового струму, який є одним витком соленоїда, подібне до поля дуже короткого штабового магніту, що розташований в центрі витка, так щоб його вісь була перпендикулярна до площини витка.

**Ампер встановив, що** сила  $d\vec{F}$ , з якою магнітне поле діє на елемент довжини  $dl$  провідника зі струмом, що знаходиться в магнітному полі, прямо пропорційна до сили струму  $I$  в провіднику і до векторного добутку елемента довжини  $d\vec{l}$  на магнітну індукцію  $\vec{B}$ .

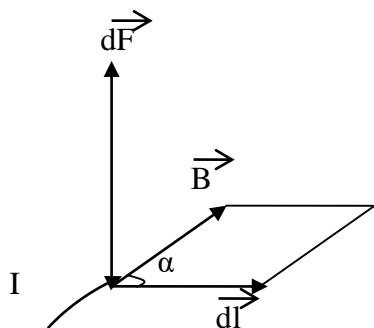


Рис.3

$$d\vec{F} = I[d\vec{l}, \vec{B}] \quad (1)$$

Напрямок сили  $d\vec{F}$  можна встановити за правилом векторного добутку і за правилом лівої руки: якщо долоню лівої руки поставити так, щоб у неї входили лінії магнітної індукції, а чотири витягнуті пальці спрямувати в напрямку електричного струму в провіднику, то відставлений на  $90^\circ$  великий палець покаже напрямок сили, що діє на провідник з боку поля.

Це правило зручне, коли елемент провідника зі струмом перпендикулярний до напрямку магнітного поля. В загальному випадку для визначення напрямку сили Ампера  $d\vec{F}$  слід скористатись правилом векторного добутку: вектор  $d\vec{F}$  напрямлений перпендикулярно до площини, що утворена векторами  $d\vec{l}$  і  $\vec{B}$  так, щоб з кінця вектора  $d\vec{F}$  обертання від вектора  $d\vec{l}$  до вектора  $\vec{B}$  найкоротшим шляхом відбувалося проти годинникової стрілки (рис. 3).

Модуль сили Ампера розраховується за формулою:

$$dF = IBdl \sin\varphi \quad (2)$$

де  $\varphi$  – кут між векторами  $d\vec{l}$  і  $\vec{B}$ .

Припустимо, що елемент провідника  $dl$  із струмом  $I$  перпендикулярний до напрямку магнітного поля ( $\sin\varphi = 1$ ), тоді закон Ампера можна записати у вигляді:

$$B = \frac{dF_{max}}{I dl} \quad (3)$$

Отже, магнітна індукція є силовою характеристикою магнітного поля.

Щоб з'ясувати характер впливу магнітного поля на окрему ділянку ланцюга, по якій тече струм, скористаємося магнітним полем підковообразного магніту. Ланцюг зі струмом складемо так, щоб тільки одна прямолінійна ділянка її виявилася в сильному полі (рис.4). Лише прямолінійна ділянка ланцюга  $ab$  знаходиться під дією зовнішнього поля, так що сили, які спостерігаються, є силами, з якими магнітне поле діє на прямолінійний струм.

$$F_A = IBl = kl \quad (5)$$

$$F^* = mg \operatorname{tg}\alpha \quad (6)$$

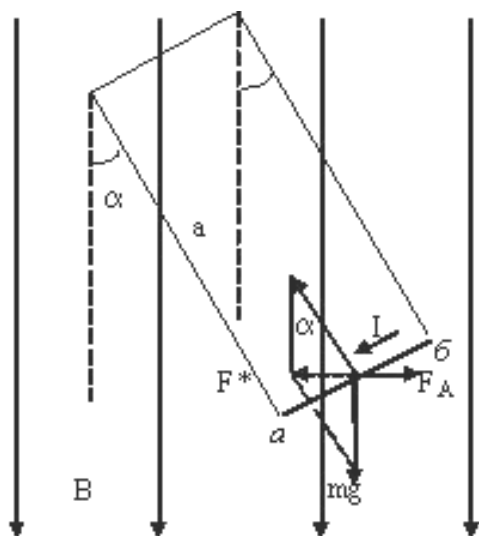


Рис.4

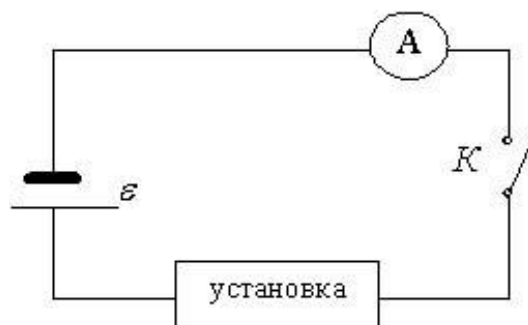


Рис.5

## 2. Порядок виконання роботи

1. Виміряти довжину провідника  $l$  та його масу  $m$ , а також довжину підвісу  $a$ .
2. Скласти коло за схемою (рис.3).
3. Подати струм і зафіксувати його значення.
4. Виміряти кут відхилення підвісу у стані рівноваги.

5. Змінюючи значення струму та його напрямок повторити пункти 3 та 4 п'ять разів.

6. Змінюючи напрямок струму в провіднику *аб* (наприклад, за допомогою перемикача *K*), змінюючи напрямок магнітного поля (наприклад, повертаючи магніт), дослідити напрямок діючої сили.

7. За формулою (6) обчислити значення сили  $F^*$ .

8. За значенням константи приладу, вказаною викладачем, розрахувати силу Ампера, що діє на провідник зі струмом.

9. Дані занести в таблицю.

Таблиця

№	$m$ , кг	$I$ , А	$L$ , м	$B$ , Тл	$\alpha$ , град	$a$ , м	$F$ , Н	$\delta$ , %
1								
2								
3								
4								
5								

10. За формулою

$$\delta = \frac{F_A - F^*}{F_A} 100\%$$

визначити відносну похибку дослідів.

### Контрольні запитання

1. Що таке магнітне поле і як проявляються його властивості?
2. У чому полягає фізичний зміст магнітної індукції?
3. У яких одиницях вимірюється магнітна індукція?
4. Що таке магнітні силові лінії і які їх властивості?
5. За яким правилом знаходять напрямок вектору магнітної індукції?
6. Що таке один ампер?
7. Сформулювати, при якій умові на провідник зі струмом, що знаходиться в магнітному полі, буде діяти сила Ампера?
8. Як визначається сила взаємодії двох провідників зі струмом?
9. Від чого залежить напрямок сили взаємодії двох провідників зі струмом (намалювати рисунок)?
10. Що буде відбуватися, якщо змінити матеріал, з якого виготовлений провідник?
11. Як пояснював Ампер причини виникнення магнітного поля штабового магніту?

