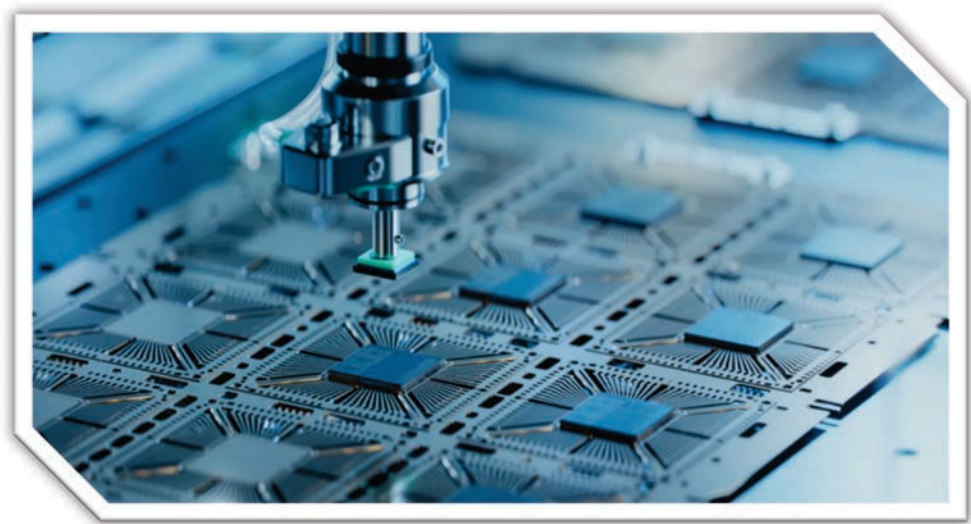
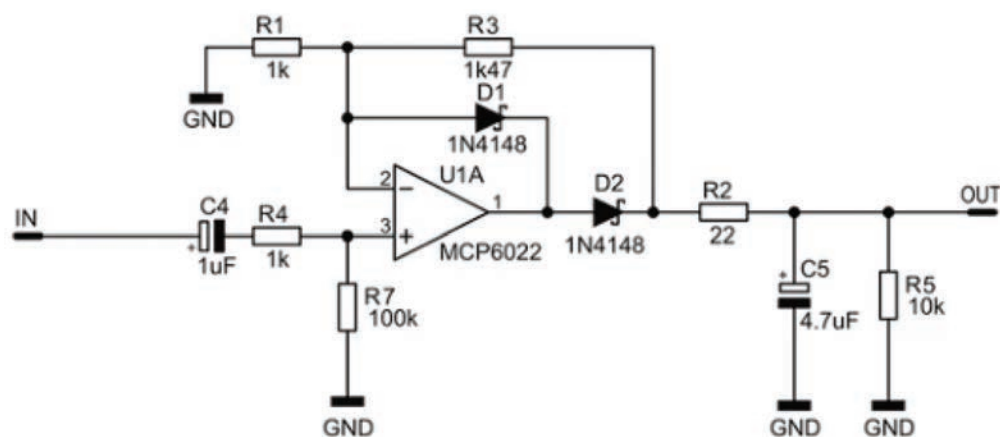


В.П. Сергієнко, І.А. Сліпухіна,  
І.С. Войтович, Л.Ю. Збаравська,  
Н.М. Зазимко, П.М. Малежик,  
М.П. Малежик, Т.В. Скубій,  
Б.Б. Колупаєв, В.В. Левчук,  
Т.Г. Ляшук

# Фізика для інформатиків

## Ч.2. Електрика та магнетизм



Міністерство освіти і науки України  
Рівненський державний гуманітарний університет

СЕРГІЄНКО В.П., СЛПУХІНА І.А., ВОЙТОВИЧ І.С.,  
ЗБАРАВСЬКА Л.Ю., ЗАЗИМКО Н.М., МАЛЕЖИК П.М.,  
МАЛЕЖИК М.П., СКУБІЙ Т.В., КОЛУПАЄВ Б.Б.,  
ЛЕВЧУК В.В., ЛЯШУК Т.Г.

# **Фізика для інформатиків.**

## **Ч.2. Електрика**

### **та**

### **магнетизм**

Навчальний посібник

Рівне – 2025

**УДК 537 (075.8)**  
**Ф 50**

*Розглянуто та рекомендовано до друку Вченою радою  
Рівненського державного гуманітарного університету  
(протокол № 1 від 30 січня 2025 р.)*

**Автори:**

*Сергієнко В.П., Сліпухіна І.А., Войтович І.С., Збаравська Л.Ю., Зазимко Н.М.,  
Малежик П.М., Малежик М.П., Скубій Т.В., Колупаєв Б.Б., Левчук В.В., Ляшук Т.Г.*

**Рецензенти:**

*Кух Аркадій Миколайович, доктор педагогічних наук, професор кафедри  
фізики Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка;*

*Мартинюк Олександр Семенович, доктор педагогічних наук, професор  
кафедри експериментальної фізики, інформаційних та освітніх технологій  
Волинського національного університету імені Лесі Українки.*

**Ф 50 Фізика для інформатиків. Ч.2. Електрика та магнетизм: навчальний  
посібник / В.П. Сергієнко та ін. Рівне : Волинські обереги, 2025. 216 с.  
ISBN 978-617-8624-25-5 (електронне видання)**

У запропонованому посібнику систематизовано навчальний матеріал з  
вибраних розділів фізики (електрика та магнетизм) для студентів комп'ю-  
терних спеціальностей вищих навчальних закладів. Розділи та підрозділи  
укладено відповідно до програми, змісту та специфіки фахової підготовки  
майбутніх спеціалістів ІТ-галузі. Посібник містить як теоретичну так прак-  
тичну складові (розв'язування задач, віртуальний експеримент та тестові  
завдання).

Посібник може стати в нагоді також широкому колу студентів інших  
спеціальностей, викладачам і усім бажаючим, які цікавляться методами  
фізичних досліджень, які використовуються в комп'ютерних технологіях.

**УДК 537 (075.8)**

© Сергієнко В.П., Сліпухіна І.А.,  
Войтович І.С., Збаравська Л.Ю.,  
Зазимко Н.М., Малежик П.М.,  
Малежик М.П. Скубій Т.В.,  
Колупаєв Б.Б., Левчук В.В.,  
Ляшук Т.Г., 2025

© «Волинські обереги», 2025

ISBN 978-617-8624-25-5 (електронне видання)

## ЗМІСТ

|                                                                     |            |
|---------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>ПЕРЕДМОВА.....</b>                                               | <b>4</b>   |
| <b>РОЗДІЛ 1. ТЕОРІЯ.....</b>                                        | <b>5</b>   |
| 1.1. Речовина в електричному полі. Постійний електричний струм..... | 5          |
| 1.2. Магнітне поле. Магнітні властивості речовини.....              | 38         |
| 1.3. Електромагнітні коливання і хвилі.....                         | 100        |
| <b>РОЗДІЛ 2. ПРАКТИКУМ.....</b>                                     | <b>133</b> |
| 2.1. Електрика.....                                                 | 133        |
| 2.2. Магнетизм.....                                                 | 142        |
| 2.3. Коливання та хвилі.....                                        | 149        |
| <b>РОЗДІЛ 3. ВІРТУАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ.....</b>                       | <b>158</b> |
| 3.1. Заряди і поля.....                                             | 158        |
| 3.2. Закон Ома.....                                                 | 161        |
| 3.3. Постійний струм.....                                           | 162        |
| 3.4. Лабораторія конденсаторів: основи.....                         | 165        |
| 3.5. Закон Фарадея.....                                             | 169        |
| <b>РОЗДІЛ 4. ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ.....</b>                              | <b>171</b> |
| 4.1. Електростатика.....                                            | 171        |
| 4.2. Основні закони постійного струму.....                          | 188        |
| 4.3. Магнетизм.....                                                 | 197        |
| <b>СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....</b>                        | <b>211</b> |

## ПЕРЕДМОВА

У сучасному світі, де інформаційні технології набирають все більшого значення, знання основ електрики та електроніки стає невід'ємною складовою підготовки будь-якого інформатика. Сфера інформатики не обмежується лише програмуванням чи управлінням даними; вона також включає в себе взаємодію між апаратним забезпеченням та програмним, де електрика відіграє ключову роль.

Сучасні комп'ютерні системи, мережі та різноманітні електронні пристрої розробляються на основі принципів електроніки. Розуміння електричних схем, принципів роботи транзисторів, резисторів, конденсаторів і інших компонентів є необхідним для створення або налаштування апаратного забезпечення. Це знання також допомагає в усуненні несправностей, що виникають у процесі експлуатації комп'ютерних систем.

Крім того, в умовах швидкої цифровізації та появи Інтернету речей (IoT) важливо знати, як електроніка впливає на програмні рішення. Інтернет-речей об'єднує величезну кількість пристроїв, які постійно взаємодіють між собою. Інформатики, які мають базові знання електрики, можуть більш ефективно розробляти та впроваджувати рішення для збору та обробки даних із цих пристроїв.

На закінчення, знання в галузі електрики та електроніки не лише розширює професійний кругозір інформатиків, але і забезпечує їм конкурентні переваги в кар'єрі, відкриваючи нові можливості для розвитку в інноваційних галузях технологій. Ця книга покликана стати корисним посібником для тих, хто прагне оволодіти основами електрики та магнетизму в контексті сучасної інформатики.

## РОЗДІЛ 1. ТЕОРІЯ

### 1.1. Речовина в електричному полі. Постійний електричний струм

Багато фізичних явищ у природі і оточуючому нас житті, не можуть бути пояснені тільки на основі законів механіки чи МКТ. У цих явищах виявляються сили, що діють між тілами на відстані, причому ці сили не залежать від мас взаємодіючих тіл і, отже, не є гравітаційними. Ці сили називають *електромагнітними силами*.

Про існування електромагнітних сил знали ще стародавні греки. Але систематичне, кількісне вивчення фізичних явищ, в яких виявляється електромагнітна взаємодія тіл, почалося тільки в кінці XVIII століття.

### Електричне поле в діелектриках. Провідники в електростатичному полі

Речовина, внесена до електричного поля, може істотно змінити його. Це пов'язано з тим, що речовина складається із заряджених частинок. У відсутності зовнішнього поля частинки розподіляються усередині речовини так, що створюване ними електричне поле в середньому за обсягами, що включають велике число атомів або молекул, рівне нулю. За наявності зовнішнього поля відбувається перерозподіл заряджених частинок, і в речовині виникає власне електричне поле. Повне електричне поле складається відповідно до принципу суперпозиції із зовнішнього поля і внутрішнього поля створюваного зарядженими частинками речовини.

Речовини відрізняються за електричними властивостями. Найбільш широкі класи речовини складають *провідники, напівпровідники і діелектрики*.

Основна особливість провідників – наявність **вільних** зарядів, які беруть участь в тепловому русі і можуть переміщатися по всьому провіднику. Типові провідники – метали, а вільними зарядами в них є електрони.

При відсутності зовнішнього поля в будь-якому елементі об'єму провідника негативний вільний заряд компенсується позитивним зарядом іонної ґратки. У провіднику, внесеному в електричне поле, відбувається перерозподіл вільних зарядів, внаслідок чого на поверхні провідника виникають позитивні і негативні заряди, дія яких не компенсується (рис. 1.1.1). Цей процес називають **електростатичною індукцією**, а заряди, що з'явилися на поверхні провідника, – **індукційними зарядами**.

Індукційні заряди створюють своє власне поле  $\vec{E}'$  яке компенсує зовнішнє поле  $\vec{E}_0$  у всьому об'ємі провідника:  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' = 0$ .

Повне електростатичне поле усередині провідника рівне нулю, а потенціали в усіх точках однакові і рівні потенціалу на поверхні провідника.

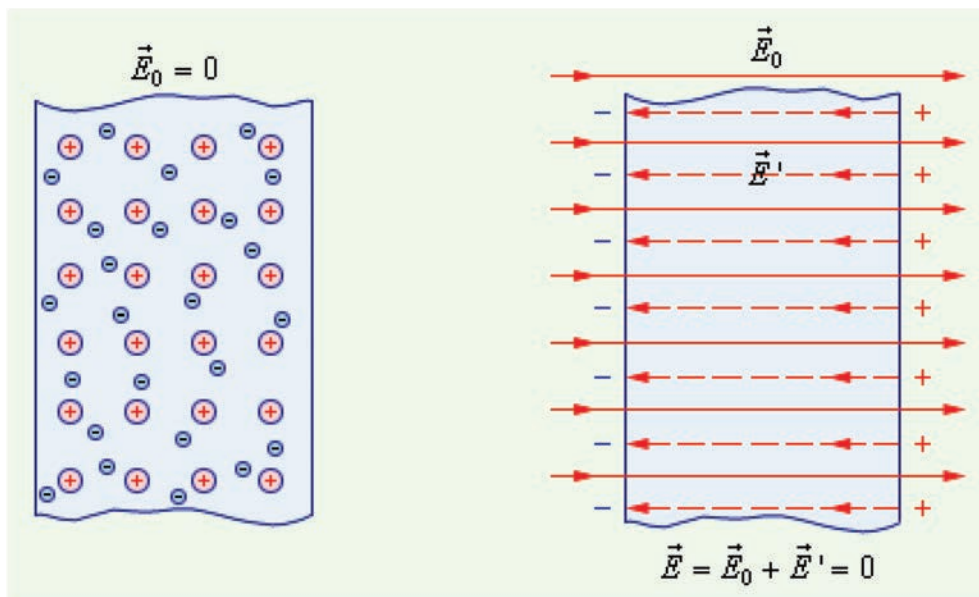


Рис. 1.1.1. Електростатична індукція.

Всі внутрішні області провідника, внесеного до електричного поля, залишаються електронеutralними. Якщо видалити деякий виділений об'єм усередині провідника і утворити порожнину, то електричне поле всередині порожнини буде рівне нулю. На цьому заснований **електростатичний захист**: чутливі до електричного поля прилади для виключення його впливу поміщають в металеві ящики (рис. 1.1.2).

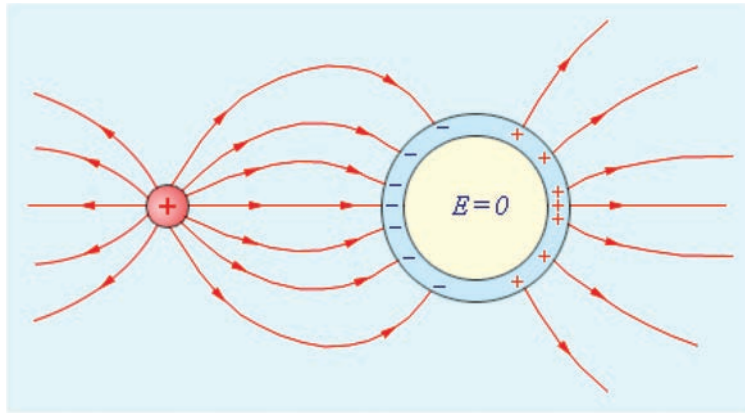


Рис. 1.1.2. Електростатичний захист. Поле в металевій порожнині рівне нулю.

Оскільки поверхня провідника є екіпотенціальною<sup>1</sup>, силові лінії біля поверхні повинні бути перпендикулярні до неї.

На відміну від провідників, в діелектриках (ізоляторах) немає вільних електричних зарядів. Вони складаються з нейтральних атомів або молекул. Заряджені частинки в нейтральному атомі пов'язані один з одним і не можуть переміщатися під дією електричного поля по всьому об'єму діелектрика.

При внесенні діелектрика до зовнішнього електричного поля  $\vec{E}_0$  в ньому виникає деякий перерозподіл зарядів, що входять до складу атомів або молекул. В результаті такого перерозподілу на поверхні діелектричного зразка з'являються надлишкові зв'язані заряди, що не компенсуються. 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 усередині діелектрика направлене протилежно до вектора напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього поля. Цей процес називається **поляризацією діелектрика**. В результаті повне електричне поле  $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' = 0$  усередині діелектрика виявляється за модулем меншим зовнішнього поля  $\vec{E}_0$ .

Фізична величина, яка рівна відношенню модуля напруженості  $\vec{E}_0$  зовнішнього електричного поля у вакуумі до модуля напруженості повного

<sup>1</sup> Екіпотенціальна поверхня – геометрична місце точок, які мають однаковий потенціал.

поля  $\vec{E}$  в однорідному діелектрику, називається **діелектричною проникністю речовини** ( $\epsilon$ ):

$$\epsilon = \frac{E_0}{E}. \quad (1.1.1)$$

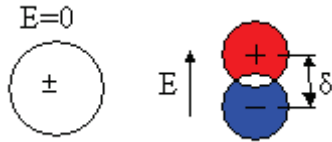


Рис. 1.1.3. Поляризація молекули в діелектрику.

Діелектрики, потрапляючи в електричне поле, призводять до зменшення зовнішнього поля. Це відбувається за рахунок того, що при внесенні діелектрика в електричне поле, виникає поляризаційний заряд, зв'язаний із зміщенням центрів позитивного та негативного зарядів діелектрика. Поляризаційні заряди діелектрика зв'язані один з одним і мають можливість зміщуватись, на відміну від провідників, лише на малу відстань в межах однієї молекули. При поляризації діелектрика заряди в кожній молекулі (рис. 1.1.3) зміщуються в протилежні боки.

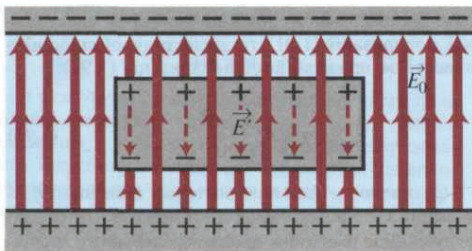


Рис. 1.1.4. Електричне поле в діелектрику.

При цьому кожна молекула перетворюється в *електричний диполь*, а поле діелектрика спрямоване завжди проти зовнішнього поля (рис. 1.1.4).

Кількісною характеристикою поляризації діелектрика є величину, яка називається **вектором поляризації**. Дипольний момент одиниці об'єму діелектрика:

$$\vec{P} = \frac{1}{V} \sum \vec{p}_i, \quad (1.1.2)$$

де  $V$  – об'єм діелектрику,  $\vec{p}_i = q\vec{\delta}$  – дипольний момент молекули,  $q$  – заряд молекули,  $\delta$  – зміщення центрів позитивного та негативного зарядів у молекулі.

Поляризаційний заряд, тобто зв'язаний заряд, при поверхневій поляризації дорівнює нормальній складовій вектора поляризації:  $\delta_{нов} = P_n$ .

При об'ємній поляризації зв'язаний заряд визначається потоком вектора поляризації:

$$q_{\text{зв}} = -\oint_S P_n dS; \quad (1.1.3)$$

тут враховано, що поляризаційні заряди завжди створюють поле, протилежне до зовнішнього.

В лінійному наближенні вектор поляризації пропорційний до величини прикладеного поля:

$$\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E}, \quad (1.1.4)$$

де  $\chi$  – діелектрична сприйнятливість, яка визначає властивість речовини поляризуватися та залежить від природи речовини.

### Напруженість електричного поля всередині діелектрика

Розглянемо плоский конденсатор, заповнений однорідним діелектриком. Напруженість поля  $\vec{E}$  всередині діелектрика складається з суми двох полів: поля  $E_0$ , створеного зарядами на металевих обкладках конденсатора:

$$E_0 = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}, \quad (1.1.5)$$

де  $\sigma$  – поверхнева густина зарядів на металевих обкладках, та поля  $E'$ , поляризованого діелектрика, яке залежить від поляризаційних зарядів, що виникають на його поверхні  $E' = \frac{\sigma_{\text{нов}}}{\varepsilon_0}$ , де  $\sigma_{\text{нов}} = P_n = \chi \varepsilon_0 E$ .

Тоді напруженість поля всередині діелектрика дорівнює:

$$E = E_0 + E_1 = \frac{\sigma - \sigma_{\text{нов}}}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} - \chi E.$$

Перетворивши цей вираз, одержимо остаточно  $E + \chi E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$ , або

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0(1 + \chi)} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} = \frac{E_0}{\varepsilon} = \frac{E_0}{1 + \chi}. \quad (1.1.6)$$

Тут  $\varepsilon$  – діелектрична проникність:

$$\varepsilon = 1 + \chi, \quad (1.1.7)$$

яка має такий же фізичний зміст, як і діелектрична сприйнятливість  $\chi$ .

Отже, результат (1.1.6) показує, що поле всередині діелектрика зменшується в  $\varepsilon$  або в  $(1 + \chi)$  разів.

Вектор електричної індукції  $\vec{D}$ :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}. \quad (1.1.8)$$

Отже, вектор електричної індукції (або електричного зміщення)  $\vec{D}$  має зміст поля вільних зарядів, тоді як вектор поляризації  $\vec{P}$  визначає поле поляризаційних зарядів, а напруженість поля  $\vec{E}$  має зміст сумарного поля – вільних та поляризаційних зарядів. Враховуючи зв'язок вектора поляризації та напруженості (1.1.4) та рівняння (1.1.7), визначимо зв'язок між  $\vec{D}$  і  $\vec{E}$ :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0 \vec{E} + \chi \varepsilon_0 \vec{E} = \varepsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}.$$

Вираз

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E} \quad (1.1.9)$$

є основним у теорії електричного поля у середовищі.

Якщо діелектрична проникність  $\varepsilon = 1$  (середовище – вакуум), напруженість поля у вакуумі дорівнює електричній індукції:  $E_0 = \frac{D}{\varepsilon_0}$ .

Напруженість поля в середовищі менша за напруженість поля у вакуумі:

$$E = \frac{E_0}{\varepsilon} = \frac{D}{\varepsilon_0 \varepsilon}. \quad (1.1.10)$$

Діелектрична проникність  $\varepsilon$  (або сприйнятливність  $\chi$ ) залежить від будови речовини – від типу молекул (атомів), їх взаємодії, та є фундаментальною характеристикою діелектриків.

### Електронна поляризація

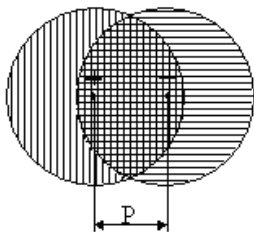


Рис. 1.1.5. Схема електронної поляризації.