**Лабораторна робота №11-3**  
**ВИЗНАЧЕННЯ ПИТОМОГО ЗАРЯДУ ЕЛЕКТРОНА ЗА**  
**ДОПОМОГОЮ МАГНЕТРОНА**

**Мета роботи:** визначення відношення заряду електрона до його маси за допомогою аналізу траєкторії руху електронів у електричному та магнітному полі, які діють одночасно.

**Приладдя:** електронна лампа, соленоїд, міліамперметр, два амперметри, вольтметр, потенціометр, два реостати, ключ.

**1. Теоретичні відомості**

Магнетроном називається вакуумна лампа, в якій потік електронів керується одночасно електричним і магнітним полями.

Як магнетрон можна використати двохелектродну лампу з циліндричним анодом  $A$  і катодом  $K$ , яка знаходиться в аксіальному магнітному полі. Поле створюється соленоїдом, який живиться постійним струмом. Соленоїд одягається на балон електронної лампи так, що напрям напруженості магнітного поля (яке створює соленоїд) співпадає з віссю симетрії лампи, вздовж якої розташований катод. При такому розташуванні катода і анода електрони, що випромінюються розжареним катодом, під дією електричного поля рухаються по радіальних траєкторіях при відсутності магнітного поля.

Якщо лампу розмістити в аксіальному магнітному полі, пропустивши струм через соленоїд, то на заряди, що рухаються, буде діяти сила Лоренца

$$F = QBV \sin \alpha \quad (1)$$

де  $Q$  - заряд частинок, що рухаються в магнітному полі з індукцією  $B$ ;

$V$  - швидкість рухомого заряду;

$\alpha$  - кут, який складає вектор індукції магнітного поля з вектором швидкості.

Оскільки сила Лоренца перпендикулярна до швидкості, то роботу вона не виконує і не змінює величину кінетичної енергії зарядженої частинки, а також її швидкості. Магнітне поле спричиняє викривлення траєкторії електронів. При деякому «критичному» значенні індукції магнітного поля  $B_{кр}$ , електрони не будуть досягати аноду і анодний струм припиниться.

Експеримент по визначенню співвідношення заряду електрона  $e$  до його маси  $m \left( \frac{e}{m} \right)$  за допомогою магнетрона полягає в тому, що в лампі встановлюється постійна напруга розжарювання і стала різниця потенціалів між

катодом і анодом, тобто створюються умови для постійного анодного струму. Потім включають живлення соленоїда і добиваються припинення анодного струму. Знаючи радіуси циліндрів катода і анода, величину анодної напруги і індукцію «критичного» магнітного поля, при якому припинився анодний струм, можна знайти величину співвідношення  $\frac{e}{m}$ . Розрахунки дозволяють одержати для цього наступну формулу

$$\frac{e}{m} = \frac{8U}{b^2 B_{\text{кр}}^2} \frac{1}{\left(1 - \frac{a^2}{b^2}\right)^2} \quad (2)$$

де  $U$  - величина анодної напруги в лампі;

$B_{\text{кр}}$  - критична індукція магнітного поля;

$a$  і  $b$  – радіуси катода і анода відповідно.

Магнітна індукція  $B_{\text{кр}}$  соленоїда розраховується за формулою:

$$B_{\text{кр}} = \mu \mu_0 I n \quad (3)$$

де  $\mu$  - магнітна проникність середовища ( для повітря  $\mu = 1$  );

$\mu_0$  - магнітна стала ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/М}$ );

$I$  - сила струму, що йде через соленоїд;

$n$  – число витків на одиницю довжини.

Метод магнетрона виключає необхідність вивчення траєкторії електрона в магнітному полі. Зміною величини індукції магнітного поля  $B$  при заданому значенні напруги  $U$  досягається така траєкторія електронів, при якій вони не можуть потрапити на анод лампи. Таким чином, дослід зводиться до зняття залежності сили анодного струму  $I_a$  від індукції магнітного поля  $B$  при сталій напрузі в анодному колі і колі розжарювання. Різкий спад цієї кривої відповідає критичним умовам роботи магнетрона.

## 2. Порядок виконання роботи

1. Зібрати схеми, зображені на рис.1 і 2.
2. Після перевірки схеми викладачем увімкнути коло живлення катода, встановивши реостатом  $R_1$  струм розжарювання 1,75 А.
3. Увімкнути напругу анодного кола і потенціометром  $R_2$  встановити напругу 160; 180; 200 В.
4. Для визначення  $B_{\text{кр}}$  увімкнути коло соленоїда і реостатом  $R_3$  поступово збільшувати силу струму. Проводячи вимір струму за допомогою амперметра ( $I_C$ ), слідкувати за спадом анодного струму ( $I_a$ ) за допомогою міліамперметра.



### 3. Контрольні питання

1. Які методи застосовують для визначення  $e/m$  ?
2. В чому полягає метод магнетрона і які його переваги?
3. Яка траєкторія електрона при його русі в магнітному полі?
4. Яка траєкторія електрона при його русі одночасно в магнітному і електричному полі (вектори напруженості електричного і магнітного поля взаємно перпендикулярні)?
5. Як визначається величина і напрямок сили Лоренца?
6. Як в роботі визначається критичне значення індукції магнітного поля?

### ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 1

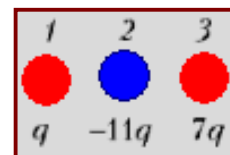
#### Взаємодія зарядів. Напруженість електричного поля у вакуумі

1. У скільки разів зміниться сила кулонівського відштовхування двох однаково заряджених куль, якщо, не змінюючи відстані між ними, перенести дві третини заряду з першої кулі на другу?
2. Дві однакових кулі, заряджені однойменними зарядами  $10\text{мкКл}$  й  $2\text{мкКл}$ , перебувають на відстані  $2\text{м}$  друг від друга. Як зміниться сила кулонівської взаємодії після короткочасного з'єднання куль провідником?
3. Як зміниться модуль сили взаємодії двох однакових металевих куль, що мають заряди  $-6q$  і  $+2q$ , у випадку якщо кулі привести в зіткнення й розсунути на початкову відстань.
4. Середня відстань між електроном і протоном в атомі водню дорівнює  $5,3 \cdot 10^{-11}\text{м}$ . Визначити середню силу електростатичної взаємодії електрона и протона. Елементарний заряд  $1,6 \cdot 10^{-19}\text{Кл}$ .
5. У скільки разів треба зменшити відстань між двома зарядами, щоб при зануренні їх у рідину з діелектричною проникністю  $4$  сила взаємодії між ними була такою ж, як і у повітрі?
6. В деякій точці поля на заряд  $2\text{нКл}$  діє сила  $0,4\text{мкКл}$ . Знайти напруженість поля в цій точці.
7. Точковий заряд  $3,54 \cdot 10^{-6}\text{Кл}$  перебуває усередині коробки у формі прямокутного паралелепіпеда. Визначите сумарний потік вектора напруженості електричного поля, який створює заряд, через стінки коробки. Електрична стала дорівнює  $8,85 \cdot 10^{-12}\text{Ф/м}$ .

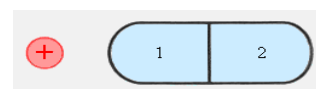
8. Якщо в полі позитивного електричного заряду вноситься рівний йому по модулю позитивний заряд, то яка буде напруженість поля в точці на середині відрізка, що з'єднує заряди.

9. Електричне поле біля поверхні Землі в середньому дорівнює  $150 \text{ Н/Кл}$ . Вектор напруженості спрямований униз перпендикулярно поверхні Землі. Припускаючи, що електричне поле створюється зарядом самої Землі, визначите модуль і знак цього заряду. Радіус Землі  $6,38 \cdot 10^6 \text{ м}$ .

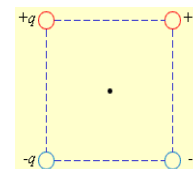
10. Заряджені провідні кульки 1, 2 та 3 мають однакові розміри. Який заряд буде мати перша кулька, якщо нею спочатку торкнутися другої кульки, а потім третьої? Вважати заряд  $q = 1 \text{ Кл}$ .



11. Незаряджене металеве тіло внесене в електричне поле позитивного заряду, а потім розділено на частини 1 й 2. Укажіть, який електричний заряд будуть мати частини тіла 1 й 2 після розділення?



12. Укажіть, куди спрямована кулонівська сила  $\vec{F}$ , що діє на позитивний точковий заряд, розташований у центрі квадрата, у кутах якого знаходяться заряди:  $+q, -q, +q, -q$ ?



13. Заряди  $1,8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$  і  $-1,8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$  розташовані у двох вершинах рівностороннього трикутника зі стороною  $2 \text{ м}$ . Визначити значення напруженість поля у третій вершині трикутника.

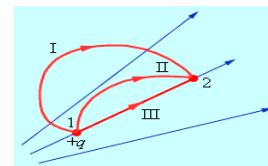
## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 2

### Потенціал електричного поля. Робота сил електричного поля

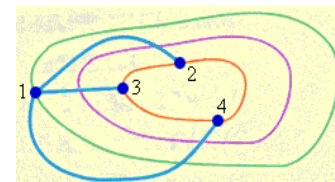
1. Напруженість електричного поля між двома точками в однорідному електричному полі дорівнює  $100 \text{ В/м}$ , а відстань між ними  $5 \text{ см}$ . Чому дорівнює різниця потенціалів між цими точками?

2. При переміщенні заряду  $20 \text{ нКл}$  з точки 1 в точку 2 була виконана робота  $10 \text{ мкДж}$ . Яка різниця потенціалів між цими точками?

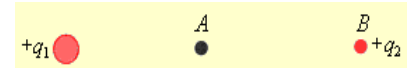
3. У постійному електричному полі переміщається позитивний заряд із точки 1 у точку 2 різними траєкторіями. Укажіть, як співвідноситься робота сил електричного поля при цих переміщеннях?



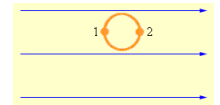
4. На рисунку представлена картина екіпотенціальних поверхонь деякого електричного поля. Укажіть, як співвідносяться абсолютні величини роботи з переміщення електричного заряду із точки 1 у точки 2, 3 та 4?



5. Електричне поле створене нерухомою позитивно зарядженою кулею  $+q_1$ . Укажіть, яка стане напруженість поля в точці  $A$ , якщо в точці  $B$  перебуває інший позитивний заряд  $+q_2$  і  $|q_2| < |q_1|$ ?



6. Провідна куля знаходиться в однорідному електричному полі. Порівняйте потенціали точок 1 й 2 кулі.



7. Визначити напруженість електричного поля в просторі між двома горизонтальними нескінченними провідними площинами, одна з яких (верхня) заряджена зарядом з поверхневою густиною  $5 \cdot 10^{-9} \text{Кл/м}^2$ , а інша (нижня) – з поверхневою густиною  $3 \cdot 10^{-9} \text{Кл/м}^2$ .

8. Центр провідної сфери знаходиться на відстані  $r = 40 \text{ см}$  від точкового заряду  $q = 3 \text{ нКл}$ . Визначте потенціал сфери з точністю до десятих.

9. Дві концентричні сфери мають радіуси  $10 \text{ см}$  й  $15 \text{ см}$ . Заряд внутрішньої сфери  $4 \cdot 10^{-8} \text{Кл}$ , заряд зовнішньої сфери  $2 \cdot 10^{-8} \text{Кл}$ . Визначте напруженість електричного поля на відстані від центру  $12 \text{ см}$ .

10. При переміщенні заряду  $4 \text{ нКл}$  на відстань  $1 \text{ м}$  у полі, утвореному нескінченною зарядженою пластиною, була виконана робота  $2 \text{ мкДж}$ . Яка напруженість електричного поля?

11. Кулька з зарядом  $4 \text{ мкКл}$  і масою  $1 \text{ мг}$ , рухаючись із стану спокою з точки 1 до точки 2, досягла швидкості  $2 \text{ м/с}$ . Яка різниця потенціалів між цими точками?