Електронна поляризація виникає в неполярних діелектриках, тобто в речовинах, що складаються з неполярних молекул, в яких центри позитивних та негативних зарядів за відсутності зовнішнього поля співпадають. Електронний механізм поляризації полягає в тому, що центри зарядів в електричному полі зміщуються (рис. 1.1.5).

При такому зміщенні виникає наведений дипольний момент  $p = q\delta$ , де  $\delta$  – величина зміщення,  $q$  – заряд. При зміщенні зарядів виникають пружні сили, які змушують заряди коливатися навколо положення рівноваги:  $F_{\text{пр}} = -kx$ , де пружна стала зв'язана з власною частотою коливань зарядів  $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ .

Пружна сила при рівновазі дорівнює силі електричного поля:  $kx = qE$  або  $m\omega_0^2 x = qE$ , звідси одержимо величину зміщення зарядів  $\delta$ :  $\delta = x = \frac{qE}{m\omega_0^2}$ .

Тоді дипольний момент молекули дорівнює  $p = q\delta = \frac{q^2 E}{m\omega_0^2}$ , а вектор поляризації для неполярних молекул:

$$P = Np = \frac{Nq^2 E}{m\omega_0^2}. \quad (1.1.11)$$

Враховуючи зв'язок вектора поляризації та поля (1.1.4) з (1.1.11) одержуємо вираз для діелектричної сприйнятливості неполярного діелектрика  $\frac{Nq^2 E}{m\omega_0^2} = \chi \epsilon_0 E$ , звідки:

$$\chi = \frac{Nq^2}{m\omega_0^2 \epsilon_0}. \quad (1.1.12)$$

Вираз (1.1.12) показує, що для неполярних діелектриків сприйнятливість не залежить від температури і визначається частотою коливань  $\omega_0$  зв'язаного заряду молекул відносно центра молекули.

### Поляризація полярних молекул. Орієнтаційна поляризація. Закон Кюрі

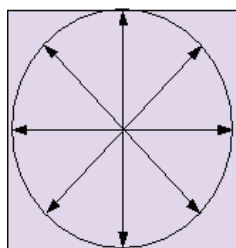


Рис. 1.1.6. Орієнтація дипольних моментів за відсутності поля  $\vec{E} = 0$ .

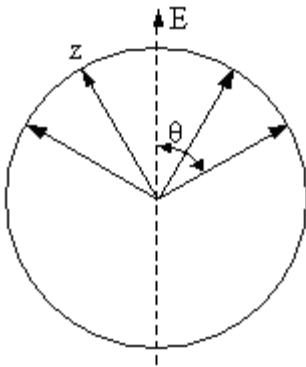
Полярними молекулами називаються несиметричні молекули, в яких центри позитивного та негативного зарядів зміщені за відсутності поля. Такі молекули мають власний дипольний момент.

Однак, за відсутності

зовнішнього поля хаотичний рух молекул призводить до рівномірного розподілу векторів дипольних моментів у просторі. При цьому вектор поляризації, як сума всіх дипольних моментів, дорівнює нулю (рис. 1.1.6). Якщо полярні молекули потрапляють в електричне поле, напрямком якого заданий (рис. 1.1.7), то дипольні моменти розвертаються в полі на деякий кут  $\theta$ , величина якого визначається запасом енергії диполя  $W = -pE \cos \theta$ .

Число молекул, орієнтованих під деяким кутом  $\theta$ , визначається розподілом Больцмана:

$$n(\theta) = Ne^{\frac{-u(\theta)}{kT}} = Ne^{\frac{pE \cos \theta}{kT}},$$



де  $N$  – загальна кількість молекул. Скориставшись розкладом експоненти в ряд  $e^x = 1 + x + \dots$ , дійсним за умови, що  $\frac{pE}{kT} < 1$ , одержимо наближене значення числа молекул  $n(\theta)$ :

$$n(\theta) = N \left( 1 + \frac{pE \cos \theta}{kT} \right). \quad (1.1.13)$$

Рис. 1.1.7. Орієнтація

дипольних моментів в електричному полі  $\vec{E}$ :  $\theta$  – кут орієнтації.

Перший доданок в (1.1.13)  $n(\theta) \sim N$  відповідає насиченню дипольних моментів, коли поле настільки велике, а температура настільки мала, що всі дипольні моменти орієнтуються тільки у напрямі поля  $\vec{E}$ .

Вектор поляризації при цьому не залежить від температури середовища й дорівнює максимальному значенню:

$$P_{\text{нас}} = Np. \quad (1.1.14)$$

Тепловий рух руйнує насичення, а кількість молекул, що орієнтовані під деяким кутом  $\theta$ , дорівнює

$$n(\theta) \sim \frac{pE \cos \theta}{kT}.$$

$$\text{Вектор поляризації тоді дорівнює } P = 2\pi \int_0^\pi p \cos \theta n(\theta) \sin(\theta) d\theta \cong \frac{Np^2 E}{3kT},$$

де проведено інтегрування по всіх кутах  $\theta$ .

Вираз

$$P = \frac{Np^2 E}{3kT} \quad (1.1.15)$$

називається **законом Кюрі**. Разом з (1.1.14), він дозволяє одержати криву поляризації полярних молекул (рис.1.1.8).

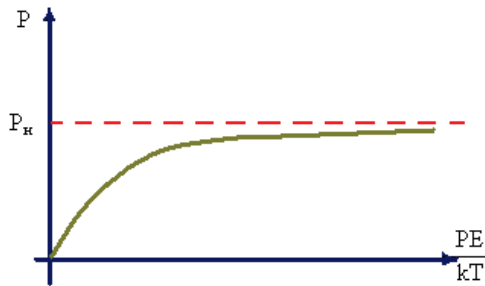


Рис. 1.1.8. Крива насичення поляризації полярних молекул.

Таким чином, за умов, далеких від насичення  $\left(\frac{pE}{kT}\right) < 1$ , поляризація полярного діелектрика лінійно зростає при збільшенні напруженості поля  $\vec{E}$ , або при зменшенні температури. Останній факт пояснюється тим, що при зниженні температури хаотичний тепловий рух припиняється і не перешкоджає повороту

дипольних моментів вздовж електричного поля  $\vec{E}$ .

Сприйнятливість полярних діелектриків

$$\chi = \frac{Np^2}{3\varepsilon_0 kT} \quad (1.1.16)$$

відображає залежність поляризації від температури.

### Сегнетоелектрики. Закон Кюрі–Вейсса. Гістерезис

Деякі полярні діелектрики мають дивовижні властивості – при температурах, нижчих так званої температури Кюрі  $T_c$ , ці діелектрики мають діелектричну сприйнятливість, що перевищує сприйнятливість у звичайному стані у тисячі разів. Крім того, у такому стані спостерігається залишкова поляризація, яка не зникає при зникненні поля. Залежність вектора поляризації від напруженості (або електричної індукції від напруженості) для них має вигляд петлі гістерезису (рис. 1.1.9).

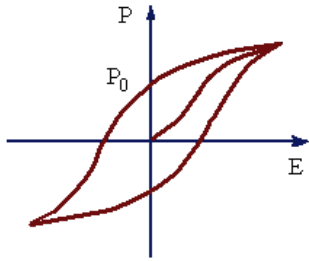


Рис. 1.1.9.

Діелектричний гістерезис  
в сегнетоелектриках.

Такі діелектрики називаються **сегнетоелектриками**. Типовий приклад – титанат барію  $BaTiO_3$ . Температура Кюрі для нього  $T_c = 118^\circ\text{C}$ . Сприйнятливість сегнетоелектриків визначається законом **Кюрі-Вейсса**:

$$\chi = \frac{Np^2}{3\varepsilon_0 k(T - T_c)} \quad (1.1.17)$$

Причиною сегнето-електричних властивостей є самовільна поляризація сегнетоелектриків при температурах  $T \neq T_c$ , яка виникає внаслідок взаємодії між молекулами. Під впливом цієї взаємодії в сегнетоелектриках виникають області самовільної поляризації, які називаються *доменами* (рис. 1.1.10).

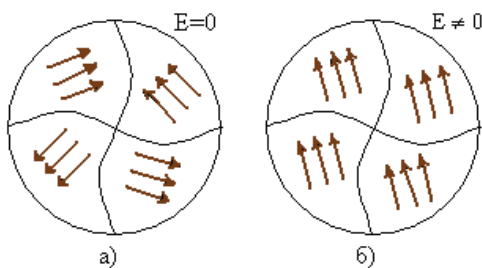


Рис. 1.1.10. Орієнтація доменів: а) поле відсутнє; б) орієнтація в полі.

Наявність доменів пояснює петлю гістерезису і залишкову поляризацію.

Якщо зовнішнє поле  $\vec{D}$  відсутнє, то домени в речовині орієнтовані хаотично і сегнетоелектрик неполяризований. Але, якщо ввімкнути електричне поле, то домени починають розвертатись вздовж, і внесок кожного домену в поляризацію буде в тисячі разів більшим, ніж внесок однієї молекули.

Петля гістерезису показує, що при вимиканні поля домени не одночасно повертаються в попереднє положення – для цього необхідно витратити додаткову енергію, джерелом якої є електричне поле.

### Закони постійного струму

В *електродинаміці* розглядаються явища і процеси, що зв'язані з рухом електричних зарядів або макроскопічних заряджених тіл. Одним з найважливіших понять електродинаміки є поняття про електричний струм.

**Електричним струмом** називають всякий упорядкований рух електричних зарядів.

Електричний струм, який виникає у провіднику внаслідок того, що в ньому створюється електричне поле, називається **струмом провідності**.

Якщо перенесення електричних зарядів здійснюється при переміщенні у просторі зарядженого макроскопічного тіла, то виникає струм, що називається **конвекційним**.

Для появи й існування електричного струму треба, щоб виконувалися дві умови:

*перша* – наявність у даному середовищі вільних електричних зарядів – носіїв струму. Такими зарядами в металах є електрони провідності; у рідинах (електролітах) – позитивні та негативні іони; у газах – позитивні і негативні іони й електрони; в напівпровідниках – електрони і дірки; у вакуумі – термоелектрони;

*друга* – необхідно, щоб на електричні заряди діяла сила  $\vec{F} = q\vec{E}$ . Отже, в даному середовищі повинно існувати електричне поле, енергія якого витрачалась би на переміщення електричних зарядів.

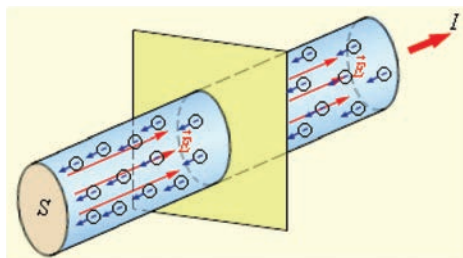


Рис. 1.1.11. Впорядкований рух електронів в металевому провіднику і струм  $I$ ;  $S$  – площа поперечного перерізу провідника;  $\vec{E}$  – електричне поле.

Щоб струм був тривалим, енергія електричного поля повинна весь час поповнюватись, тобто потрібен такий пристрій, в якому би певний вид енергії безперервно перетворювався в енергію електричного поля. Такий пристрій називається *джерелом електрорушійної сили*, або *джерелом струму*.

За технічний напрямок електричного струму умовно приймають напрямок руху позитивних електричних зарядів.

Кількісною мірою електричного струму служить **сила (величина) струму** – скалярна фізична величина, яка чисельно

дорівнює електричному заряду, що проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу (рис. 1.1.11):

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (1.1.18)$$

Якщо сила струму і його напрямок з часом не змінюються, то струм називається постійним. Тоді:

$$dq = Idt, \quad q = I \int_0^t dt.$$

Звідси:

$$I = \frac{q}{t}. \quad (1.1.19)$$

Щоб струм був постійним, треба, щоб в кожній частині провідника заряди не нагромаджувались і не зникали. Тому коло постійного струму повинно бути замкненим.

Характеристикою розподілу електричного струму по перерізу провідника є вектор **густини струму**  $\vec{j}$ .

Вектор  $\vec{j}$  напрямлений вздовж напрямку струму і чисельно дорівнює силі струму, який проходить через одиницю площі перерізу провідника, проведеного перпендикулярно до напрямку струму:

$$j = \frac{dI}{dS}. \quad (1.1.20)$$

Повна сила струму у провіднику:

$$I = \oint_S (\vec{j} d\vec{S}).$$

Виразимо силу і густину струму через середню швидкість  $\langle \vec{u} \rangle$  впорядкованого руху зарядів у провіднику. За час  $dt$  через поперечний переріз  $S$  переноситься заряд  $dq = nedV = ne\langle u \rangle Sdt$ .

Сила струму  $I = \frac{dq}{dt} = ne\langle u \rangle Sdt$ , отже, густина струму:  $\vec{j} = ne\langle \vec{u} \rangle$ .

У джерелі струму на його носії повинні діяти сили неелектростатичного походження, які називаються **сторонніми**.

Ці сили можуть бути обумовлені хімічними процесами в гальванічних елементах і акумуляторах; дифузією носіїв струму в неоднорідному середовищі; електричними полями, які створюються магнітними полями, що

змінюються з часом. Сторонні сили в генераторах виникають за рахунок механічної енергії обертання ротора генератора.

Сторонні сили, переміщаючи електричні заряди, виконують роботу.

Фізична величина, що чисельно дорівнює роботі, яка виконується сторонніми силами під час переміщення одиничного позитивного заряду, називається *електрорушійною силою (ЕРС)*, що діє в колі:

$$\varepsilon = \frac{A_{cm}}{q}. \quad (1.1.21)$$

Стороння сила  $\vec{F}_{cm}$  що діє на заряд  $q$ , дорівнює:  $\vec{F}_{cm} = q\vec{E}_{cm}$ .

Робота сторонніх сил над зарядом  $q$  на замкненій ділянці кола дорівнює:

$$A = \oint_L (\vec{F}_{cm} d\vec{l}) = \oint_L (q\vec{E}_{cm} d\vec{l}).$$

Тоді:

$$\varepsilon = \oint_L (\vec{E}_{cm} d\vec{l}). \quad (1.1.22)$$

ЕРС, що діє в замкнутому колі, визначається циркуляцією вектора напруженості сторонніх сил.

ЕРС, яка діє на ділянці 1–2 (рис. 1.1.12), дорівнює:  $\varepsilon_{12} = \int_1^2 \vec{E}_{cm} d\vec{l}$ .

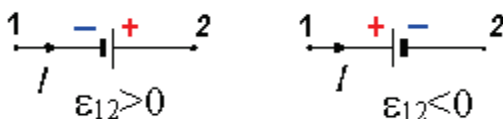
Результуюча сила, що діє в колі на заряд  $q$ :

$$\vec{F} = \vec{F}_{cm} + \vec{F}_e = q(\vec{E}_{cm} + \vec{E}). \quad (1.1.23)$$

Робота, яка виконується результуючою силою над зарядом  $q$  на ділянці 1–2 дорівнює:

$$A_{12} = q \int_1^2 (\vec{E}_{cm} d\vec{l}) + q \int_1^2 (\vec{E} d\vec{l}) = q\varepsilon_{12} + q(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (1.1.24)$$

**Напругою  $U_{12}$  на ділянці 1–2**



називається фізична величина, що визначається роботою, яка виконується сумарним полем електростатичних і сторонніх сил при переміщенні одиничного позитивного заряду на даній ділянці кола. Отже:

$$U_{12} = \frac{A_{12}}{q} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}.$$

Рис. 1.1.12. Залежність ЕРС від напрямку струму в провіднику.

Поняття напруги є узагальненням поняття різниці потенціалів: напруга на кінцях ділянки кола дорівнює різниці потенціалів в тому випадку, якщо на цій ділянці не прикладена ЕРС.

Ділянка кола, на якій на носії струму діють сторонні сили, називається *неоднорідною*. Ділянка кола, на якій не діють сторонні сили, називається *однорідною*. Для однорідної ділянки кола  $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ .

Німецький фізик Генріх Ом експериментально встановив, що сила струму  $I$ , що тече по однорідному металевому провіднику, пропорційна до напруги  $U$  на кінцях провідника:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (1.1.25)$$

де  $R$  – електричний опір провідника. Це рівняння виражає **закон Ома для однорідної ділянки кола**.

Одиниця опору – Ом: 1 Ом – опір такого провідника, в якому при напрузі 1В тече струм силою 1А.

Величина  $G = \frac{1}{R}$  – електрична провідність провідника.

Опір провідника залежить від його розмірів і форми, а також від матеріалу, з якого виготовлений провідник.

Для однорідного провідника опір  $R$  прямо пропорційний до його довжини  $l$  і обернено пропорційний до площі його поперечного перерізу  $S$ :

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (1.1.26)$$

де  $\rho$  – питомий опір.

Подано закон Ома для однорідної ділянки кола у диференціальній формі:

$$\frac{U}{l} = \rho \frac{l}{S} \cdot \frac{I}{S} = \frac{1}{\rho} \frac{U}{l} = \sigma \frac{U}{l},$$

де  $\sigma = \frac{1}{\rho}$  – питома електрична провідність.

Оскільки  $\frac{U}{l} = E$ ;  $\frac{I}{S} = j$ , то:

$$j = \sigma E. \quad (1.1.27)$$

В ізотропному провіднику носії струму в кожній точці рухаються в напрямку вектора  $\vec{E}$ . Напрямки  $\vec{j}$  та  $\vec{E}$  збігаються. Тому:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E}. \quad (1.1.28)$$

Отримане співвідношення виражає **закон Ома для однорідної ділянки кола в диференціальній формі**.

Закон Ома для однорідної ділянки кола в диференціальній формі зв'язує густину струму в кожній точці всередині провідника з напруженістю електричного поля в тій самій точці.

Оскільки напрямлений рух носіїв заряду створюється електричним полем у провіднику, то можна вважати, що середня швидкість  $\langle \vec{u} \rangle$  напрямленого руху зарядів прямо пропорційна до напруженості  $\vec{E}$  поля в провіднику:

$$\langle \vec{u} \rangle \approx \vec{E}, \text{ або } \langle \vec{u} \rangle = u_q \vec{E},$$

де  $u_q$  – рухливість носіїв заряду.

**Рухливість носіїв заряду** чисельно дорівнює швидкості напрямленого руху, якої вони набувають під дією електричного поля у провіднику з одиничною напруженістю.

Тоді формулу для густини струму можна записати у вигляді:

$$\vec{j} = ne u_q \vec{E}.$$

Порівнюючи цю формулу з виразом  $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ , отримуємо  $\sigma = e n u_e$ .

Отже, питома електропровідність металів прямо пропорційна до концентрації вільних електронів та їх рухливості.

На неоднорідній ділянці кола на носії струму діють, крім електростатичних сил  $\vec{F}_e = q\vec{E}$ , сторонні сили  $\vec{F}_{cm} = q\vec{E}_{ct}$ . Тому середня швидкість впорядкованого руху носіїв  $\langle \vec{u} \rangle$  буде пропорційна до сумарної сили  $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{E}_{cm})$ . Відповідно густина струму буде пропорційна до суми напруженостей  $\vec{E} + \vec{E}_{cm}$ :

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{E}_{cm}) = \frac{1}{\rho}(\vec{E} + \vec{E}_{cm}). \quad (1.1.29)$$

Це співвідношення є математичним виразом в диференціальній формі **закону Ома для неоднорідної ділянки кола**.

Помножимо скалярно обидві частини виразу для закону Ома на вектор  $d\vec{l}$ , який чисельно дорівнює довжині  $dl$  елемента провідника і напрямлений вздовж вектора густини струму:  $(\vec{j}d\vec{l})\rho = (\vec{E}d\vec{l}) + (\vec{E}_{cm}d\vec{l})$ .

Оскільки вектори  $\vec{j}$  та  $d\vec{l}$  збігаються за напрямком, то  $(\vec{j}d\vec{l}) = jdl$ . Величина густини струму  $j = \frac{I}{S}$ . Отже,  $I\rho \frac{dl}{S} = (\vec{E}d\vec{l}) + (\vec{E}_{cm}d\vec{l})$ .

Інтегруючи вздовж довжини ділянки кола 1–2 і враховуючи, що сила струму по всіх перерізах кола однакова, отримуємо:

$$I \int_1^2 \rho \frac{dl}{S} = \int_1^2 (\vec{E}d\vec{l}) + \int_1^2 (\vec{E}_{cm}d\vec{l}).$$

Як було показано вище,

$$\int_1^2 (\vec{E}d\vec{l}) = \varphi_1 - \varphi_2, \quad \int_1^2 (\vec{E}_{cm}d\vec{l}) = \varepsilon_{12},$$

а інтеграл  $\int_1^2 \rho \frac{dl}{S}$  – опір ділянки кола 1–2. Для однорідного провідника  $R = \rho \frac{l_{12}}{S}$ , де  $l_{12}$  – довжина провідника між 1–2. Отже,

$$IR_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}.$$

Поділивши на  $R_{12}$ , отримаємо математичний вираз **закону Ома для неоднорідної ділянки кола**:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}}{R_{12}} = \frac{U_{12}}{R_{12}}. \quad (1.1.30)$$

Силу струму треба розглядати як алгебричну величину. Якщо струм тече по ділянці кола від перерізу 1 до перерізу 2, то  $I > 0$ , якщо струм тече в протилежному напрямку, то  $I < 0$ .

ЕРС  $\varepsilon_{12}$  є теж величиною алгебричною. У випадку, коли ЕРС сприяє руху позитивних носіїв струму у напрямку 1–2, то  $\varepsilon_{12} > 0$ , якщо ЕРС перешкоджає руху позитивних носіїв у цьому напрямку, то  $\varepsilon_{12} < 0$  (рис. 1.1.12).

Якщо електричне коло замкнене, то точки 1 і 2 збігаються, чому  $\varphi_1 = \varphi_2$  і  $R_{12} = R$ , де  $R$  – загальний опір кола.

Тому закон Ома для замкнутого кола має такий вигляд:

$$I = \frac{\varepsilon}{R}, \quad (1.1.31)$$

де  $\varepsilon$  – алгебрична сума всіх електрорушійних сил, які діють у цьому колі.