12. Якою повинна бути напруженість однорідного електричного поля у вакуумі, щоб електрон, що знаходиться в ньому, одержав прискорення  $1,6 \cdot 10^6 \text{ м/с}^2$ ? Заряд електрона  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{Кл}$ , маса електрона  $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ .

13. Електрон, який рухається горизонтально зі швидкістю  $1600 \text{ м/с}$ , влітає в однорідне електричне поле з напруженістю  $9 \text{ В/м}$  спрямованою вертикально вгору. На який кут відхилиться електрон від початкового напрямку через  $10^{-9} \text{ с}$ ? Заряд електрона  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{Кл}$ , маса електрона  $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ .

### ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 3

#### Електричне поле в діелектриках і в провідниках. Конденсатори.

#### Енергія електричного поля

1. Дві паралельні провідні пластини заряджені однаковими за модулем різнойменними зарядами. Якщо в просторі між пластинами вакуум, то напруженість електричного поля дорівнює  $3,6 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ . При заповненні цього

простору однорідним діелектриком напруженість електричного поля стає рівною  $1,2 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ . Визначте діелектричну проникність діелектрика.

2. Молекула води перебуває в електричному полі з напруженістю  $1,5 \cdot 10^4 \text{ В/м}$ . Дипольний момент молекули  $6,2 \cdot 10^{-30} \text{ Кл} \cdot \text{м}$ . Визначте максимальне значення моменту сил, що діють на молекулу.

3. Як зміниться ємність кульки при збільшенні її радіусу в 2 рази?

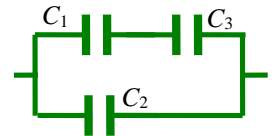
4. Який заряд необхідно надати провіднику, щоб його потенціал змінився до  $300 \text{ В}$ ? Ємність провідника  $10 \text{ пФ}$ .

5. Як зміниться заряд на обкладинках плоского конденсатора підключеного до джерела постійного струму, якщо простір між обкладинками заповнений діелектриком з діелектричною проникністю 2?

6. Електричний заряд на одній пластині конденсатора ( $+20 \text{ Кл}$ ), на іншій ( $-20 \text{ Кл}$ ). Напряга між пластинами дорівнює  $5 \cdot 10^4 \text{ В}$ . Чому дорівнює електрична ємність конденсатора?

7. Визначте загальну ємність системи конденсаторів.

$C_1 = 2 \text{ мкФ}$ ,  $C_2 = 4 \text{ мкФ}$ ,  $C_3 = 3 \text{ мкФ}$ .



8. Плоский конденсатор зарядили й відключили від джерела струму. Як зміниться енергія електричного поля усередині конденсатора, якщо збільшити в 2 рази відстань між обкладинками конденсатора?

9. Після того, як конденсатору надали заряд  $5 \text{ мкКл}$ , напруга між обкладками стала  $180 \text{ В}$ . Яка енергія електричного поля конденсатора?

10. Плоский конденсатор підключений до джерела постійного струму. Як зміниться заряд на обкладинках та енергія електричного поля усередині конденсатора, якщо збільшити в 2 рази відстань між обкладинками конденсатора?

11. Енергія електричного поля, створеного усередині плоского конденсатора, відключеного від джерела струму, дорівнює  $W$ . Чому стане рівною енергія поля, якщо з нього вийняти діелектрик з діелектричною проникністю 3?

12. Конденсатор ємністю  $24 \text{ мкФ}$  був заряджений до напруги  $600 \text{ В}$ . Потім конденсатор відключили від джерела струму й приєднали провідниками паралельно до іншого незарядженого конденсатора ємністю  $12 \text{ мкФ}$ . Визначити енергію, яка виділилася в провідниках.

13. Конденсатор, заповнений рідким діелектриком з діелектричною проникністю 2,3, зарядили, затративши на це енергію  $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$ . Потім

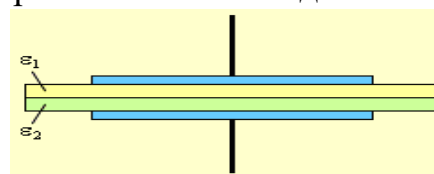
конденсатор від'єднали від джерела, злили з нього діелектрик і розрядили через провідник. Яка теплова енергія виділилася на провіднику?

14. Пластини плоского повітряного конденсатора розташовані на відстані 4 мм один від одного. Конденсатор заряджений до напруги 400 В. Знайдіть об'ємну густину електричної енергії в просторі між пластинами.

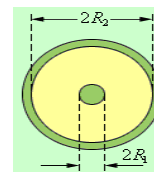
15. Три квадратних металевих пластини 1, 2 й 3 зі сторонами 8 см розташовані як показано на рисунку. Пластини ізольовані одна від одної аркушами паперу товщиною 0,4 мм із діелектричною проникністю 4. Зовнішні пластини з'єднані між собою. Визначте ємність такого конденсатора.



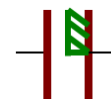
16. У плоский конденсатор вставлені дві діелектричні пластини однакової товщини, що заповнили весь об'єм конденсатора. Діелектричні проникності пластин 3,4 (плексиглас) і 5,6 (скло). Визначте, у скільки разів зміниться при цьому ємність конденсатора.



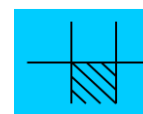
17. Коаксіальний кабель, що використовують для передачі телевізійних сигналів, складається із центральної провідної жили радіусом 0,8 мм і циліндричної провідної оболонки із внутрішнім радіусом 6 мм. Кабель заповнений діелектриком із проникністю 2,6. Знайдіть електроємність відрізка кабелю довжиною 1 м.



18. В повітряний конденсатор ємністю 4 мкФ на чверть його об'єму вводять пластину діелектрична проникність якої 7, як показано на рисунку. Яка ємність еквівалентного конденсатора.



19. Плоский повітряний конденсатор має ємність 8 мкФ. Визначити ємність того ж конденсатора, коли його наполовину заповнили діелектриком перпендикулярно до пластин конденсатора. Діелектрична проникність діелектрика 6.

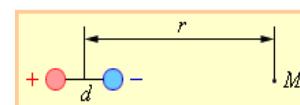


## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 4

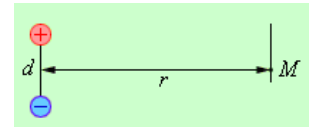
### Електричне поле диполя. Постійний електричний струм.