Нехай замкнене електричне коло складається із джерела струму з ЕРС  $\varepsilon$  і внутрішнім опором  $r$  і зовнішньої частини, яка має опір  $R_{\text{зов.}}$ . Тоді:

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{\text{зов.}} + r}. \quad (1.1.32)$$

Ця формула виражає **закон Ома для повного кола**: сила струму в повному колі рівна електрорушійній силі джерела, що ділиться на суму опорів однорідної і неоднорідної ділянок ланцюгу.

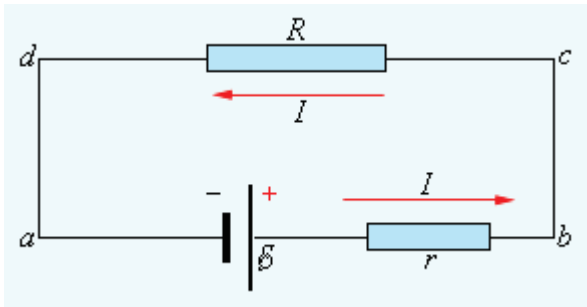


Рис. 1.1.13. Коло постійного струму.

Опір  $r$  неоднорідної ділянки на рис. 1.1.13 можна розглядати як **внутрішній опір джерела струму**. В цьому випадку ділянка  $(ab)$  на рис. 1.1.13 є внутрішньою ділянкою джерела. Якщо точки  $a$  і  $b$  замкнути провідником, опір якого малий в порівнянні з внутрішнім опором джерела ( $R \ll r$ ), тоді в колі потече **струм короткого замикання**:

$$I = \frac{\varepsilon}{r}. \quad (1.1.33)$$

Сила струму короткого замикання – максимальна сила струму, яку можна отримати від даного джерела з електрорушійною силою  $\varepsilon$  і внутрішнім опором  $r$ . У джерел з малим внутрішнім опором струм короткого замикання може бути дуже великий і викликати руйнування електричного кола або джерела. Наприклад, у свинцевих акумуляторів, які використовуються в автомобілях, сила струму короткого замикання може скласти декілька сотень ампер. Особливо небезпечні короткі замикання в освітлювальних мережах, що живляться від підстанцій (тисячі ампер). Щоб уникнути руйнівної дії таких великих струмів, в ланцюг включаються запобіжники або спеціальні автомати захисту мереж.

У ряді випадків для запобігання небезпечним значенням сили струму короткого замикання до джерела послідовно під'єднується деякий зовнішній

опір. Тоді опір  $r$  рівний сумі внутрішнього опору джерела і зовнішнього опору, і при короткому замиканні сила струму не виявиться надмірно великою.

Якщо коло розімкнуте, то  $\varepsilon_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ . Це означає, що ЕРС, прикладена до розімкнутого кола, дорівнює різниці потенціалів на кінцях цього кола.

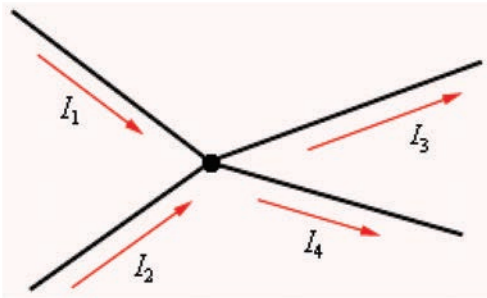


Рис. 1.1.14. Вузол

електричного кола:

$$I_1, I_2 > 0; I_3, I_4 < 0.$$

Для спрощення розрахунків складних електричних кіл, що містять неоднорідні ділянки, використовуються **правила Кірхгофа**, які є узагальненням закону Ома на випадок розгалужених кіл.

У розгалужених колах можна виділити **вузлові точки (вузли)**, в яких сходяться не менше трьох провідників (рис. 1.1.14). Струми, які впадають у вузол, прийнято вважати позитивними; які витікають з вузла –

негативними.

У вузлах кола постійного струму не може відбуватися накопичення зарядів. Звідси випливає **перше правило Кірхгофа**: алгебрична сума сил струмів для кожного вузла в розгалуженому колі рівна нулю:

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = 0. \quad (1.1.34)$$

Перше правило Кірхгофа є наслідком закону збереження електричного заряду.

У розгалуженому колі завжди можна виділити деяку кількість замкнутих шляхів, що складаються з однорідних і неоднорідних ділянок. Такі замкнуті шляхи називаються **контурами**. На різних ділянках виділеного контура можуть протікати різні струми. На рис. 1.1.15 представлений простий приклад розгалуженого кола. Коло містить два вузли  $a$  і  $d$ , в яких сходяться однакові струми; тому тільки один з вузлів є незалежним ( $a$  або  $d$ ).

У колі можна виділити три контури  $abcd$ ,  $adef$  і  $abcdef$ . З них тільки два є незалежними (наприклад,  $abcd$  і  $adef$ ), оскільки третій не містить ніяких нових ділянок.

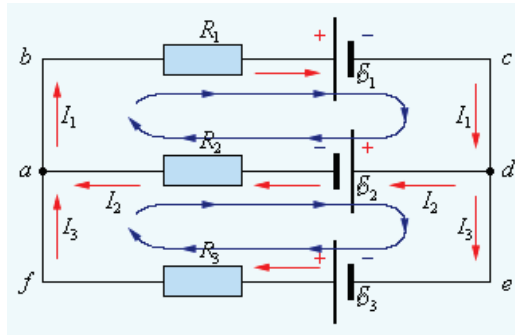


Рис. 1.1.15. Приклад розгалуженого електричного кола. Коло містить один незалежний вузол ( $a$  або  $d$ ) і два незалежні контури (наприклад,  $abcd$  і  $adef$ ).

Друге правило Кірхгофа є наслідком узагальненого закону Ома для неоднорідної ділянки кола.

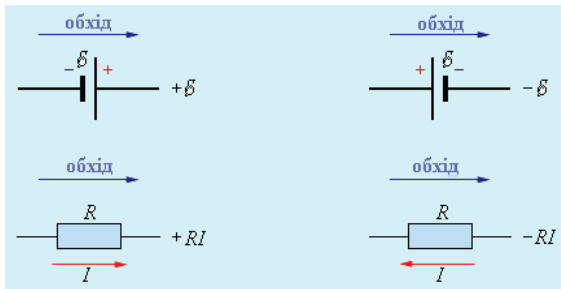


Рис. 1.1.16. «Правила знаків».

Запишемо узагальнений закон Ома для ділянок, з яких складається один з контурів кола, зображеного на рис. 1.1.15, наприклад,  $abcd$ . Для цього на кожній ділянці потрібно задати позитивний напрям струму і позитивний напрям обходу контура.

При записі узагальненого закону Ома для кожної з ділянок необхідно дотримувати певні «правила знаків», які пояснюються на рис. 1.1.16.

Для ділянок контура  $abcd$  узагальнений закон Ома записується у вигляді:

$$\text{Для ділянки } bc: I_1 r_1 = \Delta\varphi_{bc} - \varepsilon_1.$$

$$\text{Для ділянки } da: I_2 r_2 = \Delta\varphi_{da} - \varepsilon_2.$$

Складаючи ліві і праві частини цієї рівності і приймаючи до уваги, що  $\Delta\varphi_{bc} = -\Delta\varphi_{da}$ , отримаємо:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = \Delta\varphi_{bc} + \Delta\varphi_{da} - \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = -\varepsilon_1 - \varepsilon_2.$$

Аналогічно, для контура  $adef$  можна записати:

$$-I_2 R_2 + I_3 R_3 = \varepsilon_2 + \varepsilon_3.$$

**Друге правило Кірхгофа** можна сформулювати так: *алгебраїчна сума добутків опору кожної з ділянок будь-якого замкнутого контура розгалуженого кола постійного струму на силу струму на цій ділянці рівна алгебраїчній сумі ЕРС, що діють уздовж цього контура.*

Перше і друге правила Кірхгофа, які записані для **всіх** незалежних вузлів і контурів розгалуженого ланцюга, дають в сукупності необхідне і достатнє число алгебраїчних рівнянь для розрахунку значень напруги і сил струмів в електричному колі. Для кола, зображеного на рис. 1.1.15, система рівнянь для визначення трьох невідомих струмів  $I_1$ ,  $I_2$  і  $I_3$  має вигляд:

$$I_1 R_1 + I_2 R_2 = -\varepsilon_1 - \varepsilon_2;$$

$$-I_2 R_2 + I_3 R_3 = \varepsilon_2 + \varepsilon_3;$$

$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0.$$

Таким чином, правила Кірхгофа зводять розрахунок розгалуженого електричного кола до розв'язання системи алгебричних лінійних рівнянь. Це розв'язання не викликає принципових утруднень, проте, буває вельми громіздким навіть у разі достатньо простих кіл. Якщо в результаті розв'язку сила струму на якійсь ділянці виявляється негативною, то це означає, що струм на цій ділянці йде в напрямі, протилежному до вибраного позитивного напрямку.

Розглянемо однорідний провідник, до якого прикладена напруга  $U$ . За час  $dt$  через переріз провідника переноситься заряд  $dq = Idt$ . Оскільки струм представляє переміщення заряду  $dq$  під дією електричного поля, то робота струму:

$$dA = dqU = IUdt = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt. \quad (1.1.35)$$

Потужність струму:

$$P = \frac{dA}{dt} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (1.1.36)$$

При протіканні електричного струму по замкнутому колі робота сторонніх сил  $\Delta A_{cm}$  перетвориться в тепло, що виділяється в зовнішньому колі ( $\Delta Q$ ) і усередині джерела ( $\Delta Q_{дж}$ ):

$$\Delta Q + \Delta Q_{дж} = \Delta A_{ст} = \varepsilon I \Delta t.$$

Слід звернути увагу, що в це співвідношення не входить робота електричного поля. При протіканні струму по замкнутому колу електричне поле роботи не здійснює; тому **тепло проводиться одними тільки сторонніми силами**, що діють усередині джерела. Роль електричного поля зводиться до перерозподілу тепла між різними ділянками кола.

Зовнішнім колом може бути не тільки провідник з опором  $R$ , але і який-небудь пристрій, який споживає потужність, наприклад, електродвигун постійного струму. В цьому випадку під  $R$  потрібно розуміти **еквівалентний опір навантаження**. Енергія, що виділяється в зовнішньому колі, може частково або повністю перетворюватися не тільки в тепло, але і в інші види енергії, наприклад, в механічну роботу, що здійснюється електродвигуном. Тому питання про використання енергії джерела струму має велике практичне значення.

Повна потужність джерела, тобто робота, що здійснюється сторонніми силами за одиницю часу, рівна  $P_{дж} = \varepsilon I = \frac{\varepsilon^2}{R + r}$ .

У зовнішньому колі виділяється потужність  $P = RI^2 = \varepsilon I - rI^2 = \frac{\varepsilon^2 R}{(R + r)^2}$ .

Відношення

$$\eta = \frac{P}{P_{дж}} = 1 - \frac{r}{\varepsilon} I = \frac{R}{R + r}. \quad (1.1.37)$$

називається **коефіцієнтом корисної дії джерела**.

На рис. 1.1.17. графічно представлені залежності потужності джерела  $P_{дж}$ , корисної потужності  $P$ , що виділяється в зовнішньому колі, і коефіцієнта корисної дії  $\eta$  від струму в колі  $I$  для джерела з ЕРС, яка дорівнює  $\varepsilon$ , і внутрішнім опором  $r$ .

Струм в колі може змінюватися в межах від  $I = 0$  (при  $R = \infty$ ) до  $I = I_{кз} = \frac{\varepsilon}{r}$  (при  $R = 0$ ).

З наведених графіків видно, що максимальна потужність в зовнішньому ланцюзі  $P_{max}$ , рівна:

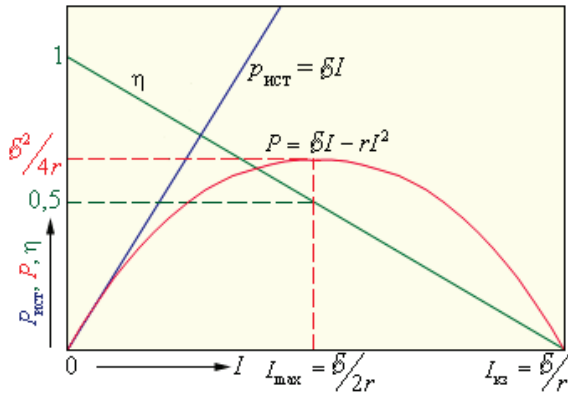


Рис. 1.1.17. Залежність

потужності джерела  $P_{\text{джер}}$ ,  
 потужності в зовнішньому колі  $P$  і  
 ККД джерела  $\eta$  від сили струму.

$$P_{\text{max}} = \frac{e^2}{4r}$$

досягається при  $R = r$ . При цьому струм в колі:

$$I_{\text{max}} = \frac{1}{2} I_{\text{кз}} = \frac{e}{2r},$$

а ККД джерела рівний 50 %. Максимальне значення ККД джерела досягається при  $I \rightarrow 0$ , тобто при  $R \rightarrow \infty$ . У разі короткого замикання корисна потужність  $P = 0$  і вся потужність виділяється усередині джерела, що може привести до його

перегріву і руйнування. ККД джерела при цьому перетворюється в нуль.

Якщо струм проходить по нерухомому металевому провіднику, то вся робота струму йде на його нагрівання і за законом збереження енергії:

$$dQ = dA.$$

Тоді закон **Джоуля-Ленца** в інтегральній формі має вигляд:

$$dQ = IUdt = I^2 R dt = \frac{U^2}{R} dt. \quad (1.1.38)$$

Виділимо в провіднику елементарний циліндричний об'єм  $dV = dSdl$ , опір якого  $R = \rho \frac{dl}{dS}$  а за законом Джоуля-Ленца за час  $dt$  в цьому об'ємі виділиться теплота:

$$dQ = I^2 R dt = (jdS)^2 \rho \frac{dl}{dS} dt = \rho j^2 dV dt. \quad (1.1.39)$$

Кількість теплоти, що виділяється за одиницю часу в одиниці об'єму, називається **густиною теплової потужності струму**:

$$w = \frac{dQ}{dV dt}. \quad (1.1.40)$$

Отже  $w = \rho j^2$ . Оскільки  $j = \sigma E$ , а  $\rho = \frac{1}{\sigma}$ , то:

$$w = jE = \sigma E^2. \quad (1.1.41)$$

**Це закон Джоуля-Ленца в диференціальній формі.**

## Класична теорія електропровідності

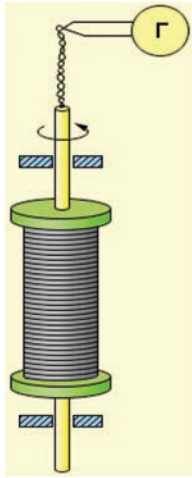


Рис. 1.1.18.

Схема дослідів  
Толмена і Стюарта.

Електричний струм в металах – це впорядкований рух електронів під дією електричного поля. Досліди показують, що при протіканні струму по металевому провіднику перенесення речовини не відбувається, отже, іони металу не беруть участі в перенесенні електричного заряду.

Найбільш переконливий доказ електронної природи струму в металах був отриманий в дослідів з інерцією електронів. Ідея таких дослідів і перші якісні результати (1913 р.) належать російським фізикам Л.І. Мандельштаму і Н.Д. Папалексі. У 1916 році американський фізик Р. Толмен і шотландський фізик Б. Стюарт удосконалили методику цих дослідів і виконали кількісні вимірювання, що неспростовно довели, що струм в металевих провідниках обумовлений рухом електронів.

Схема дослідів Толмена і Стюарта показана на рис. 1.1.18. Котушка з великою кількістю витків тонкого дроту приводилася в швидке обертання навколо своєї осі. Кінці котушки за допомогою гнучких проводів були приєднані до чутливого *балістичного гальванометра* Г. Розкручена котушка різко гальмувалася, і в колі виникав короточасний струм, обумовлений інерцією носіїв заряду. Повний заряд, що протікає по колу, вимірювався за відхиленням стрілки гальванометра.

При гальмуванні котушки, що обертається, на кожен носій заряду  $e$  діє гальмуюча сила  $F = -m \frac{dv}{dt}$ , яка грає роль сторонньої сили, тобто сили неелектричного походження. Стороння сила, віднесена до одиниці заряду, за визначенням є напруженістю  $E_{cm}$  поля сторонніх сил:

$$E_{cm} = -\frac{m}{e} \frac{dv}{dt}.$$

Отже, в колі при гальмуванні котушки виникає електрорушійна сила, рівна  $\varepsilon = E_{cn}l = -\frac{m}{e} \frac{dv}{dt} l$ , де  $l$  – довжина дроту котушки. За час гальмування котушки по колу протече заряд  $q$ , рівний:

$$q = \int I dt = \frac{1}{R} \int \varepsilon dt = \frac{m}{e} \frac{lv_0}{R}, \quad (1.1.42)$$

де  $I$  – миттєве значення сили струму в котушці,  $R$  – повний опір кола,  $v_0$  – початкова лінійна швидкість дроту.

Звідси питомий заряд  $e/m$  вільних носіїв струму в металах рівний:  $\frac{e}{m} = \frac{lv_0}{Rq}$ .

Всі величини, що входять в праву частину цього співвідношення, можна виміряти. На підставі результатів дослідів Толмена і Стюарта було встановлено, що носії вільного заряду в металах мають негативний знак, а відношення заряду носія до його маси близьке до питомого заряду електрона, отриманого з інших дослідів. Так було встановлено, що носіями вільних зарядів в металах є електрони.

За сучасними даними модуль заряду електрона (*елементарний заряд*) рівний  $e = 1,60218 \cdot 10^{-19}$  Кл, а його питомий заряд  $\frac{e}{m} = 1,75882 \cdot 10^{11}$  Кл/кг.

Значна електропровідність металів пояснюється високою концентрацією вільних електронів, рівною кількості атомів в одиниці об'єму.

Припущення про те, що за електричний струм в металах відповідають електрони, виникло значно раніше за дослід Толмена і Стюарта. Ще в 1900 році німецький учений П. Друде на підставі гіпотези про існування вільних електронів в металах створив електронну теорію провідності металів. Ця теорія отримала розвиток в роботах голландського фізика Х. Лоренца носить назву *класичної електронної теорії*. Згідно з цією теорією, електрони в металах поведуться як *електронний газ*, багато в чому схожий на ідеальний газ. Електронний газ заповнює простір між іонами, які утворюють кристалічну решітку металу (рис. 1.1.19).

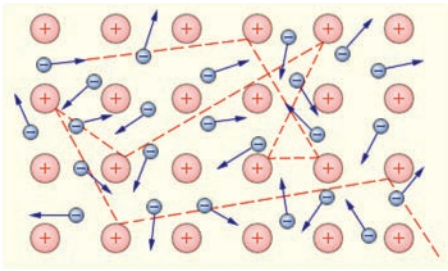


Рис. 1.1.19. Газ вільних електронів в кристалічній решітці металу. Показана траєкторія одного з електронів.

Через взаємодію з іонами електрони можуть покинути метал, лише подолавши так званий *потенціальний бар'єр*. Величина цього бар'єру називається *роботою виходу*. При звичайних (кімнатних) температурах у електронів не вистачає енергії для подолання потенціального бар'єру.

Через взаємодію з кристалічною решіткою потенціальна енергія виходу електрона всередині провідника виявляється меншою, ніж при виході електрона з провідника. Електрони в провіднику знаходяться в своєрідній «потенційній ямі», глибина якої і називається потенційним бар'єром.

Іони, які утворюють ґрати й електрони беруть участь в тепловому русі. Іони здійснюють теплові коливання поблизу положень рівноваги – вузлів кристалічної решітки. Вільні електрони рухаються хаотично і при своєму русі стикаються з іонами ґрат. В результаті таких зіткнень встановлюється термодинамічна рівновага між електронним газом і ґратами. Згідно теорії Друде-Лоренца, електрони мають таку ж середню енергією теплового руху, як і молекули одноатомного ідеального газу. Це дозволяє оцінити середню швидкість  $\vec{v}_t$  теплового руху електронів за формулами МКТ. При кімнатній температурі вона виявляється приблизно рівною  $10^5$  м/с.

При накладанні зовнішнього електричного поля в металевому провіднику окрім теплового руху електронів виникає їх впорядкований рух (дрейф), тобто електричний струм. Середню швидкість дрейфу  $\vec{v}_d$  можна оцінити з наступних міркувань. За інтервал часу  $\Delta t$  через поперечний перетин  $S$  провідника пройдуть всі електрони, що знаходилися в об'ємі  $S\Delta t\vec{v}_d$ .

Число таких електронів рівне  $nS\Delta t\vec{v}_d$  де  $n$  – середня концентрація вільних електронів, приблизно рівна числу атомів в одиниці об'єму металевого

провідника. Через перетин провідника за час  $\Delta t$  пройде заряд  $\Delta q = enS\vec{v}_d\Delta t$ .

Звідси випливає:  $I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = enS\vec{v}_d$ , або  $\vec{v}_d = \frac{I}{enS}$ .

Концентрація  $n$  атомів в металах знаходиться в межах  $10^{28}$ – $10^{29}$  м<sup>-3</sup>.

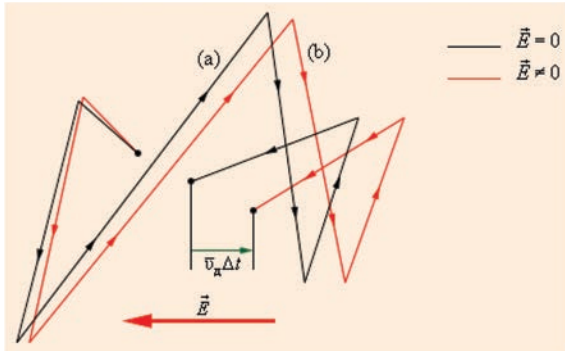


Рис. 1.1.20. Рух вільного електрона в кристалічній решітці: а – хаотичний рух електрона в кристалічній решітці металу; б – хаотичний рух з дрейфом, який зумовлений електричним полем.

Оцінка по цій формулі для металевого провідника перетином 1 мм<sup>2</sup>, по якому тече струм 10 А, дає для середньої швидкості впорядкованого руху електронів значення в межах 0,6–6 мм/с. Таким чином, середня швидкість впорядкованого руху електронів в металевих провідниках на багато порядків менше середньої швидкості їх теплового руху. Рис. 1.1.20 дає уявлення про характер руху вільного електрона в кристалічній решітці.

Мала швидкість дрейфу не суперечить тому факту, що струм у всьому колі постійного струму встановлюється практично миттєво. Замикання кола викликає поширення електричного поля з швидкістю  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с. Через час порядку  $l/c$  ( $l$  – довжина кола) уздовж кола встановлюється стаціонарний розподіл електричного поля і в ній починається впорядкований рух електронів.

У класичній електронній теорії металів передбачається, що рух електронів описується законами механіки Ньютона. У цій теорії нехтують взаємодією електронів між собою, а їх взаємодію з позитивними іонами зводять тільки до зіткнень. Передбачається також, що при кожному зіткненні електрон передає ґратам всю накопичену в електричному полі енергію і тому після зіткнення він починає рух з нульовою дрейфовою швидкістю.

Не дивлячись на те, що всі ці допущення є наближеними, класична електронна теорія якісно пояснює закони електричного струму в металевих провідниках.

**Закон Ома.** У проміжку між зіткненнями на електрон діє сила, рівна за модулем  $eE$ , внаслідок чого він набуває прискорення  $\frac{e}{m}E$ . Тому до кінця вільного пробігу дрейфова швидкість електрона рівна  $u_d = (u_d)_{\max} = \frac{eE}{m}\tau$ , де  $\tau$  – час вільного пробігу, який для спрощення розрахунків передбачається однаковим для всіх електронів. Середнє значення швидкості дрейфу рівне половині максимального значення:  $\bar{u}_d = \frac{1}{2}(u_d)_{\max} = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \tau$ .

Розглянемо провідник довжиною  $l$  і перетином  $S$  з концентрацією електронів  $n$ . Струм в провіднику може бути записаний у вигляді:

$$I = enS\bar{u}_d = \frac{1}{2} \frac{e^2 n S}{m} E = \frac{e^2 n S}{2ml} U, \quad (1.1.43)$$

де  $U = El$  – напруга на кінцях провідника. Отримана формула виражає *закон Ома для металевого провідника*. Електричний опір провідника рівний:

$$R = \frac{2m}{e^2 n \tau} \frac{l}{S},$$

а питомий опір  $\rho$  і питома провідність  $\gamma$  виражаються співвідношеннями:

$$\rho = \frac{2m}{e^2 n \tau}; \quad \gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{e^2 n \tau}{2m}.$$

**Закон Джоуля-Ленца.** До кінця вільного пробігу електрони під дією поля набувають кінетичної енергії  $\frac{1}{2} m (v_d)_{\max}^2 = \frac{1}{2} \frac{e^2 \tau^2}{m} E^2$ .

Припустимо, що вся ця енергія при зіткненнях передається ґратам і переходить в тепло.

За час  $\Delta t$  кожен електрон випробовує  $\Delta t / \tau$  зіткнень. У провіднику перетином  $S$  і довжини  $l$  є  $nSl$  електронів. Звідси витікає, що тепло, яке виділяється в провіднику за час  $\Delta t$  рівне:

$$\Delta Q = \frac{nSl\Delta t}{\tau} \frac{e^2 \tau^2}{2m} E^2 = \frac{ne^2 \tau S}{2m l} U^2 \Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t. \quad (1.1.44)$$

Співвідношення (1.1.44) виражає *закон Джоуля-Ленца*.

Таким чином, класична електронна теорія пояснює існування електричного опору металів, закони Ома і Джоуля-Ленца. Проте у ряді питань класична електронна теорія приводить до висновків, що знаходяться в суперечності з досвідом.

Ця теорія не може, наприклад, пояснити, чому молярна теплоємність металів, також як і молярна теплоємність діелектричних кристалів, рівна  $3R$ , де  $R$  – універсальна газова постійна (закон Дюлонга і Пті). Наявність вільних електронів позначається на величині теплоємності металів.

Класична електронна теорія не може також пояснити температурну залежність питомого опору металів. Теорія дає співвідношення  $\rho \sim T$  тоді як з експерименту виходить залежність  $\rho \sim \sqrt{T}$ . Проте найбільш яскравим прикладом розбіжності теорії і дослідів є *надпровідність*.

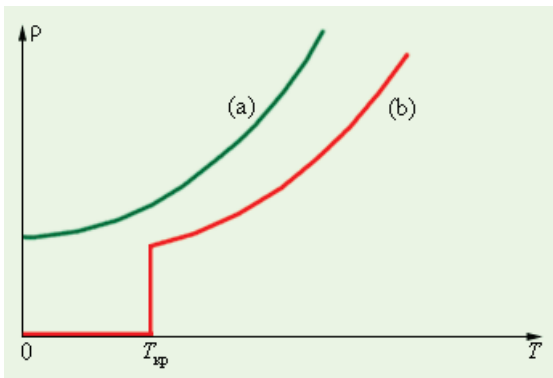


Рис. 1.1.21. Залежність питомого опору  $\rho$  від абсолютної температури  $T$  при низьких температурах:  $a$  – нормальний метал;  $b$  – надпровідник.

Згідно з класичною електронною теорією, питомий опір металів повинен монотонно зменшуватися при охолодженні, залишаючись кінцевим при всіх температурах. Така залежність дійсно спостерігається на досліді при порівняно високих температурах. При нижчих температурах близько декілька кельвінів питомий опір багатьох металів перестає залежати від температури і досягає деякого граничного значення. Проте найбільший інтерес викликає **явище надпровідності**, відкрите

голландським фізиком Хейке Камерлінг-Оннесом у 1911 році. При деякій певній температурі  $T_{кр}$ , різній для різних речовин, питомий опір стрибком зменшується до нуля (рис. 1.1.21). Критична температура у ртуті рівна 4,1 К, у алюмінію 1,2 К, у олова 3,7 К. Надпровідність спостерігається не тільки у елементів, але і у багатьох хімічних сполук і сплавів. Наприклад, з'єднання

ніобію з оловом ( $Ni_3Sn$ ) має критичну температуру 18 К. Деякі речовини, які переходять при низьких температурах в надпровідний стан, не є провідниками при звичайних температурах. В той же час такі «хороші» провідники, як мідь і срібло, не стають надпровідниками.

Речовини в надпровідному стані володіють винятковими властивостями, найважливішою з яких є здатність тривалий час (багато років) підтримувати без загасання електричний струм, збуджений в надпровідному колі.

Класична електронна теорія не здатна пояснити явище надпровідності. Пояснення механізму цього явища було дане тільки через 60 років після його відкриття на основі квантово-механічних уявлень.

Науковий інтерес до надпровідності зростав у міру відкриття нових матеріалів з вищими критичними температурами. Значний крок в цьому напрямі був зроблений в 1986 році, коли було виявлено, що у одного складного керамічного з'єднання  $T_{кр} = 35$  К. Вже в наступному 1987 році фізики зуміли створити нову кераміку з критичною температурою 98 К, що перевищує температуру рідкого азоту (77 К). Явище переходу речовин в надпровідний стан при температурах, що перевищують температуру кипіння рідкого азоту, було названо **високотемпературною надпровідністю**. У 1988 році було створено керамічне з'єднання на основі елементів  $Tl-Ca-Ba-Cu-O$  з критичною температурою 125 К.

В даний час ведуться інтенсивні роботи з пошуку нових речовин з ще вищими значеннями  $T_{кр}$ . Учені сподіваються отримати речовину в надпровідному стані при кімнатній температурі. Якщо це відбудеться, це буде справжньою революцією в науці, техніці і в житті людей, взагалі.

Слід зазначити, що до тепер механізм високотемпературної надпровідності керамічних матеріалів до кінця не з'ясований.

### Термоелектронна емісія

Електрони провідності в металі весь час перебувають в хаотичному тепловому русі. Та обставина, що вільні електрони утримуються всередині

металу, вказує на те, що в поверхневому шарі металу виникає затримуюче електричне поле, яке перешкоджає електронам виходити з металу в навколишній вакуум. Щоб покинути метал, електрон повинен виконати деяку роботу, яка називається **роботою виходу**.

Одна із причин виникнення роботи виходу полягає в наступному. Якщо при тепловому русі електрон вилетить з металу, то він індукує на його поверхні заряд, який називається зарядом дзеркального відображення. Між електронем і цим зарядом виникає сила притягання, що називається силою електричного зображення і яка намагається повернути електрон назад в метал.

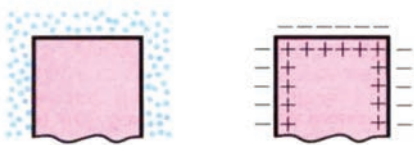


Рис. 1.1.22. «Електронна хмарка» навколо поверхні металу.

Друга причина зумовлена тим, що біля поверхні металу у вакуумі існує «електронна хмаринка», яка заряджена негативно (рис. 1.1.22). Розміри цієї хмарки одного порядку з розмірами атомів ( $10^{-10}$  м). При цьому метал, охоплений негативною електронною

хмаринкою, відносно вакууму заряджений позитивно. Позитивний потенціал внутрішньої частини металу відносно вакууму називається внутрішнім потенціалом  $\Delta\phi$ .

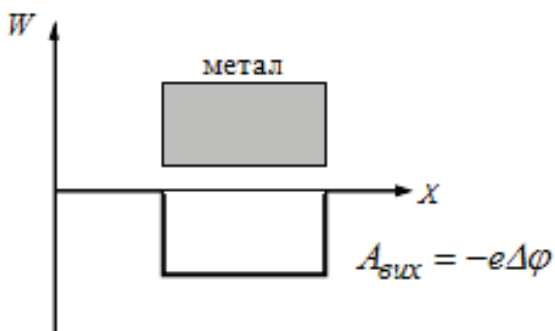


Рис. 1.1.23. «Потенціальна яма» вільних електронів в металах.

Потенціальну енергію  $W$  вільних електронів у вакуумі вважають такою, що дорівнює нулю (бо  $\phi = 0$ ). Тоді всередині металу з позитивним внутрішнім потенціалом  $\Delta\phi$  потенціальна енергія електронів провідності від'ємна:  $W = (-e)\Delta\phi = -e\Delta\phi$ .

Отже, вільні електрони в металах знаходяться в «потенціальній ямі з

плоским дном» (рис. 1.1.23). Дно є «плоским» через те, що поверхневий подвійний шар утворює електричне поле, подібне до поля плоского конденсатора.

Для виходу електрона з металу у вакуум треба подолати потенціальний бар'єр – поле подвійного поверхневого шару. Це потребує додаткової енергії, яка має бути не меншою за глибину потенціальної ями.

**Роботою виходу** називається величина  $A_{\text{вих}}$ , що дорівнює тій найменшій додатковій енергії, яку потрібно передати електрону провідності в металі для його виходу у вакуум.

Отже, чисельно робота виходу дорівнює:  $A_{\text{вих}} = e\Delta\varphi$ .

Якщо електрону в металі надати додаткової енергії, його кінетична енергія зростає. Умову виходу електрона з металу можна записати так:

$$\frac{mv_n^2}{2} \geq e\Delta\varphi, \quad (1.1.45)$$

де  $v_n$  – проекція швидкості електрона на нормаль до поверхні металу.

Додаткову енергію електрони провідності можуть отримати при освітленні металу (зовнішній фотоефект), нагріванні (термоелектронна емісія), під дією сильного електричного поля (автоелектронна емісія), при бомбардуванні поверхні металу потоком електронів у вакуумі (вторинна електронна емісія).

Робота виходу залежить від хімічної природи металу і стану його поверхні. Забруднення, залишки вологи тощо змінюють величину роботи.

Підібравши певним чином покриття поверхні, можна значно зменшити  $A_{\text{вих}}$ . Якщо на поверхню вольфраму  $A_{\text{вих}} = 4,5$  еВ нанести шар оксиду лужноземельного металу ( $\text{Ca}$ ,  $\text{Ba}$ ), то робота виходу зменшується до 2 еВ.

**Емісія** – це вихід електронів з металу під дією зовнішніх факторів.

*Явище термоелектронної емісії* полягає в тому, що нагріті метали випускають електрони.

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

Внаслідок термо-електронної емісії виникає термоелектронний струм.

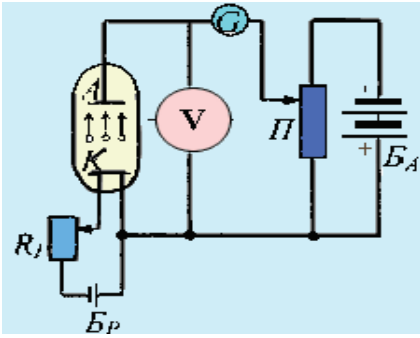


Рис. 1.1.24. Дослід спостереження явища термоелектронної емісії.

Вимірювати вольтметром  $V$ . Термоелектронний струм  $I_a$  вимірюється гальванометром  $G$ .

Сила термо-електронного струму  $I_a$  залежить від напруги  $U_a$ , яка прикладена між катодом та анодом, температури катода і матеріалу, з якого виготовлений катод.

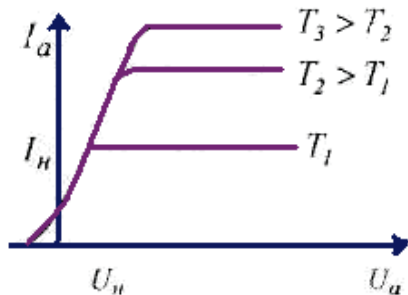


Рис. 1.1.25. Залежність термоелектронного струму  $I_a$  від напруги  $U_a$  при різних температурах катода.

Явище термо-електронної емісії на практиці можна спостерігати за допомогою вакуумної лампи – діода, в яку впаяно два електроди – катод  $K$  і анод  $A$  (рис. 1.1.24). Катод нагрівається електричним струмом від батареї розжарювання  $B_p$ . Регулюючи за допомогою реостата  $R_p$  силу струму розжарювання, можна змінювати температуру катода. Від батареї на електроди подається напруга  $U_a$ , величину якої можна змінювати за допомогою потенціометра  $\Pi$  і

На рис. 1.1.25 подано залежність термо-електронного струму  $I_a$  від напруги  $U_a$  при різних температурах катода. Ця крива називається *вольт-амперною характеристикою діода*. При малих значеннях  $U_a$  криві при різних температурах збігаються.

При невеликих анодних напругах сила струму спочатку повільно зростає з підвищенням напруги. Це пояснюється тим, що при невеликих значеннях  $U_a$  не всі електрони, які вийшли з катода, досягають анода. Частина електронів між катодом і анодом утворює електронну хмаринку (просторовий заряд), яка перешкоджає руху до анода електронів, які знову вилетіли з катода. Із збільшенням напруги  $U_a$  електронна хмаринка поступово розсіюється і струм  $I_a$  зростає. При  $U_a = U_n$  зростання струму

припиняється. Це пов'язано з тим, що кількість електронів, які долітають до анода за одиницю часу, дорівнює кількості електронів, що вилітають за той самий час з катода.

Максимальний термоелектронний струм, можливий при даній температурі катода, називають *струмом насичення*  $I_n$ .

При малих значеннях  $U_a \ll U_n$  залежність термоелектронного струму від анодної напруги описується **законом Богуславського-Ленгмюра**:

$$I_a = BU_a^{3/2}, \quad (1.1.46)$$

де  $B$  – коефіцієнт, який залежить від форми електродів та їх взаємного розміщення.

Якщо позначити через  $N$  загальну кількість електронів, що вилітають з катода при даній температурі за одиницю часу, то силу струму насичення  $I_n$  можна визначити за формулою:

$$I_n = Ne.$$

Математично залежність густини струму насичення описується за класичною електронною теорією **формулою Річардсона**:

$$j_n = A\sqrt{T}e^{-\frac{e\Delta\phi}{kT}}, \quad (1.1.47)$$

де  $A = ne\sqrt{\frac{k}{2\pi m}}$ , тут  $e$ ,  $m$ ,  $n$  – відповідно заряд, маса та концентрація електронів в металі,  $k$  – стала Больцмана.

Отже, за класичною електронною теорією коефіцієнт  $A$  залежить від концентрації електронів  $n$  і для різних металів є неоднаковим.

За квантовою теорією густина струму насичення визначається **формулою Річардсона-Дешмена**:

$$j_n = BT^2e^{-\frac{e\Delta\phi}{kT}}, \quad (1.1.48)$$

$$\text{де } B = \frac{4\pi emk^2}{\hbar^3} \approx 120 \frac{\text{А}}{\text{см}^2\text{К}}.$$

Отже, стала  $B$  є однаковою для всіх металів. Проте таке  $B$  не виявлене у жодного з металів. Розбіжності пояснюються тим, що в теоретичних розрахунках використовується модель ідеального електронного газу.

Обидві теорії правильно передають експоненціальну залежність густини струму  $j_n$  від температури. Множники  $T^{1/2}$  відіграють другорядну роль, оскільки показникова функція змінюється значно сильніше за степеневу.

## 1.2. Магнітне поле. Магнітні властивості речовини

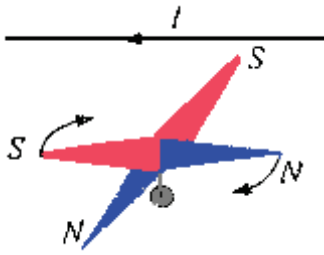


Рис. 1.2.1.

*Взаємодія магнітної стрілки і провідника зі струмом.*

Першими експериментами (в 1820 р.), які показали, що між електричними і магнітними явищами є глибокий зв'язок, були досліди датського фізика Х. Ерстеда. Було виявлено, що на магнітну стрілку, розташовану поблизу провідника із струмом, діють сили, які прагнуть її повернути (рис. 1.2.1). У тому ж році французький фізик А. Ампер спостерігав силову взаємодію двох провідників зі струмами і встановив закон взаємодії струмів.

За сучасними уявленнями, провідники зі струмом діють один на одного не безпосередньо, а через магнітні поля, що їх оточують. Джерелами магнітного поля є **рухомі** електричні заряди. Магнітне поле виникає в просторі, що оточує провідники зі струмом, подібно до того, як в просторі, що оточує нерухомі електричні заряди, виникає електричне поле. Магнітне поле постійних магнітів також створюється електричними мікрострумами, циркулюючими усередині молекул речовини (*гіпотеза Ампера*).

Учені XIX століття намагалися створити теорію магнітного поля по аналогії з електростатикою, вводячи в розгляд так звані **магнітні заряди** двох знаків (наприклад, північний *N* і південний *S* полюси магнітної стрілки). Проте, дослід показує, що ізольованих магнітних зарядів не існує. Магнітне поле струмів принципово відрізняється від електричного поля. Магнітне поле, на відміну від електричного, діє **тільки** на рухомі заряди (струми).

Досліди показали, що навколо провідників зі струмом і постійних магнітів існує магнітне поле, яке можна виявити за його силовою дією, на інші провідники зі струмом або постійні магніти.

Отже, навколо будь-якого рухомого заряду, чи то буде електрон, іон або заряджене тіло, 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.

Розглянемо замкнений плоский контур зі струмом розміри якого малі



порівняно з відстанню до струмів, що утворюють поле. За позитивний напрямок нормалі приймається напрямок поступального руху свердлика, головка якого обертається в напрямку струму, що тече в контурі (рис. 1.2.2).

Рис. 1.2.2. Дія магнітного поля на провідник зі струмом.

Контур (рамка) зі струмом характеризується **магнітним моментом**  $\vec{p}_m$ , який дорівнює добутку сили струму  $I$ , що протікає у контурі, на площу поверхні контуру  $S$ :

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}, \quad (1.2.1)$$

де  $\vec{n}$  – одиничний вектор нормалі до поверхні рамки. Напрямок вектора  $\vec{p}_m$  збігається з напрямком позитивної нормалі рамки.

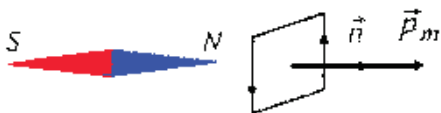


Рис. 1.2.3. Контур зі струмом у магнітному полі.

Контур зі струмом в магнітному полі повертається, набуваючи рівноважного положення і його позитивна нормаль розміщується вздовж осі стрілки в напрямку від її магнітного полюса (рис. 1.2.3).

Контуром зі струмом можна скористатись і для кількісного опису магнітного поля. На контур в магнітному полі діє пара сил. Обертальний момент сил  $M$  залежить від властивостей контура:  $M \sim p_m$ .

Якщо контур зі струмом повернути на  $90^\circ$  від рівноважного положення, то на нього буде діяти максимальний обертальний момент  $M_{max}$ .

Якщо в дане місце магнітного поля поміщати контури з різними магнітними моментами, то на них діятимуть різні обертальні моменти, але

відношення  $M_{max} / p_m$  для всіх контурів однакове і служить кількісною характеристикою магнітного поля:

$$B = \frac{M_{max}}{p_m}. \quad (1.2.2)$$

**Магнітна індукція  $\vec{B}$**  в даному місці магнітного поля визначається максимальним обертальним моментом, що діє на контур з одиничним магнітним моментом.

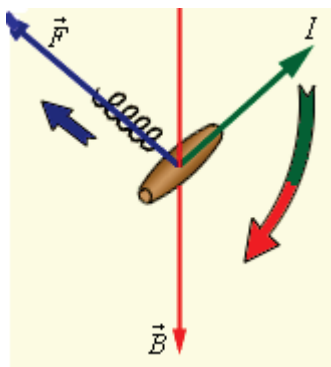
Одиниця магнітної індукції – **тесла**: 1 Тл – магнітна індукція такого магнітного поля, в якому на рамку з магнітним моментом  $1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$  діє максимальний момент сили  $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

За напрямок магнітної індукції  $\vec{B}$  приймається напрямок магнітного моменту контура  $\vec{p}_m$ , який знаходиться в рівноважному положенні у цьому полі.