#### Електричний опір. Закон Ома.

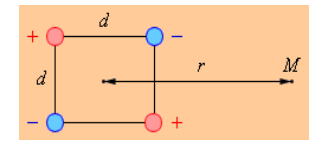
1. Як залежить напруженість електричного поля в точці  $M$  від відстані  $r$  до центра диполя? Відстань  $d$  між зарядами диполя вважати набагато меншою, ніж відстань  $r$  до точки  $M$ .



2. Як залежить напруженість електричного поля в точці  $M$  від відстані  $r$  до центра диполя? Відстань  $d$  між зарядами диполя вважати набагато меншою, ніж відстань  $r$  до точки  $M$ .



3. Система зарядів, що представлена на рисунку, називається квадруполем. Яка залежність напруженості електричного поля в точці  $M$  від відстані від цієї точки до центра квадруполя у випадку  $d \ll r$ ?



4. Яку максимальну різницю потенціалів можна підтримувати між двома концентричними провідними сферами радіусів 5 см й 10 см, якщо електричний пробій повітря, що заповнює простір між сферами, настає при напруженості 30 кВ/см?

5. Плоска діелектрична пластина вноситься в зовнішнє однорідне поле з напруженістю  $2,8 \cdot 10^4$  В/м так, що її грані перпендикулярні силовим лініям. Напруженість електричного поля в пластині виявилася рівною  $1,2 \cdot 10^4$  В/м. Визначите модуль поверхневої густини зв'язаних зарядів на пластині.

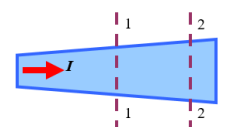
6. Який струм тече по провіднику, якщо за 10 с через провідник пройшов заряд 50 Кл.

7. По провіднику площею перерізу  $5 \text{ мм}^2$  тече струм силою 2,5 А. Визначити густину струму в провіднику.

8. Яка ЕРС джерела струму, якщо при переміщенні заряду 1,5 мкКл вздовж замкнутого кола їм виконана робота 12 мкДж.

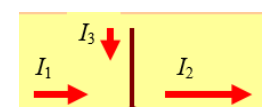
9. Електричний струм тече по двох послідовно з'єднаних провідниках різного перерізу  $S_1$  і  $S_2$  ( $S_1 > S_2$ ). Порівняйте сили струмів у цих провідниках і густину струмів.

10. Виберіть правильне твердження. На рисунку показано фрагмент провідника змінного перерізу, по якому іде постійний струм. Густина струму: 1) більша в перерізі 1-1; 2) більша в перерізі 2-2; 3) однакова в обох перерізах.



11. Чому дорівнює загальний опір п'яти провідників опором по 10 Ом кожний, з'єднаних паралельно.

12. Як зміниться електричний опір провідника при збільшенні його довжини вдвічі та збільшенні діаметру його перерізу в 2 рази?

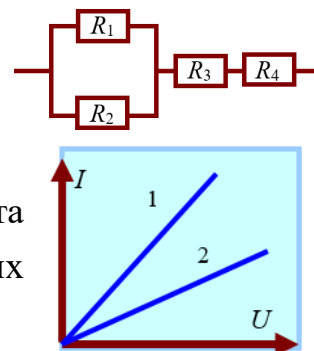


13. Чому дорівнює сила струму  $I_1$ , якщо  $I_2 = 3A$ ,  $I_3 = 1A$ ?

14. Визначте загальний опір електричного кола.

$R_1 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 3 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 2 \text{ Ом}$

15. На рисунку показано залежність сили струму від напруги для двох провідників, які мають однакову довжину та площу перерізу. Яке співвідношення питомих опорів цих провідників?



## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 5

### Закон Ома для повного кола. Робота та потужність струму.

1. Розрахуйте ЕРС джерела струму з внутрішнім опором  $1 \text{ Ом}$ , якщо при підключенні в зовнішньому ланцюзі резистора з опором  $3,5 \text{ Ом}$ . сила струму в ланцюгу стала  $1 \text{ А}$ .

2. Чому дорівнює внутрішній опір для елемента, струм короткого замикання у якого  $8 \text{ А}$  та ЕРС  $2 \text{ В}$ ?

3. Чому дорівнює питомий опір провідника, напруженість електричного поля в якому  $4,2 \text{ В/м}$ . Густина струму, який тече по провіднику  $2 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ .

4. Чому дорівнює питома провідність провідника, напруженість електричного поля в якому  $4 \text{ В/м}$ . Щільність струму, який тече по провіднику  $2,2 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ .

5. До двох провідників однакової довжини прикладена однакова напруга. Визначити відношення потужності на першому провіднику до другого, якщо діаметр його в 2 рази менший другого. Питомий опір провідників однаковий.

6. Є дві лампи, розраховані на напругу  $200 \text{ В}$  кожна. Потужність першої лампи  $50 \text{ Вт}$ , другої лампи  $100 \text{ Вт}$ . Порівняйте електричні опори цих ламп у робочому режимі.

7. Яка кількість тепла виділиться в провіднику за 5 хвилин? Струм який тече по провіднику  $1 \text{ А}$ , а різниця потенціалів на його кінцях  $5 \text{ В}$ .

8. На яку потужність розрахований споживач з опором  $50 \text{ Ом}$ , якщо напруга в ланцюзі  $110 \text{ В}$ .

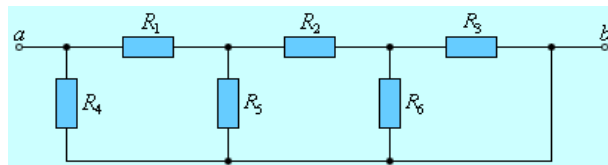
9. Скільки процентів дорівнює ККД джерела струму внутрішнім опором  $1 \text{ Ом}$ , якщо до нього приєднаний резистор опором  $4 \text{ Ом}$ ?

10. Дві лампи, які розраховані на  $220 \text{ В}$  та номінальними потужностями: у першої  $40 \text{ Вт}$ , у другої  $200 \text{ Вт}$ ; включені в мережу  $220 \text{ В}$  послідовно. Яка з ламп буде горіти яскравіше?

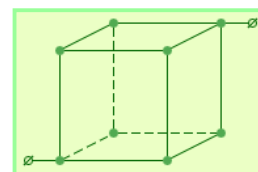
11. Два резистори, що мають опори: перший 3 Ом і другий 6 Ом, включені паралельно в ланцюг постійного струму. Як відносяться потужності електричного струму на цих резисторах.