Для графічного зображення магнітних полів зручно користуватись лініями магнітної індукції.

**Лініями магнітної індукції** називають такі лінії, дотичні до яких в кожній точці збігаються з напрямком вектора  $\vec{B}$  в цих точках поля.

**Напрямок ліній індукції** магнітного поля струму визначається за



правилом свердлика (рис. 1.2.4): якщо вкручувати свердлик за напрямком руху струму в провіднику, то напрямок руху його рукоятки покаже напрям ліній магнітної індукції.

Лінії магнітної індукції можна спостерігати за допомогою дрібних металевих ошурків, які в магнітному полі поводять себе, як маленькі магнітні стрілки.

Рис. 1.2.4.

*Правило свердлика.*

Вигляд лінії магнітної індукції простих магнітних полів показаний на рис. 1.2.5.

Лінії магнітної індукції охоплюють провідник зі струмом, який створює поле. Поблизу провідника лінії лежать в площині, що перпендикулярна до провідника.

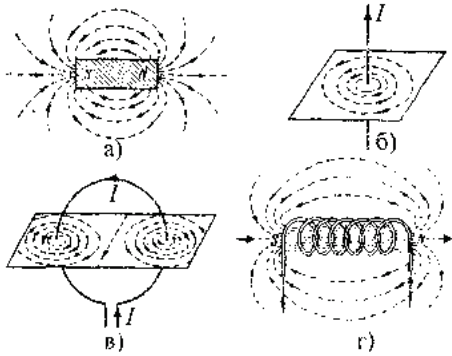


Рис. 1.2.5. Лінії магнітної індукції простих магнітних полів.

Лінії індукції магнітного поля ні в яких точках не можуть обриватися, вони завжди замкнені. Лінії індукцій постійного магніту (рис. 1.2.5.а) виходять із його північного полюса і входять у південний.

Магнітне поле соленоїда, тобто довгої котушки зі струмом (рис. 1.2.5.г), подібне до магнітного поля штабового магніту. Північний полюс магніту збігається з тим кінцем соленоїда, з якого струм у витках тече проти годинникової стрілки. Магнітне поле колового струму (рис. 1.2.5.в), 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.

У випадку однорідного ізотропного середовища вектор магнітної індукції пов'язаний з вектором напруженості магнітного поля:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (1.2.3)$$

де  $\mu_0$  – стала величина, яку називають **магнітною сталою**. Введення магнітної сталої в СІ спрощує запис ряду формул. Її чисельне значення рівне:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2 \approx 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ Н/А}^2,$$

$\mu$  – безрозмірна величина – магнітна проникність середовища, яка показує в скільки раз магнітне поле струму  $\vec{H}$  підсилюється за рахунок поля струму середовища.

### Закон Біо-Савара-Лапласа

У 1820 р. французькі вчені Ж. Біо і Ф. Саварр дослідили магнітні поля, створені в повітрі прямолінійним струмом, коловим струмом, котушкою зі струмом тощо. На основі численних дослідів вони дійшли таких висновків:

а) у всіх випадках індукція  $|\vec{B}|$  магнітного поля електричного струму пропорційна до сили струму  $I$ ;

б) магнітна індукція залежить від форми і розмірів провідника зі струмом;

в) магнітна індукція  $\vec{B}$  у будь-якій точці поля залежить від розташування цієї точки відносно провідника зі струмом.

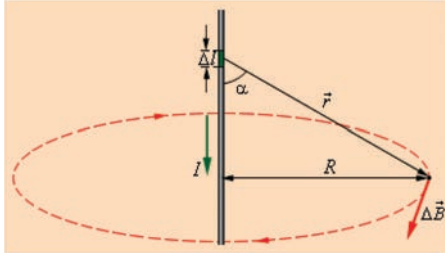


Рис. 1.2.6. Демонстрація закону Біо-Савара.

Біо і Саварр намагалися знайти загальний закон, який дав би змогу обчислити магнітну індукцію в кожній точці поля, створеного електричним струмом, що протікає по провіднику будь-якої форми. Однак зробити це їм не вдалося. Розв'язав це завдання П. Лаплас.

Лаплас узагальнив результати експериментів Біо і Саварра у вигляді диференціального закону, який називається **законом Біо-Саварра-Лапласа**:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}, \quad (1.2.4)$$

де  $d\vec{l}$  – вектор, що чисельно дорівнює довжині  $dl$  елемента провідника і збігається з напрямком електричного струму,  $\vec{r}$  – радіус-вектор, проведений від елемента провідника  $dl$  до точки поля  $A$ , що розглядається (рис. 1.2.6),  $\mu_0$  – магнітна стала.

Отже, модуль індукції  $d\vec{B}$  магнітного поля малого елемента  $dl$  провідника зі струмом прямо пропорційний до сили струму  $I$ , довжини елемента  $dl$  провідника, обернено пропорційний до квадрата відстані  $r$  від елемента провідника до розглядуваної точки поля, а також залежить від кута  $\alpha$  між напрямками струму і радіус-вектора  $\vec{r}$  (рис. 1.2.6):

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}. \quad (1.2.5)$$

Напрямок вектора  $d\vec{B}$  перпендикулярний до  $d\vec{l}$  і  $\vec{r}$ , тобто перпендикулярний до площини, в якій вони лежать, і збігається з дотичною до

лінії магнітної індукції. Напрямок  $d\vec{B}$  визначається з векторного добутку  $[d\vec{l}, \vec{r}]$  і може бути знайдений за правилом свердлика.

Закон Біо-Саварра-Лапласа дає змогу розрахувати індукцію магнітного поля електричного струму, що проходить по провіднику скінченних розмірів і будь-якої форми.

Дослід показує, що для магнітного поля справедливим є **принцип суперпозиції**: магнітна індукція поля, яке створене декількома струмами або рухомими зарядами, дорівнює векторній сумі індукцій магнітних полів, що створені кожним струмом або рухомих зарядом окремо.

Відповідно до принципу суперпозиції магнітна індукція  $\vec{B}$  у будь-якій точці магнітного поля провідника зі струмом  $I$  дорівнює векторній сумі індукцій  $\Delta\vec{B}_i$ , елементарних магнітних полів, створених окремими ділянками  $\Delta l_i$ , цього провідника:

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \Delta\vec{B}_i. \quad (1.2.6)$$

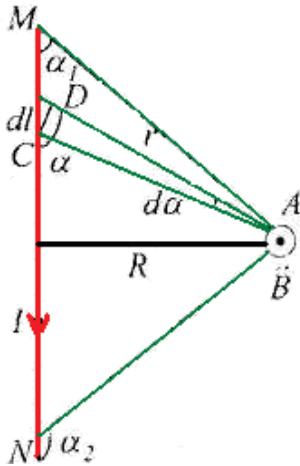
Необмежено збільшуючи кількість ділянок  $n$  і переходячи до границі при  $n \rightarrow \infty$ , можна замінити суму інтегралом:  $\vec{B} = \int_l d\vec{B}$ .

Отже, магнітна індукція поля, яке створене у вакуумі струмом  $I$ , що тече по провіднику скінченної довжини і довільної форми, дорівнює

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_l \frac{[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}. \quad (1.2.7)$$

Розрахунок характеристик магнітного поля за наведеними формулами в загальному випадку досить складний. Однак, якщо розподіл струму має певну симетрію, то застосування закону Біо-Савара-Лапласа разом з принципом суперпозиції дає змогу досить просто розрахувати магнітну індукцію конкретних полів.

## Магнітне поле прямолінійного провідника зі струмом



Розглянемо прямий провідник довільної довжини, по якому проходить струм силою  $I$ , наприклад, згори вниз (рис. 1.2.7). Відповідно до закону Біо-Савара-Лапласа вектор магнітної індукції  $d\vec{B}$  поля у вакуумі, створеного в точці  $A$  елементом  $dl$  провідника зі струмом  $I$ , числово дорівнює

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2},$$

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

У точці  $A$ , яка знаходиться на відстані  $R$  від осі провідника, всі вектори  $d\vec{B}$ , які характеризують магнітні поля, створені окремими ділянками цього провідника, напрямлені перпендикулярно до площини рисунка. Вектор  $\vec{B}$  чисельно дорівнює алгебраїчній сумі модулів векторів  $d\vec{B}$ :

$$B = \int_l dB = \int_l \frac{\mu_0 Idl \sin \alpha}{4\pi r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_l \frac{dl \sin \alpha}{r^2}.$$

Замінімо  $dl$  і  $r$  через одну незалежну змінну  $\alpha$ :

$$r = \frac{R}{\sin \alpha}, dl = \frac{CD}{\sin \alpha}, CD = r d\alpha.$$

$$\text{Тоді: } dl = \frac{r d\alpha}{\sin \alpha} = \frac{R d\alpha}{\sin^2 \alpha}.$$

У результаті індукція магнітного поля прямолінійного провідника  $MN$  у точці  $A$  дорівнює:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{R d\alpha \sin \alpha}{\sin^2 \alpha \frac{R^2}{\sin^2 \alpha}} = \frac{\mu_0}{4\pi} I \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\sin \alpha d\alpha}{R} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2).$$

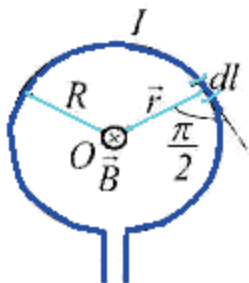
Якщо провідник  $MN$  нескінченно довгий, то  $\alpha_1 = 0$ , а  $\alpha_2 = \pi$ .

Отже, магнітна індукція нескінченно довгого провідника зі струмом дорівнює ( $\cos 0 = 1$ ,  $\cos \pi = -1$ ):

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{R}. \quad (1.2.8)$$

## Магнітне поле колового струму

Знайдемо індукцію магнітного поля в центрі  $O$  колового струму радіусом  $R$ , по якому протікає струм  $I$  (рис. 1.2.8):



$$dB = \frac{\mu_0 I dl \sin(\hat{dl}\hat{r})}{4\pi r^2};$$

$$\sin(\hat{dl}\hat{r}) = 1, r = R.$$

Тоді

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

*Рис. 1.2.8.* Усі вектори  $d\vec{B}$  магнітних полів, які створені в точці  $O$  різними ділянками  $d\vec{l}$  колового струму, напрямлені перпендикулярно до площини рисунка «від нас». Тоді:

$$B = \int_0^l dB = \int_0^{2\pi R} \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} dl = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} 2\pi R.$$

Отже, магнітна індукція поля колового струму дорівнює:

$$B = \mu_0 \frac{I}{2R}. \quad (1.2.9)$$

## Закон Ампера

На провідники зі струмом, що знаходяться в магнітному полі, діють сили Ампера.

Узагальнюючи результати дослідження дії магнітного поля на різні провідники зі струмом, 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  $\vec{B}$ :

$$d\vec{F} = I[d\vec{l} \times \vec{B}] \quad (1.2.10)$$

Це співвідношення називається **законом Ампера**.

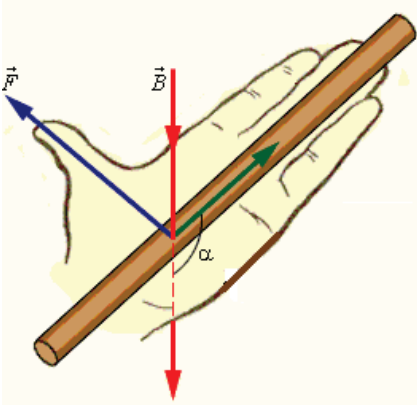


Рис. 1.2.9. Правило лівої руки.

Напрямок сили  $d\vec{F}$  можна знайти 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 (рис. 1.2.9). 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, утвореної 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.

Модуль сили Ампера розраховується за формулою:

$$dF = IBdl\sin\alpha, \quad (1.2.11)$$

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

Одним з важливих прикладів магнітної взаємодії є взаємодія паралельних струмів. Закономірності цього явища були експериментально встановлені Ампером: *якщо по двох паралельних провідниках електричні струми течуть в один і той же бік, то спостерігається взаємне притягування провідників. І навпаки.*

Взаємодія струмів спричиняється їх магнітними полями: магнітне поле одного струму діє силою Ампера на інший струм і навпаки.

Досліди показали, що модуль сили, що діє на відрізок завдовжки  $\Delta l$  кожного з провідників, прямо пропорційний до сил струму  $I_1$  і  $I_2$  в провідниках, довжині відрізка  $\Delta l$  і обернено пропорційна відстані  $R$  між ними:

$$F = k \frac{I_1 I_2 \Delta l}{R}. \quad (1.2.12)$$

У Міжнародній системі одиниць СІ коефіцієнт пропорційності  $k$  прийнято записувати у вигляді:  $k = \mu_0 / 2\pi$ .

Формула, що виражає закон магнітної взаємодії струмів, які протікають в одному напрямі, має вигляд:

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2 \Delta l}{R}. \quad (1.2.13)$$

Рис. 1.2.10 пояснює закон взаємодії струмів.

Магнітна взаємодія паралельних провідників зі струмом використовується в Міжнародній системі одиниць (СІ) для визначення одиниці сили струму – ампера:

**Один ампер (1 А)** – така сила незмінного струму, яка при проходженні по двох паралельних провідниках нескінченної довжини і дуже малого поперечного перерізу, що розташовані на відстані 1 м один від одного у вакуумі, викликає між цими провідниками силу магнітної взаємодії, рівну  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на кожен метр довжини.

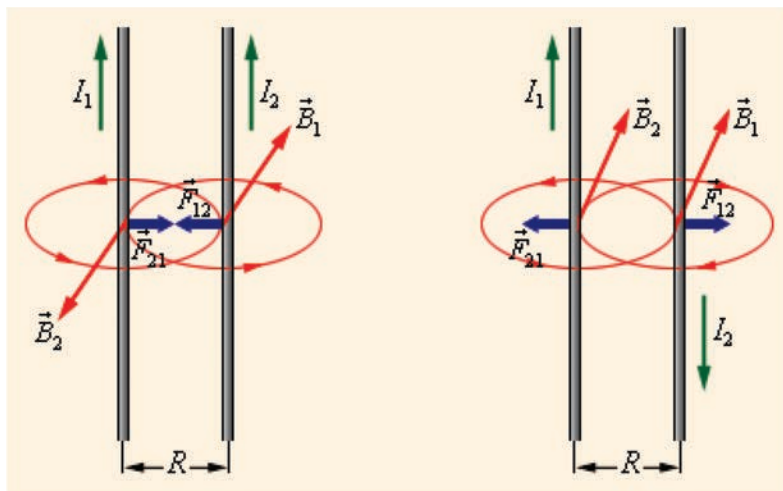


Рис. 1.2.10. Магнітна взаємодія струмів, які протікають в одному напрямі, і струмів, які протікають в різних напрямках.

Нехай концентрація вільних носіїв заряду в провіднику  $n$ , а  $q$  – заряд носія. Тоді добуток  $nqvS$ , де  $v$  – модуль швидкості впорядкованого руху носіїв по

провіднику, а  $S$  – площа поперечного перетину провідника, дорівнює струму, який проходить по провіднику:  $I = qnvS$ .

Вираз для сили Ампера можна записати у вигляді:  $F = qnS\Delta l v B \sin \alpha$ .

Оскільки повне число  $N$  носіїв вільного заряду в провіднику завдовжки  $\Delta l$  і перетином  $S$  рівне  $nS\Delta l$ , то сила, що діє на одну заряджену частинку, рівна:

$$F_L = qvB \sin \alpha. \quad (1.2.14)$$

Цю силу називають **силою Лоренца**. Кут  $\alpha$  в цьому виразі рівний куту між швидкістю і вектором магнітної індукції. Напрямок сили Лоренца, що діє на позитивно заряджену частинку, такий самий, як і напрям сили Ампера, може бути знайдений за правилом лівої руки або за правилом сверлика. Взаємне розташування векторів для позитивно зарядженої частинки показано на рис. 1.2.11.

Сила Лоренца направлена перпендикулярно до векторів  $\vec{v}$  і  $\vec{B}$ .

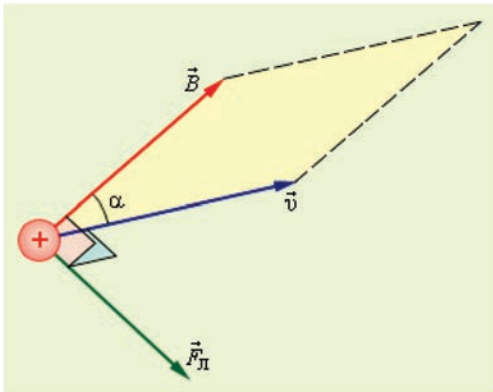


Рис. 1.2.11. Взаємне розташування векторів  $\vec{v}$ ,  $\vec{B}$  і  $\vec{F}$ .

При русі зарядженої частинки в магнітному полі сила Лоренца роботи не здійснює. Тому модуль вектора швидкості при русі частинки не змінюється.

Отже, магнітне поле не діє на електричні заряди, що не рухаються.

Сила Лоренца завжди перпендикулярна до швидкості руху зарядженої частинки, тому вона змінює лише напрямок цієї швидкості, не змінюючи її модуля. Отже, сила Лоренца роботи не виконує і кінетична енергія частинки при русі в магнітному полі не змінюється.

Якщо на рухомий електричний заряд, крім магнітного поля з індукцією  $\vec{B}$ , діє і електричне поле з напруженістю  $\vec{E}$ , то результуюча сила  $\vec{F}$ , яка прикладена до заряду:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}\vec{B}]. \quad (1.2.15)$$

Цей вираз називається **формулою Лоренца**.

Якщо заряджена частинка рухається в магнітному полі зі швидкістю  $\vec{v}$  вздовж ліній магнітної індукції, то  $\alpha = 0$ , або  $\alpha = \pi$ . У такому разі  $F_L = 0$ , магнітне поле на частинку не діє і вона рухається рівномірно і прямолінійно.

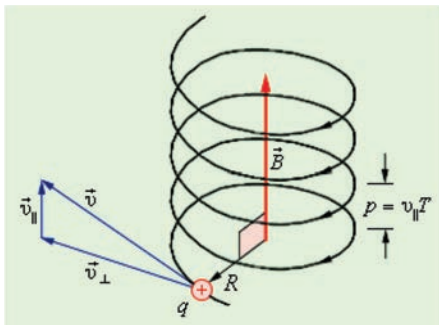
Якщо заряджена частинка рухається в магнітному полі з швидкістю  $\vec{v}$  перпендикулярно до вектора  $\vec{B}$ , то сила Лоренца стала за модулем і нормальна до траєкторії частинки. Частинка рухатиметься по колу, бо сила Лоренца за другим законом Ньютона буде створювати доцентрове прискорення. Отже,  $qvB = \frac{mv^2}{r}$ . Звідси  $r = \frac{mv}{qB}$ , де  $r$  – радіус кола.

Використавши зв'язок  $v = \omega r$ , знайдемо циклічну частоту  $\omega$  та період  $T$  обертання частинки навколо ліній індукції в магнітному полі:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{q}{m}, \quad T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}. \quad (1.2.16)$$

Період обертання частинки в однорідному магнітному полі не залежить від її швидкості (при  $v \ll c$ ). На цьому ґрунтується дія циклічних прискорювачів заряджених частинок (синхрофазотронів тощо).

Якщо швидкість  $\vec{v}$  зарядженої частинки напрямлена під кутом  $\alpha$  до вектора  $\vec{B}$  (рис.1.2.12), то її рух можна подати у вигляді суперпозиції:



1) рівномірного прямо-лінійного руху вздовж поля з швидкістю  $v_{\parallel} = v \cos \alpha$ ;

2) рівномірного руху з швидкістю  $v_{\perp} = v \sin \alpha$  вздовж кола, яке перпендикулярне до поля.

Радіус кола  $r = \frac{mv \sin \alpha}{qB}$ .

В результаті складання обох рухів виникає рух вздовж спіралі, вісь якої паралельна до магнітного поля. Крок гвинтової лінії

$$h = v_{\parallel} T = v T \cos \alpha = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{qB}.$$

Напрямок, в якому закручується спіраль, залежить від знака заряду частинки.

Рис. 1.2.12. Рух зарядженої частинки по спіралі в однорідному магнітному полі.

## Ефект Холла

В 1879 р. Е. Холл здійснив експеримент, в якому він пропускав електричний струм  $I$  через золоту пластинку у вигляді паралелепіпеда і вимірював різницю потенціалів  $\Delta\varphi$  між точками  $C$  і  $D$  на верхній і нижній гранях (рис. 1.2.13).

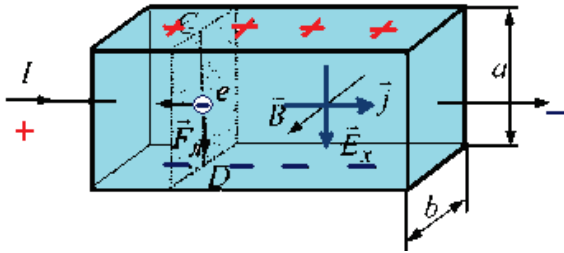


Рис. 1.2.13. До пояснення ефекту Холла.

Ці точки лежать у одному і тому ж поперечному перерізі пластинки. Тому виявилось, що  $\Delta\varphi = 0$ . Коли пластинку зі струмом Холл помістив в однорідне магнітне поле, лінії магнітної індукції якого перпендикулярні до бічних граней пластинки, то було встановлено, що різниця потенціалів  $\Delta\varphi = \varphi_C - \varphi_D \neq 0$

прямопропорційна до сили струму  $I$ , магнітної індукції поля  $B$  і обернено пропорційна до ширини  $b$  пластинки, тобто:

$$\Delta\varphi = \varphi_C - \varphi_D = R_x \frac{IB}{b},$$

де  $R_x$  – коефіцієнт пропорційності названий *сталю Холла*, а явище, яке експериментально виявив Холл, дістало назву *ефекту Холла*.

Подалші дослідження показали, що ефект Холла спостерігається у всіх провідниках і напівпровідниках. Зміна напрямку струму або напрямку магнітного поля на протилежний викликає зміну різниці потенціалів  $\Delta\varphi$ .