12. Два резистори, що мають опори: перший 3 Ом і другий 6 Ом, включені послідовно в ланцюг постійного струму. Як відносяться робота електричного струму на цих резисторах за однаковий час.

13. Знайдіть еквівалентний опір  $R_{ab}$  ланцюга, зображеної на малюнку. Чисельний розрахунок проведіть при наступних значеннях опорів:  $R_1 = 3 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 9 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = R_4 = R_6 = 6 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 4 \text{ Ом}$



14. Розрахуйте загальний опір ланцюга, представленої на рисунку. Опір кожного відрізка дорівнює 1 Ом.



## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 6

### Магнітне поле у вакуумі. Магнітна індукція. Напруженість магнітного поля.

1. Визначити напруженість магнітного поля в центрі колового витка радіусом 1 см, по якому тече струм 1 А.

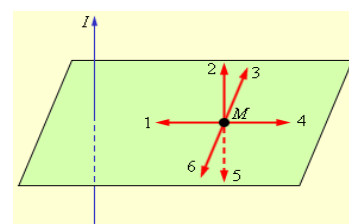
2. Визначити напруженість магнітного поля в точці, яка знаходиться на відстані 2 м від нескінченного провідника, по якому тече струм 6,28 А.

3. В однорідному магнітному полі, індукція якого дорівнює 0,5 Тл, обертається стрижень довжиною 2 м. Вісь обертання, яка проходить через один з кінців стрижня, утворює кут  $60^\circ$  з напрямом ліній індукції магнітного поля. Знайти магнітний потік, який перетинає стержень при кожному оберті.

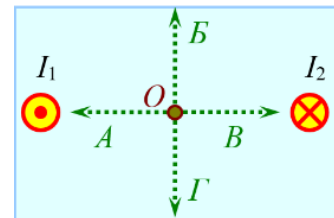
4. Напруженість магнітного поля в котушці 30 А/м, довжина її 40 см, по ній тече струм 0,1 А. Яку кількість витків має котушка?

5. Квадратний контур, який зробили із провідника довжиною 2 м, пронизує магнітне поле з індукцією 4 Тл під кутом  $30^\circ$  до площини рамки. Чому дорівнює магнітний потік, що пронизує рамку?

6. На рисунку зображений провідник, по якому тече електричний струм. Який напрямок має вектор  $B$  індукції магнітного поля в точці  $M$  ?

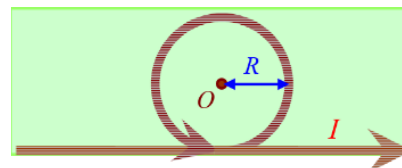


7. По провідникам 1 та 2 в різних напрямках ідуть однакові за величиною струми. В точці  $O$ , яка знаходиться на рівній відстані від провідників, вектор індукції магнітного поля співпадає з напрямом: 1.  $A$ . 2.  $B$ . 3.  $B$ . 4.  $G$ . 5. Дорівнює нулю.



8. В центрі колового дротяного витка утворюється магнітне поле напруженістю  $10 \text{ А/м}$  при різниці потенціалів  $12 \text{ В}$  на кінцях витка. Яку треба прикласти різницю потенціалів, щоб одержати таку ж напруженість магнітного поля в центрі витка вдвічі більшого радіуса, зробленого з того ж дроту?

9. Довгий провідник, по якому тече струм  $6,28 \text{ А}$ , зігнуто кільцем  $R = 1 \text{ м}$  (див. рис.). Чому дорівнює напруженість магнітного поля в центрі кільця?



10. Відстань між двома паралельними нескінченними провідниками  $2 \text{ м}$ . По ним в різних напрямках ідуть струми  $6,28 \text{ А}$  та  $3,14 \text{ А}$ . Визначити напруженість магнітного поля в точці, що знаходиться на відстані  $1 \text{ м}$  від кожного з провідників.

11. Магнітна індукція в бруську сталі дорівнює  $0,314 \text{ Тл}$ . Напруженість зовнішнього намагнічуючого поля  $1000 \text{ А/м}$ . Визначити магнітну проникність сталі.

12. Довга котушка щільно намотана дротом діаметром  $0,5 \text{ мм}$ . По ній іде струм  $0,02 \text{ А}$ . Чому дорівнює напруженість магнітного поля в центрі котушки?

13. Два довгих паралельних провідники розташовані на відстані  $d = 0,1 \text{ м}$  друг від друга. Кожний із провідників відштовхує інший із силою  $F = 6 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}$ . В одному з них тече струм силою  $I_1 = 2 \text{ А}$ . Приймаючи напрямок струму в першому провіднику за позитивний, визначте силу струму в другому провіднику.

14. По квадратному контуру, який зроблений із дроту довжиною  $2 \text{ м}$ , іде струм  $10 \text{ А}$ . Контур розташований паралельно силовим лініям магнітного поля індукцією  $0,1 \text{ Тл}$ . Чому дорівнює момент сили, що діє на контур?

15. Рамку, площа якої дорівнює  $0,5 \text{ м}^2$ , помістили в магнітне поле так, що силові лінії лежать у площині рамки. Коли по рамці пропустили струм  $4 \text{ А}$ , на неї став діяти момент сили  $12 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Чому дорівнює модуль індукції магнітного поля?

16. В однорідному магнітному полі з індукцією  $0,2 \text{ Тл}$  на контур з струмом у  $10 \text{ А}$  діє момент сили  $0,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Лінії магнітної індукції паралельні площині контуру. Чому дорівнює площа контуру?

## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 7

**Дія магнітного поля на струм і на заряд. Робота магнітного поля.**

**Електромагнітна індукція. Енергія магнітного поля**

1. В однорідному магнітному полі знаходиться провідник довжиною  $10 \text{ см}$  зі струмом у  $30 \text{ А}$ , під кутом  $30^\circ$  до вектора магнітної індукції. З боку магнітного поля на нього діє сила  $1,2 \text{ Н}$ . Чому дорівнює індукція магнітного поля?

2. В однорідному магнітному полі індукцією  $0,2 \text{ Тл}$  знаходиться провідник, по якому іде струм  $2 \text{ А}$ . Чому дорівнює сила, що діє на одиницю довжини провідника?

3. Прямий дріт довжиною  $25 \text{ см}$  і масою  $50 \text{ г}$  розташований горизонтально. Його кінці за допомогою легких гнучких провідників приєднані до джерела струму. Дріт перебуває в однорідному горизонтальному магнітному полі, вектор індукції якого орієнтований під кутом  $30^\circ$  щодо напрямку струму в дроті й дорівнює по модулю  $0,98 \text{ Тл}$ . Якої сили струм потрібно пропускати по дроті, щоб магнітна сила зрівноважила силу ваги?

4. Яка сила діє на протон, який рухається зі швидкістю  $2,5 \cdot 10^6 \text{ м/с}$  в однорідному магнітному полі з індукцією  $400 \text{ Тл}$ ? Протон рухається під кутом  $30^\circ$  до ліній магнітної індукції поля. Заряд протона  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ .

5. Протон у магнітному полі, індукція якого  $0,01 \text{ Тл}$ , описав коло радіусом  $10 \text{ см}$ . Яка швидкість протона?

6. В однорідне магнітне поле з індукцією  $10 \text{ мТл}$  перпендикулярно до ліній індукції влітає електрон, кінетична енергія якого  $30 \text{ кеВ}$ . Обчислити радіус кривизни траєкторії електрона.

7. По квадратному контуру іде струм  $10 \text{ А}$ . Магнітний потік, що його перетинає, зменшився з  $0,05 \text{ Вб}$  до  $0,03 \text{ Вб}$ . Яка виконана при цьому робота?

8. Контур, площею  $0,2 \text{ м}^2$ , по якому іде струм  $5 \text{ А}$ , розташований перпендикулярно силовим лініям магнітного поля індукцією  $1 \text{ Тл}$ . Яка робота буде виконана при повороті контуру на  $90^\circ$ ?

9. По контуру іде струм  $4 \text{ А}$ . При зміні індукції магнітного поля, в якому знаходиться контур, на  $0,2 \text{ Тл}$  була виконана робота  $0,08 \text{ Дж}$ . Чому дорівнює площа контуру?

10. По провіднику іде струм 4 А. При переміщенні його на відстань 0,25 м перпендикулярно до силових ліній магнітного поля індукцією 0,01 Тл була виконана робота 0,001 Дж. Чому дорівнює довжина провідника?

11. В однорідному магнітному полі індукцією 0,5 Тл рухається рівномірно провідник довжиною 0,1 м. По провіднику тече струм 2 А, швидкість руху провідника 0,2 м/с і спрямована перпендикулярно до магнітного поля. Знайти роботу переміщення провідника за 10 с.

12. За 3 секунди магнітний потік, що пронизує дротяну рамку, рівномірно збільшився з 6 Вб до 9 Вб. Чому дорівнює при цьому значення ЕРС індукції в рамці?

13. Провідник завдовжки 0,4 м перетинає магнітне поле індукцією 0,1 Тл під кутом  $30^{\circ}$  до силових ліній з швидкістю 10 м/с. Визначити е.р.с. індукції, що виникає в ньому.

14. Визначити кількість витків котушки, в якій при швидкості зміни магнітного поля 1 Вб/с наводиться е.р.с. індукції 200 В.

15. Індуктивність котушки з осердям дорівнює 20 Гн, струм у ній 1 А. Яка е.р.с. самоіндукції виникає в котушці, якщо коло розімкнеться і струм рівномірно спаде до нуля за 0,1 с?

16. У котушці при деякій швидкості зміни струму виникає е.р.с. самоіндукції 0,2 В. Яка е.р.с. виникне в котушці при тій же швидкості зміни струму, якщо в неї ввести осердя з магнітною проникністю  $\mu = 100$  ?

17. Із провідника довжиною 2 м зробили квадратний контур і розташували його в магнітному полі індукцією 0,1 Тл перпендикулярно до силових ліній. Яка ЕРС виникне в контурі, якщо його повернути на кут  $90^{\circ}$  за час 0,1 с.

18. Конденсатор з ємністю 10 мкФ заряджають до напруги 200 В. Потім його замикають на котушку з деякою індуктивністю. Максимальна сила струму в котушці виявилася рівною 2 А. Визначте її індуктивність.

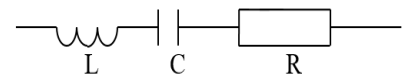
## ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 8

### Змінний струм. Взаємодія. Електричні коливання.

1. Сила струму в колі змінної напруги змінюється в залежності від часу за рівнянням  $I = 5\cos 200\pi t$  (А). Знайти силу струму при фазі  $\pi/3$  радіан.

2. Первинна обмотка трансформатора містить 220 витків, вторинна – 12 витків. Визначити напругу на вторинній обмотці трансформатора, якщо на первинну обмотку подати 200 В.

3. Котушка індуктивності, яка включена в коло змінного струму частотою 1000 Гц, має індуктивний опір 785 Ом. Визначити індуктивність цієї котушки.
4. Конденсатор ємністю 8 мкФ включили у коло змінного струму частотою 50 Гц. Визначити ємнісний опір цього конденсатора.  $1/\pi = 0,32$ .
5. У коло змінного струму ввімкнено конденсатор ємністю  $2 \cdot 10^{-6}$  Ф і котушка, індуктивність якої 0,005 Гн. При якому значенні циклічної частоти змінного струму в цьому колі настане резонанс?
6. Середня потужність в колі змінної напруги, амплітудою 250 В, дорівнює 10 Вт. Амплітуда сили струму в колі 100 мА. Визначити коефіцієнт потужності.
7. Вольтметр приєднаний до електродвигуна показує 200 В, амперметр 10 А, ватметр 1 кВт. Який зсув фаз між напругою та струмом?
8. Як зміниться частота і період коливань коливального контуру у разі збільшення ємності конденсатора в 4 рази та зменшення індуктивності котушки в 2 рази?
9. У коливальному контурі коливання заряду відбувається за законом  $q = q_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right)$  Яке значення  $\omega t$  відповідає амплітудному значенню заряду?
10. Чому дорівнює падіння напруги в ланцюзі, якщо падіння напруги на котушці 60 В, на конденсаторі 30 В, а на активному опорі 40 В ?