Стала Холла обернено пропорційна до добутку елементарною заряду електрона  $e$  на їх концентрацію  $n$  електронів:

$$R_x = \frac{1}{ne}. \quad (1.2.17)$$

За вимірними значеннями сталої Холла можна:

1) визначити концентрацію носіїв струму, якщо характер провідності і заряд носіїв струму відомі, а саме:

$$n = \frac{1}{qR_x}.$$

Так, для одновалентних металів виявилось, що концентрація електронів провідності збігається з концентрацією атомів.

Оскільки за електронною теорією питому електропровідність речовини обчислюють за формулою  $\sigma = nev_q$ , де  $v_q$  – рухливість носіїв заряду, то  $\sigma = \frac{1}{R_x} v_q$ ,  $v_q = R_x \sigma$ , тобто добуток  $R_x \sigma$  визначає рухливість носіїв заряду.

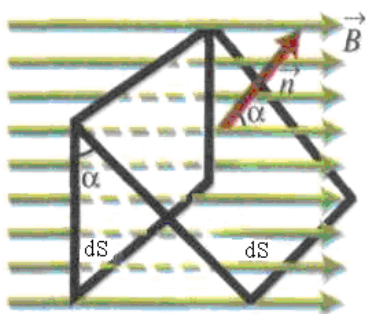
2) зробити висновок про природу провідності напівпровідників, оскільки знак сталої Холла збігається із знаком заряду  $q$  носіїв струму. При електронній провідності  $R_x < 0$ , а при дірковій  $R_x > 0$ . Якщо в напівпровіднику водночас існують обидва типи провідності, то за знаком  $R_x$  можна судити про те, який з них переважає.

3) оцінити величину  $\langle \lambda \rangle$  середньої довжини вільного пробігу електронів:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\sigma 2m \langle v \rangle}{ne^2} = \frac{2m \langle v \rangle \sigma R_x}{e},$$

де  $\sigma$  – питома електропровідність провідника,  $\langle v \rangle$  – середня швидкість теплового руху електронів у провіднику. Виявилось, що середня довжина вільного пробігу електронів  $\langle \lambda \rangle \sim 10^8$  м, що на два порядки перевищує міжвузлові відстані в металі.

## Магнітний потік



Потоком вектора магнітної індукції (магнітним потоком) через площадку  $dS$  називається скалярна фізична величина, яка дорівнює добутку проекції  $B_n$  вектора  $\vec{B}$  на напрямок нормалі  $\vec{n}$  до площадки  $dS$  і величини цієї площадки:

Рис. 1.2.14.

До

$$d\Phi_B = B_n dS = (\vec{B} d\vec{S}), \quad (1.2.18)$$

визначення магнітного потоку.

де  $B_n = B \cos \alpha$ , де  $\alpha$  – кут між векторами  $\vec{n}$  і  $\vec{B}$

(рис. 1.2.14),  $d\vec{S} = dS \vec{n}$  – вектор, модуль якого

дорівнює  $dS$ , а напрямок збігається з нормаллю  $\vec{n}$  до площадки  $dS$ .

Потік вектора  $\vec{B}$  може бути як позитивним, так і негативним залежно від знаку  $\cos\alpha$  (визначається вибором позитивного напрямку нормалі  $\vec{n}$ ).

Потік вектора магнітної індукції  $\vec{\Phi}_B$  через довільну поверхню  $S$  дорівнює:

$$\Phi_B = \int_S B_n dS = \int (\vec{B} d\vec{S}).$$

Для однорідного поля і плоскої поверхні, розміщеної перпендикулярно до вектора  $\vec{B}$ ,  $B_n = B = \text{const}$  і  $\Phi_B = BS$ .

### Робота при переміщенні провідника і контура зі струмом у магнітному полі

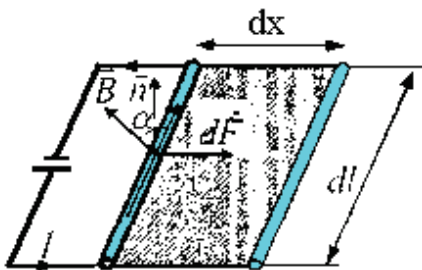


Рис. 1.2.15. Провідник зі струмом у магнітному полі.

На провідник зі струмом у магнітному полі діє сила Ампера. Якщо провідник не закріплено, то під впливом сили Ампера він переміщуватиметься у магнітному полі.

Обчислимо роботу  $dA$ , виконану силою Ампера при переміщенні елемента  $dl$  провідника зі струмом  $I$  у магнітному полі (рис. 1.2.15).

Елемент провідника переміщується в напрямку дії сили  $d\vec{F}$ , яка діє на нього на відстані  $dx$ . Робота  $dA$  дорівнює  $dA = dFdx$ .

За законом Ампера:  $dF = IBdl\sin\alpha$ . Тоді  $dA = IB\sin\alpha dldx$ .

Сила  $d\vec{F}$  і переміщення  $d\vec{x}$  напрямлені перпендикулярно до елемента провідника  $d\vec{l}$ . Добуток  $dldx = dS$  – площа поверхні, яка описана елементом провідника  $dl$  при його переміщенні на  $dx$ .

З рис. 1.2.15 видно, що  $B\sin\alpha = B_n$  – проекція вектора  $\vec{B}$  на напрямок нормалі  $n$  до площини  $dS$ .

Добуток  $B_n dS = d\Phi_B$  є магнітним потіком крізь поверхню  $dS$ . Тоді:

$$dA = IB_n dS = Id\Phi_B. \quad (1.2.18)$$

Вважаючи силу струму сталою і інтегруючи цей вираз, отримаємо:

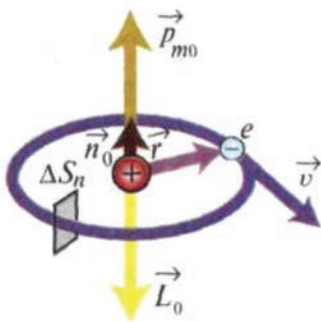
$$A = I\Phi_B. \quad (1.2.19)$$

Робота, яку виконує сила Ампера при переміщенні в магнітному полі провідника, струм в якому постійний, дорівнює добутку сили струму на величину магнітного потоку крізь поверхню, яку описує провідник під час свого руху.

### Магнітні властивості речовини

Розглянемо процеси, що відбуваються в речовині під впливом зовнішнього магнітного поля на атоми і молекули речовини. В будь-якій речовині, вміщеній у зовнішнє магнітне поле, виникає особливий стан намагніченості і створюється внутрішнє магнітне поле.

Розглянемо причини цього явища з погляду будови атомів і молекул, поклавши в основу **гіпотезу Ампера**, згідно з якою в будь-якому тілі існують мікроскопічні струми, обумовлені рухом електронів в атомах і молекулах.



Електрони в атомах рухаються по деяких замкнених орбітах. Електрон, що рухається по одній з таких орбіт (рис. 1.2.16), еквівалентний коловому струму, тому він має орбітальний магнітний момент  $\vec{p}_{ml} = IS\vec{n}$ , модуль якого  $p_m = IS$ , де  $S$  – площа орбіти електрона:  $S = \pi r^2$ .

Рис. 1.2.16. Вектор  $p_m$  напрямлений в той самий бік, що й індукція магнітного поля в центрі колового струму  
Орбітальний магнітний момент електрона.

I. Кількість обертів електронів в секунду  $\nu = \frac{v}{2\pi r}$ .

Тоді сила струму:

$$I = ev = \frac{ev}{2\pi r} \quad \text{і} \quad p_{ml} = \frac{ev}{2\pi r} \pi r^2 = \frac{evr}{2}.$$

З іншого боку, кожний електрон, що рівномірно рухається по орбіті, має орбітальний механічний момент імпульсу, який чисельно дорівнює:

$$L_l = mvr. \quad (1.2.20)$$

Тоді

$$\frac{p_{ml}}{L_l} = \frac{e}{2m}.$$

Вектори  $\vec{p}_{ml}$  і  $\vec{L}_l$  напрямлені у взаємно протилежні сторони. Тому

$$\vec{p}_{ml} = -\frac{e}{2m}\vec{L}_l; \quad \vec{p}_{ml} = -g\vec{L}_l,$$

де  $g_l = \frac{e}{2m}$  – **гіромагнітне відношення орбітальних моментів**.

Гіромагнітне відношення, яке експериментально визначили Ейнштейн і де Гааз, виявилось в два рази більшим від гіромагнітного відношення орбітальних моментів.

Щоб пояснити результат експерименту, припустили, що електрон, крім орбітальних моментів  $\vec{p}_{ml}$  і  $\vec{L}_l$ , має **власний механічний момент імпульсу**  $\vec{L}_s$ , що називається **спіном електрона**. Спін є невід'ємною властивістю електрона, подібно до того, як заряд  $e$  і маса  $m$ . Спін електрона виявляється в багатьох експериментальних фактах. Спіну електрона  $\vec{L}_s$  відповідає власний (спіновий) магнітний момент  $\vec{p}_{ms}$ , який дорівнює:

$$\vec{p}_{ms} = -g_s\vec{L}_s = -\frac{e}{m}\vec{L}_s, \quad (1.2.21)$$

де  $g_s$  – гіромагнітне відношення спінових моментів.

Магнітний момент електрона складається з його орбітального і спінового магнітних моментів. Відповідно магнітний момент атома дорівнює сумі магнітних моментів електронів, що входять до складу атома, і магнітного моменту ядра, який значно менший від моментів електрона. Тому магнітним моментом ядра, як правило, нехтують. Отже,

$$\vec{P}_{ma} = \sum_{i=1}^Z \vec{p}_{mli} + \sum_{i=1}^Z \vec{p}_{msi},$$

де  $Z$  – атомний номер хімічного елемента.

За відсутності зовнішнього магнітного поля магнітні моменти орієнтовані хаотично, внаслідок чого сумарний магнітний момент речовини дорівнює нулю і результуюча магнітна індукція поля, яке створене мікроскопічними струмами, дорівнює нулю. Під дією зовнішнього магнітного поля магнітні моменти орієнтуються в певному напрямку і виникає внутрішнє магнітне поле, сумарний магнітний момент відмінний від нуля і речовина намагнічується.

Для кількісного опису намагнічування магнетиків введемо векторну величину – **намагніченість**  $\vec{J}$ , яка чисельно дорівнює магнітному моменту одиниці об'єму магнетика:

$$\vec{J} = \frac{\vec{P}_m}{V} = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N \vec{P}_{mai}, \quad (1.2.22)$$

де  $N$  – кількість атомів (молекул), що знаходяться в об'ємі  $V$ ,  $\vec{P}_{mai}$  – магнітний момент  $i$ -го атома (молекули). Об'єм  $V$  повинен бути настільки малим, щоб в його межах магнітне поле можна було вважати однорідним.

### Елементарна теорія діа- і парамагнетизму

Досліди і теорія показують, що всі речовини, які поміщені в магнітне поле, набувають магнітних властивостей, тобто намагнічуються і тому деякою мірою змінюють зовнішнє поле.

При цьому виявляється, що одні речовини послаблюють зовнішнє поле, а інші – підсилюють його; перші називаються *діамагнетиками*, другі – *парамагнетиками*. Більшість речовин належить до діамагнетиків.

*Діамагнетиками* називають речовини, магнітні моменти атомів або молекул яких дорівнюють нулю, коли немає зовнішнього магнітного поля.

В цих речовинах спінові та орбітальні магнітні моменти електронів взаємно скомпенсовані.

*Парамагнетиками* називають речовини, які намагнічуються в зовнішньому магнітному полі в напрямку останнього і мають додатно магнітну сприйнятливість; Вони належать до слабо магнітних речовин, магнітня проникність яких не значно відрізняється від 1.

Вище вказані типи речовин відрізняються тим, що при внесенні до зовнішнього магнітного поля парамагнітні зразки намагнічуються так, що їх власне магнітне поле виявляється направленим по зовнішньому полю, а діамагнітні зразки намагнічуються проти зовнішнього поля. Тому у парамагнетиків  $\mu > 1$ , а у діамагнетиків  $\mu < 1$ . Відмінність  $\mu$  від одиниці у пара- і діамагнетиків надзвичайно мала. Наприклад, у алюмінію, який відноситься до

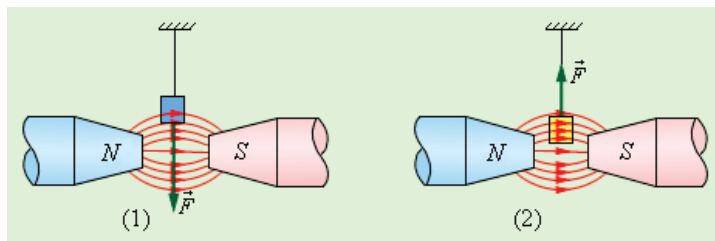


Рис. 1.2.17. Парамагнетик (1) і діамагнетик (2) в неоднорідному магнітному полі.

парамагнетиків,  $\mu - 1 \approx 2,1 \cdot 10^{-5}$ , у хлористого заліза ( $\text{FeCl}_3$ )  $\mu - 1 \approx 2,5 \cdot 10^{-3}$ . До парамагнетиків відносяться також платина, повітря і багато інших речовин. До діамагнетиків відносяться мідь ( $\mu - 1 \approx -3 \cdot 10^{-6}$ ), вода ( $\mu - 1 \approx -9 \cdot 10^{-6}$ ), вісмут ( $\mu - 1 \approx -1,7 \cdot 10^{-3}$ ) і інші речовини.

Зразки з пара- і діамагнетика, поміщені в неоднорідне магнітне поле між полюсами електромагніту, поведуться по-різному – парамагнетики втягуються в область сильного поля, діамагнетики – виштовхуються (рис. 1.2.17).

Слід зазначити, що діамагнітними властивостями володіють атоми будь-яких речовин. Проте у багатьох випадках діамагнетизм атомів маскується сильнішим парамагнітним ефектом. Явище діамагнетизму було відкрито М. Фарадеєм у 1845 р.

Речовини, здатні сильно намагнічуватися в магнітному полі, називаються **ферромагнетиками**. Магнітна проникність ферромагнетиків по порядку величини лежить в межах  $10^2$ – $10^5$ . Наприклад, у сталі  $\mu \approx 8000$ , у сплаві заліза з нікелем магнітна проникність досягає значень 250 000.

До даної групи відносяться чотири хімічні елементи: залізо, нікель, кобальт, гадоліній. З них найбільшою магнітною проникністю володіє залізо. Тому вся ця група отримала назву ферромагнетиків.

Ферромагнетиками можуть бути різні сплави, що містять ферромагнітні елементи. Широке застосування в техніці отримали керамічні ферромагнітні матеріали – ферити.

Для кожного ферромагнетика існує певна температура (так звана **температура або точка Кюрі**), вище за яку ферромагнітні властивості зникають, і речовина стає парамагнетиком. У заліза, наприклад, температура Кюрі рівна  $770^\circ\text{C}$ , у кобальту  $1130^\circ\text{C}$ , у нікелю  $360^\circ\text{C}$ .

Феромагнітні матеріали діляться на дві великі групи – на **магніто-м'які** і **магніто-жорсткі** матеріали. Магніто-м'які феромагнітні матеріали майже повністю розмагнічуються, коли зовнішнє магнітне поле стає рівним нулю. До магніто-м'яких матеріалів відноситься, наприклад, чисте залізо, електротехнічна сталь і деякі сплави. Ці матеріали застосовуються в приладах змінного струму, в яких відбувається безперервне перемагнічування, тобто зміна напрямку магнітного поля (трансформатори, електродвигуни і т. і.).

Магніто-жорсткі матеріали значною мірою зберігають свою намагніченість і після видалення їх з магнітного поля. Прикладами магніто-жорстких матеріалів можуть служити вуглецева сталь і ряд спеціальних сплавів. Магніто-жорсткі матеріали використовуються в основному для виготовлення **постійних магнітів**.

Магнітна проникність  $\mu$  феромагнетиків **не є сталою величиною**; вона сильно залежить від індукції  $B_0$  зовнішнього поля. Типова залежність  $\mu(B_0)$  приведена на рис. 1.2.18. У таблицях зазвичай приводяться значення максимальної магнітної проникності.

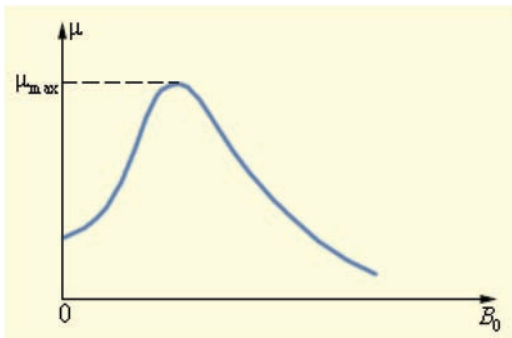


Рис. 1.2.18. Залежність магнітної проникності феромагнетика від індукції зовнішнього магнітного поля.

Непостійність магнітної проникності призводить до складної нелінійної залежності індукції  $B$  магнітного поля у феромагнетику від індукції  $B_0$  зовнішнього магнітного поля. Характерною особливістю процесу намагнічення феромагнетиків є так званий **гістерезис**, тобто залежність намагнічення від передісторії зразка. Крива намагнічення  $B(B_0)$  феромагнітного зразка є петлею складної форми, яка називається **петлею гістерезису** (рис. 1.2.19).

З рис. 1.2.19 видно, що при  $|B_0| > B_{0s}$  настає магнітне насичення – намагніченість зразка досягає максимального значення.

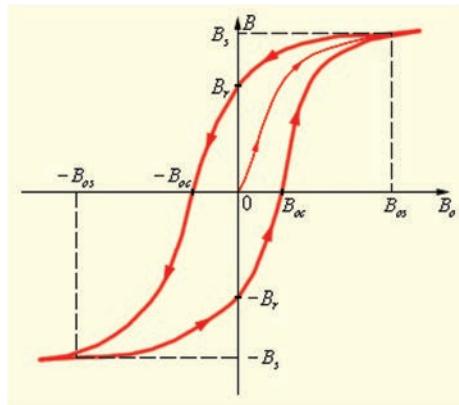


Рис. 1.2.19. Петля гістерезису ферромагнетика. Стрілками вказано спрямування процесів намагнічення і розмагнічування ферромагнітного зразка при зміні індукції  $B_0$  зовнішнього магнітного поля.

Якщо тепер зменшувати магнітну індукцію  $B_0$  зовнішнього поля і довести її знов до нульового значення, то ферромагнетик збереже **залишкову намагніченість** – поле усередині зразка буде рівне  $B_r$ . Залишкова намагніченість зразків дозволяє створювати постійні магніти. Для того, щоб повністю розмагнітити зразок, необхідно, змінивши знак зовнішнього поля, довести магнітну індукцію  $B_0$  до значення  $-B_{0c}$ , яке прийнято називати *коерцитивною силою*. Далі процес перемагнічування може бути продовжений, як це вказано стрілками на рис. 1.2.20.

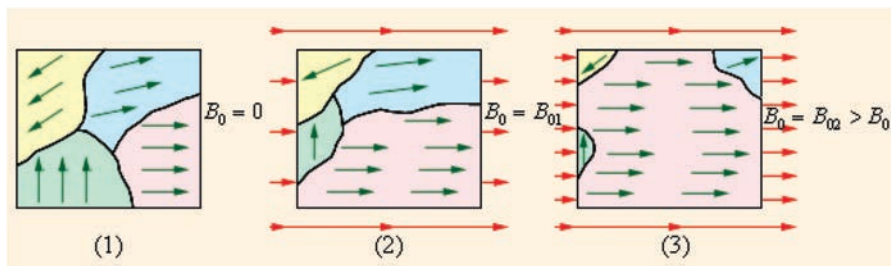


Рис. 1.2.20. Намагнічування ферромагнітного зразка: (1)  $B_0 = 0$ ; (2)  $B_0 = B_{01}$  3)  $B_0 = B_{02} > B_{01}$ .

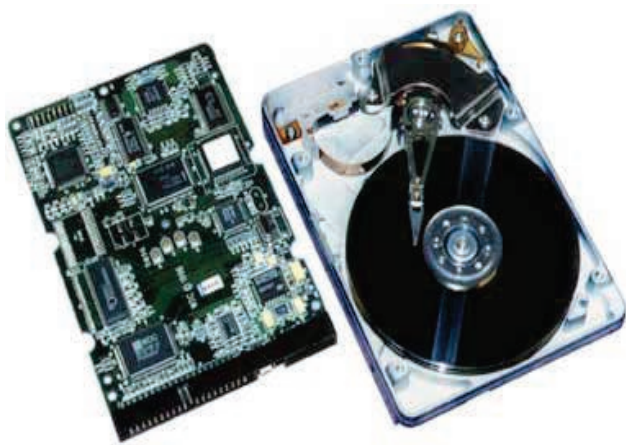
У магніто-м'яких матеріалів значення коерцитивної сили  $B_{0c}$  невелике – петля гістерезису таких матеріалів досить вузька. Матеріали з великим

значенням коерцитивної сили, тобто такі, що мають широку петлю гістерезису, відносяться до магніто-жорстких.

Рис. 1.2.20 може служити якісною ілюстрацією процесу намагнічення феромагнітного зразка.

### **Зовнішня пам'ять ПК**

На основі явища феромагнетизму створені та функціонують накопичувачі на гнучких та жорстких магнітних дисках – зовнішня пам'ять.



*Рис. 1.2.21. Жорсткий диск.*

**Накопичувачі –** це

запам'ятовуючі пристрої, призначені для тривалого (що не залежить від електроживлення) зберігання великих обсягів даних. Ємність накопичувачів в сотні разів перевищує ємність оперативної пам'яті або взагалі необмежена, якщо мова йде про накопичувачі зі змінними носіями.

Накопичувач можна розглядати як сукупність носія та відповідного приводу. Розрізняють накопичувачі зі змінними і постійними носіями.

### **Накопичувачі на жорстких магнітних дисках (НЖМД)**

НЖМД – це основний пристрій для довготривалого збереження великих об'ємів даних та програм. Інші назви: жорсткий диск, вінчестер, HDD (Hard Disk Drive). Ззовні, вінчестер є плоскою герметично закритою коробкою, всередині якої знаходяться на спільній осі декілька жорстких алюмінієвих або скляних пластинок круглої форми (рис. 1.2.21).

Поверхня кожного з дисків покрита тонким феромагнітним шаром (речовини, що реагує на зовнішнє магнітне поле), власне на ньому зберігаються записані дані. При цьому запис проводиться на обидві поверхні кожної пластини (крім крайніх) за допомогою блоку спеціальних магнітних головок.

Кожна головка знаходиться над робочою поверхнею диска на відстані 0,5–0,13 мкм. Пакет дисків обертається безперервно і з великою частотою, тому механічний контакт головок і дисків недопустимий. Основні характеристики, на які варто звернути увагу при виборі жорсткого диска:

- ємність вимірюється у Гігібайтах (Гіга –  $10^9$ ) і Терабайтах (Тера –  $10^{12}$ );
- час доступу вимірюється у мкс (мікро –  $10^{-6}$ );
- швидкість передачі даних вимірюється у Мбайт/с, Гбайт/с;
- частота обертання (для домашніх ПК – 7200 об/хв.

Перший жорсткий диск був розроблений у 1973 році фірмою IBM за новою технологією і міг зберігати до 16 Кбайт даних. Оскільки цей диск мав 30 доріжок, кожна з яких була розбита на 30 секторів, то йому дали назву – 30/30. За аналогією з автоматичними гвинтівками, що мають калібр 30/30, такі жорсткі диски стали називатися «вінчестерами». У накопичувачі може бути до десятих дисків. Їх поверхня розбивається на кола, що називаються доріжками (track). Кожна доріжка має свій номер. Доріжки з однаковими номерами, що розташовані одна над одною на різних дисках утворюють циліндр. Доріжки на диску розбиті на сектори (нумерація починається з одиниці). Сектор займає 571 байт: 512 відведено для запису потрібної інформації, решта під заголовок (префікс), що визначає початок і номер секції та закінчення (суфікс), де записана контрольна сума, потрібна для перевірки цілісності збережених даних. Сектори й доріжки утворюються під час форматування диска. Форматування виконує користувач за допомогою спеціальних програм. Ніяка інформація не може бути записана на неформатований диск. Жорсткий диск може бути розбитий на логічні диски. Це зручно, оскільки наявність декількох логічних дисків спрощує структурування даних, що зберігаються на жорсткому диску.

На жорсткому диску зберігається все програмне забезпечення, що використовується в комп'ютері. Сучасний жорсткий диск дозволяє зберігати понад 1 Терабайт даних. Швидкість запису даних сучасного жорсткого диску лежить в межах 25–50 Мбайт/с. Вартість сучасного диска є цілком прийнятною,

враховуючи великі об'єми даних, що зберігаються на ньому. Жорсткий диск – основний носій даних сучасного комп'ютера.

Запис даних на жорсткий диск здійснюється наступним чином. При зміні сили струму, що проходить через магнітну головку, відбувається зміна напруженості динамічного магнітного поля в щілині між поверхнею дисків та головкою, що приводить до зміни стаціонарного магнітного поля феромагнітних частин покриття диску. Операція зчитування відбувається у зворотному порядку. Намагнічені частинки феромагнітного покриття спричиняють електрорушійну силу самоіндукції магнітної головки. Електромагнітні сигнали, що виникають при цьому, підсилюються й передаються для подальшого оброблення.

Роботою вінчестера керує спеціальний апаратно–логічний пристрій – контролер жорсткого диска. Колись це була окрема плата, яку під'єднували через слоти до материнської плати. У сучасних комп'ютерах функції контролера жорсткого диска виконують чіпсети.

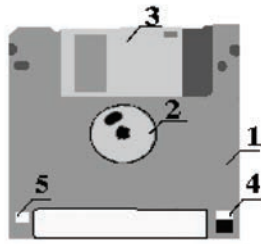
### **Накопичувачі на гнучких магнітних дисках (НГМД)**

НГМД або дисковод (FDD – Floppy Disk Drive) (рис. 1.2.22.а) вмонтований у системний блок. Гнучкі носії для НГМД випускають у вигляді дискет (інша назва флопі-диск). Власне носій – це плоский диск зі спеціальної, достатньо міцної плівки, покритий феромагнітним шаром і поміщений у захисний конверт із рухомою засувкою у верхній частині (рис. 1.2.22.б).

Дискети використовуються, в основному, для оперативного перенесення невеликих об'ємів інформації з одного комп'ютера на інший. Дані, записані на дискеті можна захистити від стирання чи перезапису. Для цього потрібно пересунути маленьку захисну засувку в нижній частині дискети таким чином, щоб утворилося відкрите віконце 4. Для того, щоб дозволити запис цю засувку слід перемістити так, щоб закрити віконце.



а)



б)

1. Захисний корпус
2. Фланець приводу диска
3. Захисна шторка
4. Отвір заборони запису
5. Отвір – ознака дискети високої щільності

Рис. 1.2.22. Накопичувач на гнучких

магнітних дисках:

а) дисковод; б) дискета.

Використовувались дискети діаметром 5,25 і 3,5 дюйма. На дискеті можна зберігати мало інформації, лише 700 кбайт – 1,44 Мбайт. За сучасними мірками цей об'єм є дуже малим. Швидкість передачі даних декілька десятків кілобайт за секунду – навіть при таких малих об'ємах дискети, вона записується і зчитується тривалий час. Крім того дискета, ненадійна. Це пов'язано з тим, що механіка дисковода така, що головка торкається феромагнітної поверхні в процесі роботи, ушкоджуючи її, а сама поверхня диска погано захищена від впливу навколишнього середовища, особливо від електромагнітного впливу.

Лицьова панель дисководу (рис. 1.2.22.а) виведена на передню панель системного блоку, на якій розташовані кишень, закрита шторкою, куди вставляють дискету, кнопка для виймання дискети та лампочка–індикатор. Дискета вставляється у дисковод верхньою засувкою вперед, її потрібно вставити у кишень накопичувача і плавно просунути вперед до висунення кнопки. Правильний напрямок вставляння дискети помічено стрілкою на пластиковому корпусі. Щоб вийняти дискету з накопичувача, потрібно натиснути на кнопку. Світловий індикатор на дисководі показує, коли пристрій зайнятий (якщо лампочка світиться, виймати дискету не рекомендується). На відміну від жорсткого диска, диск у дисководі приводиться в обертання тільки за командою на читання або запис, в інший час він перебуває у спокої.

Як і у випадку жорсткого диску, поверхня гнучкого диску розбивається на доріжки, які у свою чергу розбиваються на сектори. Сектори й доріжки утворюються під час форматування дискети. Дискети реалізуються відформатованими.

**Під час користування дискетою слід дотримуватися таких правил:**

- не торкатись робочої поверхні дискети;
- не вигинати дискету;
- не знімати металічну засувку, забруднена дискета може пошкодити голівку;
- зберігати дискети подалі від джерел магнітних полів;
- перед використанням перевірити дискету на наявність вірусів за допомогою антивірусної програми.

### **Електромагнітна індукція. Самоіндукція та взаємоіндукція**

Після відкриття *Ерстеда*, в якому було доведено, що навколо провідників із струмом існує магнітне поле, природно було поставити питання про можливість утворення електричного струму у провідниках за допомогою магнітного поля. Це питання розв'язав *М. Фарадей*, який в 1831 р. показав, що в замкненому провіднику виникає електричний струм при будь-яких змінах магнітного потоку через поверхню, охоплену цим провідником.

*Явище виникнення електрорушійної сили при зміні магнітного потоку, що пронизує поверхню, яка охоплена провідним контуром, називається електромагнітною індукцією.* Струм, що виникає у провідниках внаслідок електромагнітної індукції, називається індукційним.

Виникнення індукційного струму завжди пов'язане зі зміною магнітного потоку через поверхню, яку охоплює провідник. Ці зміни можуть відбуватися з різних причин, зокрема через:

- переміщення постійного магніта відносно нерухомого провідника;
- переміщення контуру відносно нерухомого магніта;
- замикання та розмикання струму в обмотці нерухомого електромагніта,

розміщеного поблизу провідника;

- відносне переміщення контура і електромагніта;
- зміну магнітної індукції поля електромагніта (виймання осердя при сталому струмі в обмотці або зміну струму реостатом);
- зміну комутатором напрямку струму в обмотці електромагніта;
- постійний рух контуру в неоднорідному магнітному полі;
- обертальний рух контуру в однорідному магнітному полі.

Отже, індукційний струм в замкненому провідному контурі виникає тільки тоді, коли змінюється магнітний потік, який проходить через площу, охоплену контуром.

Фарадей встановив, що напрямок індукційного струму в провіднику залежить від характеру зміни (збільшення чи зменшення) магнітного потоку ( $\Delta\Phi > 0$  чи  $\Delta\Phi < 0$ ) через його контур. Якщо при внесенні постійного магніту в котушку стрілка гальванометра відхиляється в один бік, то при вийманні магніту вона відхиляється в протилежний бік.

Загальне правило, за допомогою якого можна визначити напрямок індукційного струму в замкненому провіднику, сформулював Е.Х. Ленц:

*індукційний струм у замкненому провіднику завжди має такий напрямок, що створений цим струмом власний магнітний потік протидіє тим змінам зовнішнього магнітного потоку, які збуджують індукційний струм.*

Використовуючи закон Ленца для **визначення напрямку індукційного струму**, треба:

- 1) знайти причину, яка створює індукційний струм;
- 2) вважаючи, що індукційний струм протидіє цій причині, знайти напрямок його магнітного поля;
- 3) визначити напрямок індукційного струму за напрямком його магнітного поля.

Із закону Ленца можна встановити, що енергія індукційного струму у провіднику утворюється за рахунок тієї енергії, яка витрачається на подолання протидії магнітного поля індукційного струму.

Завдяки явищу електромагнітної індукції можна перетворити механічну енергію в електричну і навпаки, а також передавати електричну енергію з одного кола в інше.

Якщо індукційний струм виникає у прямому провіднику, який є ділянкою замкненого кола і рухається в зовнішньому магнітному полі перпендикулярно до ліній індукції, напрямок струму можна визначити за **правилом правої руки**: праву руку треба помістити в магнітному полі так, щоб лінії напруженості входили в долоню, а відставлений під прямим кутом великий палець збігався з напрямом переміщення провідника, тоді чотири витягнуті пальці вкажуть напрямок індукційного струму в цьому провіднику.

Індукційний струм  $I_i$ , у замкненому провіднику з опором  $R$  виникає під дією  $\varepsilon_i$ , яку можна виразити за законом Ома:

$$\varepsilon_i = I_i R.$$

Оскільки та сама ЕРС у провідниках з різним опором створює неоднакові струми, то для кількісної характеристики явища електромагнітної індукції зручніше користуватися величиною  $\varepsilon_i$ , а не силою індукційного струму  $I_i$ .

Дослідження Фарадея індукційного струму в контурах різної форми і розмірів показали, що ЕРС електромагнітної індукції  $\varepsilon_i$  в контурі пропорційна до швидкості зміни магнітного потоку  $\Phi_B$  через поверхню, обмежену цим контуром (закон Фарадея):

$$\varepsilon_i = k \frac{d\Phi_B}{dt}.$$

ЕРС електромагнітної індукції в контурі вважають позитивною, якщо магнітний момент  $\vec{p}_m$  відповідного їй індукційного струму утворює гострий кут з лініями магнітної індукції того поля, яке наводить цей струм (рис. 1.2.23).

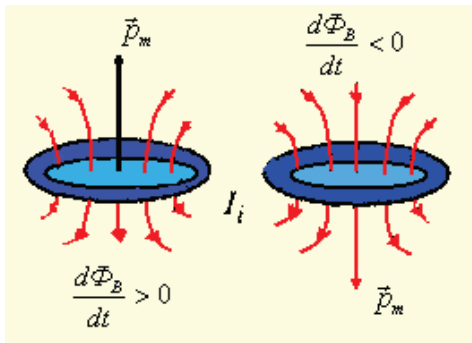


Рис. 1.2.23. Демонстрація правила Ленца.

Тоді для випадку, зображеного на рисунку ліворуч,  $\varepsilon_i < 0$ , а для зображеного праворуч –  $\varepsilon_i > 0$ . В системі СІ  $k = -1$  і

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (1.2.23)$$

Знак « $\leftarrow$ » є математичним виразом правила Ленца.

Ця формула, яка об'єднує закони Фарадея і Ленца, є математичним виразом основного закону електромагнітної індукції:

*електрорушійна сила електромагнітної індукції в замкненому контурі чисельно дорівнює і протилежна за знаком швидкості зміні магнітного потоку крізь поверхню, обмежену контуром.*

Якщо ЕРС індукції виникає при зміні магнітного потоку, який пронизує котушку з  $N$  витків, то її величина буде відповідно в  $N$  разів більшою, ніж для одного витка, тобто:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d\psi}{dt}. \quad (1.2.24)$$

На основі закону електромагнітної індукції можна означити одиницю магнітного потоку вебер: 1 Вб – це такий магнітний потік, при зменшенні якого до нуля протягом 1 с в колі, яке він пронизував, виникає ЕРС індукції в 1 В (рис. 1.2.21).

### Явище самоіндукції. Індуктивність

Згідно із законом Фарадея, електрорушійна сила індукції  $\varepsilon_i$ , виникає при будь-яких змінах магнітного потоку  $\Phi_e$  через поверхню, охоплену провідним контуром, незалежно від природи цього потоку і рівна (1.2.24).

Під час проходження по контуру непостійного струму власний магнітний потік змінюється і в контурі теж наводиться ЕРС індукції.

*Явище виникнення в контурі ЕРС індукції при змінах власного магнітного потоку, пов'язаних із зміною струму в цьому контурі, називається*

**самоіндукцією.** Електрорушійна сила в цьому випадку називається ЕРС самоіндукції  $\varepsilon_c$ .

Отже, самоіндукція – це окремий випадок загального явища електромагнітної індукції.

Розглянемо соленоїд, що має  $N$  витків, по яких проходить струм  $I$  від зовнішнього джерела. Цей струм створює в соленоїді магнітне поле, яке зосереджене в його об'ємі і це поле можна вважати однорідним. Нехай весь об'єм магнітного поля соленоїда заповнений однорідною речовиною з відносною магнітною проникністю  $\mu$ . Якщо змінювати струм в соленоїді, то власний магнітний потік  $\Phi_B$  який пронизує його поперечний переріз, теж змінюватиметься. Магнітний потік  $\Phi_B$  крізь площу  $S$ , що обмежена одним витком, дорівнює:

$$\Phi_B = BS = \mu\mu_0 nSI = \mu\mu_0 \frac{NS}{l} I,$$

де  $l$  – довжина соленоїда. За законом Фарадея:

$$\varepsilon_c = -N \frac{d\Phi_{B1}}{dt} = -\frac{d}{dt} \left( \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l} I \right).$$

Припустимо, що сили, які деформують соленоїд, дуже малі і тому  $l$  і  $S$  залишаються сталими. Якщо всередині соленоїда знаходиться феромагнітне осердя, то магнітний потік  $\Phi_B$  змінюється не лише внаслідок зміни сили струму  $I$ , але і від зміни  $\mu$ . Позначимо

$$\mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l} = L.$$

Тоді:

$$\varepsilon_c = -\frac{d}{dt} (LI) = -L \frac{dI}{dt} - I \frac{dL}{dt}.$$

Якщо магнітна проникність середовища  $\mu$  не змінюється, то:

$$\varepsilon_c = -L \frac{dI}{dt} \quad (1.2.25)$$

ЕРС самоіндукції прямо пропорційна швидкості зміни сили струму в контурі.

Параметр  $L$  характеризує індивідуальні властивості контуру. Його називають **коефіцієнтом індуктивності**, або просто **індуктивністю** контуру.

Вона залежить від форми контуру, його розмірів та відносної магнітної проникності середовища, в якому він знаходиться.

З виразів для ЕРС самоіндукції, а саме:

$$\varepsilon_C = -L \frac{dI}{dt} \text{ та } \varepsilon_C = -N \frac{d\Phi_{B1}}{dt} = -\frac{d\psi_C}{dt},$$

де  $\psi_C$  – потокозчеплення самоіндукції, отримуємо, що  $LdI = d\psi_C$ .

Отже, **індуктивністю** замкненого контуру називається скалярна величина  $L$ , яка дорівнює відношенню потокозчеплення самоіндукції контуру  $\psi_C$  до сили струму  $I$  в цьому контурі:

$$L = \frac{\psi_C}{I}. \quad (1.2.26)$$

Одиниця індуктивності – генрі (Гн): 1 Гн – індуктивність такого контуру, потокозчеплення самоіндукції якого при струмі 1 А дорівнює 1 Вб.

Формулу  $\varepsilon_C = -L \frac{dI}{dt}$  можна використати для провідників довільної форми, якщо знайти потокозчеплення  $\psi_C = LI$ , яке пов'язане з цим провідником при силі струму  $I$ .

У виразі для ЕРС самоіндукції знак «–», зумовлений правилом Ленца, показує, що наявність індуктивності контура приводить до сповільнення зміни струму в ньому. Тобто індуктивність контуру є мірою його інертності відносно зміни струму.

Якщо струм з часом збільшується, то  $\frac{dI}{dt} > 0$  і  $\varepsilon_C < 0$ , тобто струм самоіндукції напрямлений назустріч струму, який зумовлений зовнішнім джерелом і гальмує його зростання. Якщо струм з часом зменшується, то  $\frac{dI}{dt} < 0$ , і  $\varepsilon_C > 0$ , тобто індукційний струм має такий напрямок, як і спадний струм в контурі, і сповільнює його зменшення.

### **Явище взаємної індукції. Взаємна індуктивність**

Якщо два контури розміщені так, що магнітний потік, який створюється струмом в одному з них, хоч частково пронизує другий контур, то такі контури індуктивно пов'язані між собою і між ними виникає *взаємоіндукція*.

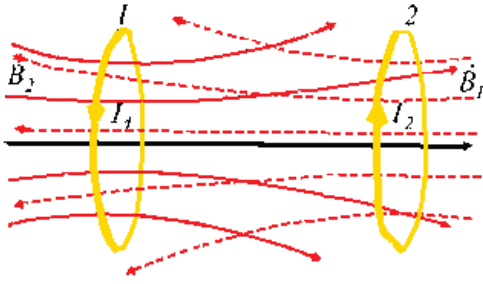


Рис. 1.2.24. Явище взаємної індукції.

Розглянемо два нерухомі контури, індуктивності яких  $L_1$  і  $L_2$ , що розміщені досить близько один від одного (рис. 1.2.24). Якщо в контурі 1 тече струм  $I_1$ , то магнітний потік, що створюється цим струмом, пропорційний до  $I_1$ .

Позначимо  $\Phi_{B12}$  ту частину потоку, яка пронизує контур 2. Тоді  $\Phi_{12} = L_{12}I_1$ , де  $L_{12}$  – коефіцієнт пропорційності.

Якщо струм  $I_1$  змінюється, то в контурі 1 індукція ЕРС  $\varepsilon_{i2}$ , яка за законом Фарадея дорівнює швидкості зміни магнітного потоку  $\Phi_{B12}$ :

$$\varepsilon_{i2} = -\frac{d\Phi_{B12}}{dt} = -L_{12} \frac{dI_1}{dt}.$$

Аналогічно, при протіканні в контурі 2 струму  $I_2$ , магнітний потік пронизує перший контур. Якщо  $\Phi_{B12}$  – частина потоку, що пронизує контур 1, то  $\Phi_{B12} = L_{21}I_2$ .

Якщо струм  $I_2$  змінюється, то в контурі 1 індується ЕРС  $\varepsilon_{i1}$ :

$$\varepsilon_{i1} = -\frac{d\Phi_{B21}}{dt} = -L_{21} \frac{dI_2}{dt}.$$

Контури 1 і 2 називаються зв'язаними. Коефіцієнти  $L_{12}$  і  $L_{21}$  називаються взаємною індуктивністю контурів.

Вони є мірою магнітно-індуктивно зв'язку між двома контурами і характеризують їх здатність збуджувати ЕРС індукції в одному з них при зміні струму в другому.

Розрахунки показують, що  $L_{12} = L_{21}$ . Коефіцієнти  $L_{12}$  і  $L_{21}$  залежать від геометричної форми, розмірів, взаємного розміщення контурів і від магнітної проникності середовища, яке оточує контури.

### Енергія магнітного поля

Провідник, по якому протікає електричний струм, завжди оточений магнітним полем, причому магнітне поле появляється і зникає разом з появою і

зникненням струму. Отже, частина енергії струму йде на створення магнітного поля.

*Енергія магнітного поля дорівнює роботі, яка затрачається струмом на створення цього поля.*

Обчислимо енергію магнітного поля струму у випадку ізотропного середовища, в якому зв'язок індукції з напруженістю поля в ньому лінійний. Для цього розглянемо соленоїд з  $N$  витків, який має індуктивність  $L$ . Якщо за час  $dt$  струм у соленоїді зростає на величину  $dI$ , то при цьому змінюється і його власний магнітний потік відповідно на величину  $d\Phi_B$ . Якщо в момент часу  $t$  сила струму в соленоїді була  $I$ , то при зміні магнітного потоку на величину  $d\Phi_B$ , джерелом струму виконується додаткова робота:

$$dA = Id\Phi_B.$$

Оскільки соленоїд залишається нерухомим, то ця елементарна робота  $dA$  пов'язана із зміною енергії соленоїда, яка зумовлена наявністю в ньому магнітного поля, на величину  $dW_m$ :

$$dW_m = dA \quad \text{і} \quad dW_m = Id\Phi_B.$$

Оскільки  $d\Phi_B = LdI$ , то  $dW_m = LI dI$ .

Інтегруючи цей вираз, знаходимо:

$$\int_0^{W_m} dW_m = \int_0^I LI dI; \quad W_m = \frac{LI^2}{2}. \quad (1.2.27)$$

Це та енергія, яку було затрачено джерелом струму на створення в соленоїді магнітного поля. За законом збереження енергії вона дорівнює енергії магнітного поля  $W_m$ , яке пов'язане зі струмом  $I$ , що проходить по провіднику з індуктивністю  $L$  (рис. 1.2.25).