11. Амплітуда змінного струму 20 мА, частота 10 кГц. Визначити миттєве значення струму через  $10^{-4}$  секунди від його нульового значення.
12. Коло складається з послідовно з'єднаних резистора опором 3 Ом і конденсатора ємністю 1000 мкФ. Зовнішня напруга змінюється за законом  $U = 30 \sin 250t$  (В). Знайти максимальне значення струму в такому колі.
13. Частота змінного струму 50 Гц. Через скільки часу від своєї нульової величини миттєве значення сили струму стане рівним діючому значенню?
14. Послідовно з'єднані котушка індуктивністю 0,25 Гн і резистор опором 5 Ом включили в мережу, напруга в якій змінюється за законом  $U = 16 \cos 400t$  (В). Знайти відношення амплітудних значень напруги на котушці і резисторі.
15. У ланцюг змінного струму включений конденсатор, заряд на обкладинках якого за 5 мс зменшується на 30 % від максимальної величини. Визначити частоту змінного струму.

16. Вторинна обмотка трансформатора, що має 140 витків, пронизується магнітним потоком, що змінюється за законом  $\Phi = 0,01 \sin 100\pi t$  (Вб). Знайти діюче значення ЕРС.

17. Первинна обмотка силового трансформатора має 2200 витків. Яку кількість витків повинна мати вторинна обмотка, щоб напруга на ній була 3,5 В при силі струму 1 А? Омичний опір вторинної обмотки 0,1 Ом, напруга в мережі 220 В.

18. Значення змінного струму в електричному колі дорівнює 1 А при фазі  $\pi/4$ . Чому дорівнює діюче значення такого струму?

19. Соленоїд з дуже малим активним опором ввімкнули в коло змінного струму частотою 50 Гц. При напрузі 125,6 В струм дорівнює 1 А. Чому дорівнює індуктивність соленоїда?

20. Конденсатор ввімкнули в коло змінного струму частотою 50 Гц і напругою 200 В. Струм в колі дорівнює 3,14 А. Чому дорівнює ємність конденсатора?

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

### Основна література

1. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики : навч. посіб. / за ред. І. М. Кучерука. Київ : Техніка, 2006. Т. 2 : Електрика і магнетизм. 452 с.
2. Бушок Г. Ф., Левандовський В. В., Півень Г. Ф. Курс фізики : у 2 кн. : навч. посіб. / за заг. ред. Г. Ф. Бушка. Київ : Либідь, 2001. Кн. 1 : Фізичні основи механіки. Електрика і магнетизм. 446 с.
3. Воловик П. М. Фізика для університетів. Повний курс в одному томі : підручник. Ірпінь : Перун, 2005. 864 с. URL: <https://www.bookplusbook.com/ukr/books/view/44262>
4. Кучерук І. М., Горбачук І. Т., Луцик П. П. Загальний курс фізики : у 3 ч. : навч. посіб. / за заг. ред. І. Кучерука. Київ : Техніка, 2001. Ч. 2 : Електрика і магнетизм. 452 с.
5. Венгреневич Р. Д., Стасик М. Ю. Курс фізики : у 3-х ч. : навч. посіб. / за ред. проф. Р. Д. Венгреневича. Чернівці : Видавничий дім "Букрек", 2008. Ч. 2 : Електрика та магнетизм. 456 с.

6. Дідух Л. Д. Електрика та магнетизм : підручник. Тернопіль : Підручники і посібники, 2020. 464 с.
7. Антоняк О. Т. Загальна фізика. Основи електрики і магнетизму: навч. посіб. Львів : Вид. центр ЛНУ ім. І. Франка, 2009. 239 с.
8. Азаренков М. О., Булавін Л. А., Олефір В. П. Електрика та магнетизм : підручник. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2018. 564 с.
9. Правда М. І. Лекції з курсу загальної фізики. Розділ III. Електрика та магнетизм : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. 40 с. URL: <http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/4933>.
10. Загальний курс фізики: Збірник задач / І. П. Гаркуша та ін. ; за ред. І. П. Гаркуші. Київ : Техніка, 2003. 560 с. URL: [https://kzf.kpi.ua/wpcontent/uploads/2021/09/zadachi\\_garkusha.pdf](https://kzf.kpi.ua/wpcontent/uploads/2021/09/zadachi_garkusha.pdf)
11. Методичні рекомендації та завдання для самостійної підготовки студентів до тестового контролю з фізики. / уклад.: В. О. Заблудовський, С. А. Гришечкін, Л. П. Борисов, О. М. Гулівець. Дніпропетровськ : ДНУЗТ ім. В. Лазаряна, 2009. Ч. 3 : Електрика. Магнетизм. 44 с.
12. Електрика. Магнетизм : навчально-методичні рекомендації до лабораторних занять / упоряд. Е. П. Штапенко, Д. М. Волнянський, О. М. Гулівець, С. А. Гришечкін. Дніпро : Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2024. 54 с. URL: <https://crust.ust.edu.ua/handle/123456789/18196>

### **Інформаційні ресурси**

Вивчення дисципліни передбачає вміння здобувача вищої освіти використовувати різні інформаційні ресурси, у тому числі Інтернет–джерела та:

13. Електронна бібліотека. *Наукова бібліотека УДУНТ*. URL: <https://library.ust.edu.ua/uk/catalog?category=books-and-other>
14. Гулівець О. М. Дистанційний курс в СДН «ЛІДЕР». Електрика та магнетизм (STEM–освіта). *Український державний університет науки і технологій*. URL: <https://lider.ust.edu.ua/course/view.php?id=3312>

Навчальне видання

*Гулівець Олексій Миколайович, Штапенко Едуард Пилипович,  
Волнянський Дмитро Михайлович, Лучанінова Ольга Петрівна*

## **ЕЛЕКТРИКА І МАГНЕТИЗМ**

Навчальний посібник

Електронне видання

Відповідальний редактор О. М. Гулівець  
Комп'ютерна верстка О. М. Гулівець  
Дизайн обкладинки О. М. Гулівець

Експертний висновок склала канд. фіз.-матем. наук, доц. Т. Ф. Михайлова

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 1.853 від 26.12.2025)

Формат 60x84 <sup>1/16</sup>. Ум. друк. арк. 8,83. Обл.-вид. арк. 8,94.  
Зам. № 13

Видавець: Український державний університет науки і технологій  
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, ауд. 263 (наукова бібліотека)  
м. Дніпро, 49010.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