Оскільки  $LI = \psi_C$ , то вираз для енергії магнітного поля контуру зі струмом можна записати в такому вигляді:

$$W_m = \frac{\psi_C I}{2}.$$

Дослідження властивостей змінних магнітних полів довело того, що енергія магнітного поля локалізована у просторі.

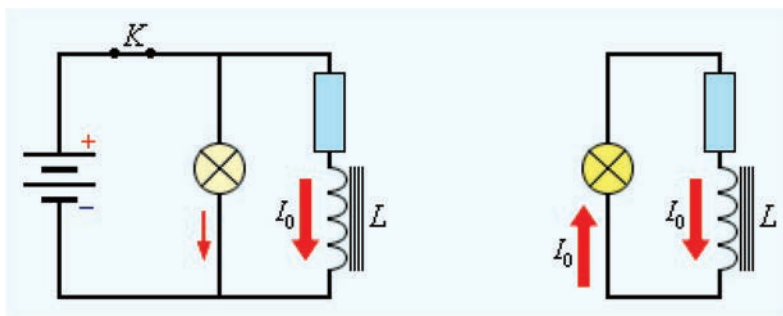


Рис. 1.2.25. Магнітна енергія котушки.

Енергію магнітного поля струму можна визначити через характеристики цього поля – значення його напруженості  $\vec{H}$  та індукції  $\vec{B}$ . Для цього розглянемо частковий випадок – однорідне магнітне поле всередині довгого соленоїда, індуктивність якого  $L = \mu\mu_0 n^2 V$ . Тоді:

$$W_M = \frac{LI^2}{2} = \frac{1}{2} \mu\mu_0 n^2 I^2 V.$$

Магнітна індукція поля в середині довгого соленоїда  $B = \mu\mu_0 In$ . Звідси:

$$In = \frac{B}{\mu\mu_0}.$$

Тоді:

$$W_M = \frac{1}{2} \mu\mu_0 \frac{B^2}{(\mu\mu_0)^2} V = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu\mu_0} V.$$

Оскільки  $B = \mu\mu_0 H$ , то:

$$W_M = \frac{1}{2} \mu\mu_0 H^2 V = \frac{1}{2} B H V. \quad (1.2.28)$$

Магнітне поле соленоїда однорідне і зосереджене всередині соленоїда, а енергія поля розподілена в ньому з **об'ємною густиною  $w_m$** , яка дорівнює:

$$w_m = \frac{W_M}{V} = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}. \quad (1.2.29)$$

Дж. Максвелл показав, що вираз для об'ємної густини магнітної енергії, виведений для соленоїда, справедливий для будь-яких магнітних полів.

У випадку неоднорідного магнітного поля його енергію в деякому об'ємі  $V$  можна визначити так. Поділимо об'єм  $V$  на нескінченно малі елементи  $dV$  так, щоб поле в кожному з них можна було вважати однорідним. Тоді енергія елемента об'єму з локальною густиною  $w_m$  в ньому дорівнює:

$$dW_m = w_m dV.$$

Інтегруючи цей вираз по всьому об'єму поля  $V$ , отримаємо формулу для обчислення енергії неоднорідного поля:

$$W_m = \int_V w_m dV = \int_V \frac{BH}{2} dV. \quad (1.2.30)$$

На явищі взаємної індукції двох обмоток, що намотані на одному спільному осерді базується дія трансформатора напруги. Напруга в первинній обмотці може бути трансформована (перетворена) в напругу тієї ж частоти, але збільшена чи зменшена до необхідного значення у вторинній обмотці відносно первинної.

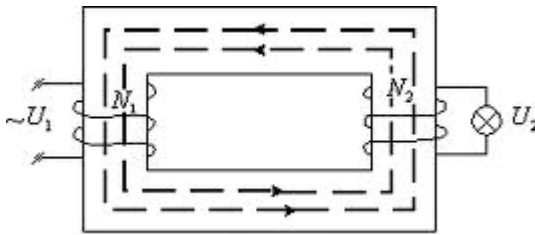


Рис. 1.2.26. Осердя трансформатора.

Коефіцієнт трансформації ( $n$ ) – це число, що визначає, у скільки разів відрізняється напруга, подана на первинну обмотку, від напруги у вторинній обмотці (рис. 1.2.26):

$$n = \frac{U_1}{U_2}. \quad (1.2.31)$$

При цьому вважаємо, що у вторинному колі немає споживача енергії (холостий хід трансформатора).

Оскільки е.р.с. ( $\varepsilon$ ) у кожному витку однакова, то можна записати:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = \frac{\varepsilon N_1}{\varepsilon N_2} = \frac{N_1}{N_2}; \quad n = \frac{N_1}{N_2}.$$

Якщо  $n < 1$  – трансформатор понижувальний; якщо  $n > 1$  – підвищувальний.

При підключенні споживачів (навантаження) виникають навантажувальні струми, обернено пропорційні до числа витків обмоток:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}.$$

Коефіцієнт корисної дії трансформатора ( $\eta$ ) – це відношення корисної потужності (потужність, що потрапляє до споживача) до поданої на трансформатор:

$$\eta = \frac{P_{\text{сп}}}{P_{\text{сп}} + P_{\text{Cu}} + P_{\text{Fe}}}, \quad (1.2.32)$$

де  $P_{cn}$  – потужність споживача;  $P_{Cu}$  та  $P_{Fe}$  – потужності втрат на обмотках трансформатора (як правило мідні) та втрат на пластинах осердя (виготовляється з магнітом'якого феромагнітного матеріалу, умовно сталі). Втрати на нагрівання обмоток дуже малі, оскільки мідний дріт має достатньо великий переріз і низьке значення питомого опору  $\rho_{Cu}$ ; втрати на перемагнічування осердя і на так звані струми Фуко теж малі, оскільки осердя складається із багатьох окремих ізольованих пластин.

ККД трансформатора високий, досягає 98 %.

У лініях передачі електричної енергії на великі відстані потужні трансформатори підвищують напругу до сотень тисяч вольт (сотень кВ), а для споживача знижують напругу до необхідних значень (220 В або 380 В).

Трансформатор та інші елементи, дія яких ґрунтується на описаних вище законах входять до складу блока живлення.

### **Сучасні блоки живлення АТХ та їх характеристики**

Основне призначення блоку живлення – формування напруги живлення, яка необхідна для функціонування всіх блоків ПК. Основна напруга живлення компонентів це: +12 В, +5 В, +3,3 В. Існує також додаткова напруга: –12 В та –5 В. Ще блок живлення здійснює гальванічну розв'язку між мережею 220 В та компонентами комп'ютера. Це необхідно для усунення струмів витоків.

Для здійснення гальванічної розв'язки достатньо виготовити трансформатор з необхідними обмотками. Але для живлення комп'ютера потрібна чимала потужність, особливо для сучасних ПК. Для живлення комп'ютера довелося б виготовляти трансформатор, що мав би не тільки великий розмір, але і був би досить важким. Однак зі збільшенням частоти струму трансформатора для створення того ж магнітного потоку необхідно менше витків і менший перетин магнітопроводу. У блоках живленнях, побудованих на основі перетворювача, частота живлячої напруги трансформатора в 1000 і більше раз вище. Це дозволяє створювати компактні та легкі блоки живлення.

## Найпростіший імпульсний БЖ

Розглянемо блок-схему простого імпульсного блоку живлення, що лежить в основі всіх імпульсних блоків живлення.

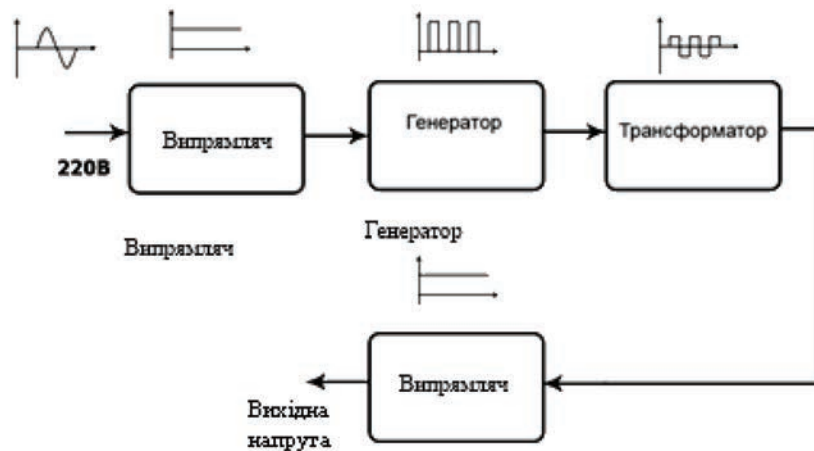


Рис. 1.2.27. Блок-схема імпульсного блоку живлення.

Перший блок здійснює перетворення змінної напруги мережі в постійну. Такий перетворювач складається з діодного мосту, що випрямляє змінну напругу, і конденсатора, що згладжує пульсації випрямленої напруги. У цьому блоці також знаходяться додаткові елементи: фільтри сіткової напруги від пульсацій генератора імпульсів і термістори для згладжування стрибка струму в момент включення. Однак цих елементів може не бути з метою заощадження на собівартості.

Наступний блок – генератор імпульсів, який генерує з певною частотою імпульси, що живлять первинну обмотку трансформатора. Частота генерації імпульсів різних блоків живлення різна та знаходиться в межах 30–200 кГц. Трансформатор здійснює головні функції блоку живлення: гальванічну розв'язку з мережею і зниження напруги до необхідних значень.

Змінну напругу, отриману від трансформатора, наступний блок перетворює у постійну напругу. Блок складається з діодів, що випрямляють напругу, та фільтра пульсацій. У цьому блоці фільтр пульсацій набагато складніше, ніж у першому блоці та складається з групи конденсаторів і дроселя. З метою заощадження виробники можуть встановлювати конденсатори малої ємності, а також дроселі з малою індуктивністю.

Перший імпульсний блок живлення являв собою двотактний або однотактний перетворювач. Двотактний означає, що процес генерації складається з двох частин. У такому перетворювачі по черзі відкриваються та закриваються два транзистори. Відповідно в однотактному перетворювачі один транзистор відкривається і закривається. Схеми двотактного та однотактного перетворювачів представлені нижче.

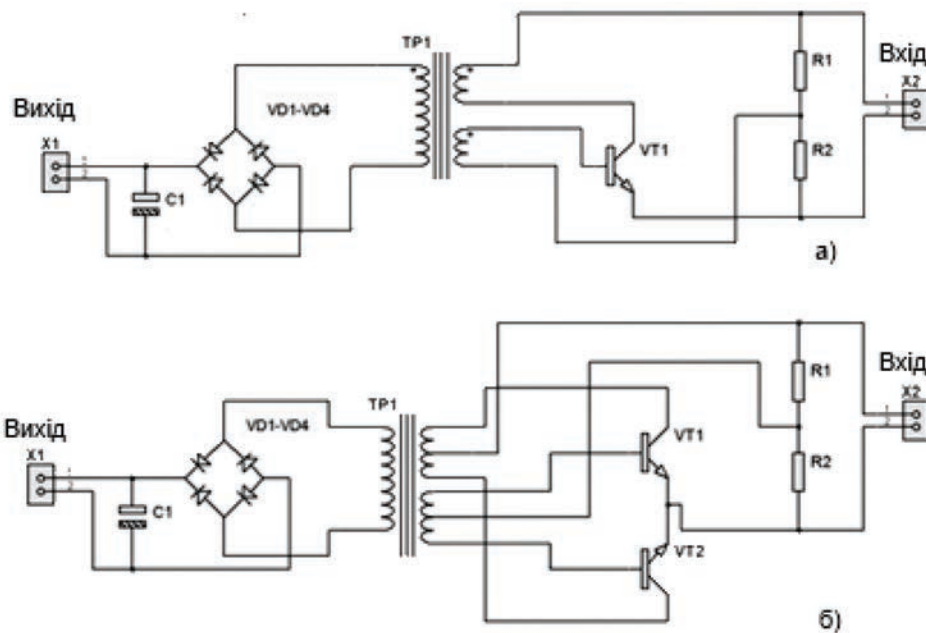


Рис. 1.2.28. Принципова схема перетворювача

(а – однотактного; б – двотактного).

Розглянемо елементи схеми докладніше:

- X2 – роз’єм джерело живлення схеми.
- X1 – роз’єм з якого знімається вихідна напруга.
- R1 – опір, що задає початковий невеликий зсув на витоках. Він необхіден для більш стабільного запуску процесу коливань у перетворювачі.
- R2 – опір, що обмежує струм бази на транзисторах, це необхідно для захисту транзисторів від згоряння.
- TP1 – трансформатор має три групи обмоток. Перша вихідна обмотка формує вихідну напругу. Друга обмотка слугує навантаженням для транзисторів. Третя формує керуючу напругу для транзисторів.

У початковий момент включення першої схеми транзистор трохи відкритий, тому що до бази через резистор R1 прикладена позитивна напруга. Через відкритий транзистор протікає струм, що також протікає і через II обмотку трансформатора. Струм, що протікає через обмотку, створює магнітне поле. Магнітне поле створює напругу в інших обмотках трансформатора. В наслідок на обмотці III створюється позитивна напруга, що ще більше відкриває транзистор. Процес відбувається доти, доки транзистор не потрапить у режим насичення. Режим насичення характеризується тим, що при збільшенні прикладеного керуючого струму до транзистора вихідний струм залишається незмінним.

Оскільки напруга в обмотках генерується тільки у випадку зміни магнітного поля, його зростання або падіння, то відсутність збільшення струму на виході транзистора, отже, обумовить зникнення ЕДС в обмотках II і III. Зникнення напруги в обмотці III призведе до зменшення ступеня відкриття транзистора. І вихідний струм транзистора зменшиться, отже, і магнітне поле буде зменшуватися. Зменшення магнітного поля обумовить створення напруги протилежної полярності. Негативна напруга в обмотці III почне ще більше закривати транзистор. Процес буде тривати доти, доки магнітне поле повністю не зникне. Коли магнітне поле зникне, негативна напруга в обмотці III теж зникне. Процес знову почне повторюватися.

Двотактний перетворювач працює по такому ж принципі, але відмінність в тому, що транзисторів два, і вони по черзі відкриваються та закриваються. Тобто коли один відкритий – інший закритий. Схема двотактного перетворювача має більшу перевагу, тому що використовує всю петлю гістерезису магнітного провідника трансформатора. Використання тільки однієї ділянки петлі гістерезису або намагнічування тільки в одному напрямку приводить до виникнення багатьох небажаних ефектів, які знижують ККД перетворювача та погіршують його характеристики. Тому в основному скрізь застосовується двотактна схема перетворювача з фазозмінюючим

трансформатором. В схемах, де потрібна простота, малі габарити, і мала потужність все-таки використовується одноктна схема.

Розглянемо реальну схему АТХ блоку живлення. Вона має набагато більше елементів і у ній присутні ще додаткові пристрої. Червоними квадратами схема блоку живлення умовно поділена на основні частини (рис. 1.2.29).

Для живлення мікросхеми контролера, а також формування чергової напруги +5, що використовується комп'ютером, коли він виключений, у схемі знаходиться ще один перетворювач. На схемі він позначений як блок 2. Як видно він виконаний за схемою одноктного перетворювача. У другому блоці також є додаткові елементи. В основному це ланцюг поглинання сплесків напруг, які генеруються трансформатором перетворювача. Мікросхема 7805 – стабілізатор напруги формує чергову напругу +5 В з випрямленої напруги перетворювача.

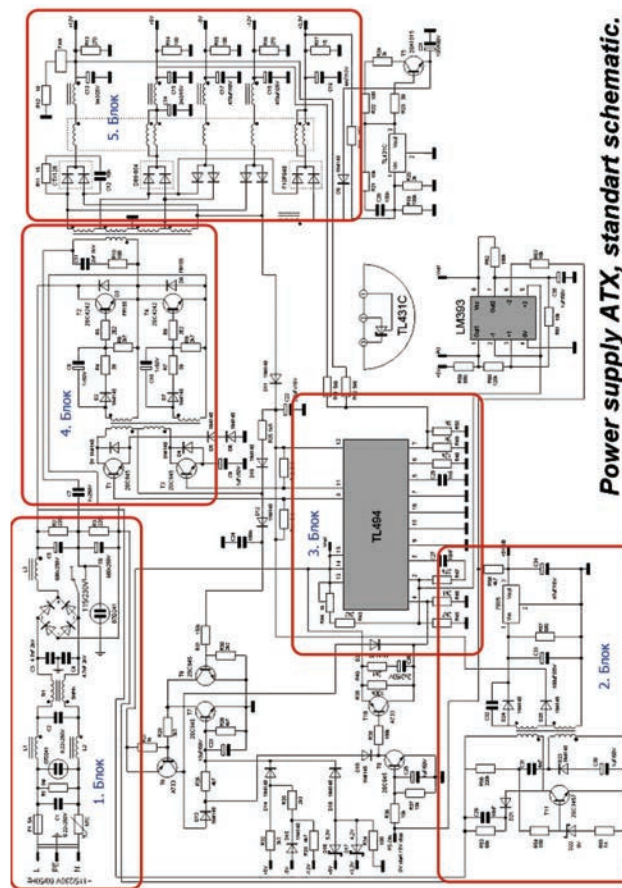


Рис. 1.2.29. Схема АТХ блоку живлення потужністю 150-300 Вт.

Найчастіше в блоці формування чергової напруги встановлені неякісні або дефектні компоненти, що викликає зниження частоти перетворювача до звукового діапазону. Внаслідок чого із блоку живлення чутний писк.

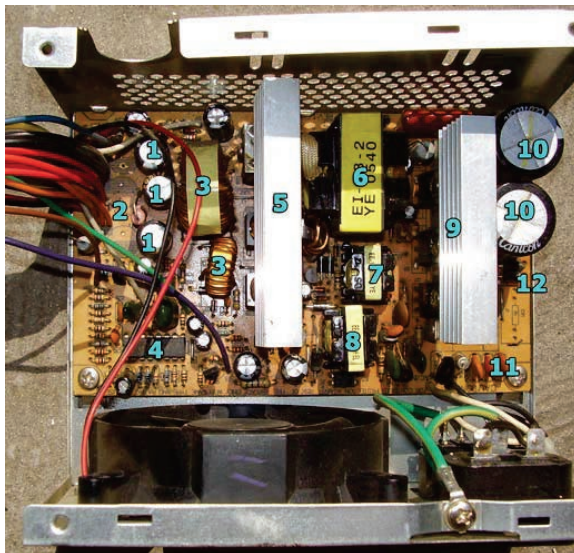
Оскільки блок живлення живиться від мережі змінної напруги 220 В, а перетворювач має потребу в живленні постійною напругою, напругу необхідно перетворити. Перший блок здійснює випрямлення та фільтрацію змінної сіткової напруги. У цьому блоці також знаходиться фільтр, що загороджує від перешкод, які генерує сам блоком живлення.

Третій блок це ШІМ-контролер TL494. Він здійснює всі основні функції блоку живлення. Захищає блок живлення від коротких замикань, стабілізує вихідні напруги та формує ШІМ-сигнал для керування транзисторними ключами, які навантажені на трансформатор.

Четвертий блок складається з двох трансформаторів і двох груп транзисторних ключів. Перший трансформатор формує керуючу напругу для вихідних транзисторів. Оскільки ШІМ-контролер TL494 генерує сигнал слабкої потужності, перша група транзисторів підсилює цей сигнал і передає його першому трансформатору. Друга група транзисторів, або вихідні, навантажені на основний трансформатор, який здійснює формування основних напруг живлення. Така більш складна схема керування вихідними ключами застосована через складність керування біполярними транзисторами та захисту ШІМ-контролера від високої напруги.

П'ятий блок складається з діодів Шотткі, що випрямляють вихідну напругу трансформатора, і фільтра низьких частот (ФНЧ). ФНЧ складається з електrolітичних конденсаторів значної ємності та дроселів. На виході ФНЧ стоять резистори, які навантажують його. Ці резистори необхідні для того, щоб після вимикання ємності блоку живлення не залишалися зарядженими. Також резистори стоять і на виході випрямляча сіткової напруги.

Решта елементів, не обведена в блоці цього ланцюга, формує «сигнали справності». Цими ланцюгами здійснюється робота захисту блоку живлення від короткого замикання або контроль справності вихідних напруг.



*Рис. 1.2.30. Блок живлення ATX потужністю 200 Вт.*

Тепер подивимося, як на друкованій платі блоку живлення потужністю 200 Вт розташовані елементи. На рис. 1.2.30 показані:

1. Конденсатори, що виконують фільтрацію вихідних напруг.
2. Місце не розпаяних конденсаторів фільтра вихідних напруг.
3. Катушки індуктивності, що виконують фільтрацію вихідних напруг.

Велика котушка відіграє роль не тільки фільтра, але ще працює як феромагнітний стабілізатор. Це дозволяє дещо знизити перекося напруг при нерівномірному навантаженні різних вихідних напруг.

4. Мікросхема ШІМ-стабілізатора WT7520.

5. Радіатор на якому встановлені діоди Шотткі для напруг +3,3 В і +5 В, а для напруги +12 В звичайні діоди. Необхідно відзначити, що часто особливо в старих блоках живленнях, на цьому ж радіаторі розміщаються додатково елементи. Це елементи стабілізації напруг +5 В и +3,3 В. У сучасних блоках живленнях розміщуються на цьому радіаторі тільки діоди Шотткі для всіх основних напруг або польові транзистори, які використовуються у якості випрямляча.

6. Основний трансформатор, що здійснює формування всіх напруг, а також гальванічну розв'язку з мережею.

7. Трансформатор, що формує керуючі напруги для вихідних транзисторів перетворювача.

8. Трансформатор перетворювача, що формує чергову напругу +5 В.
9. Радіатор, на якому розміщені вихідні транзистори перетворювача, а також транзистор перетворювача формує чергову напругу.
10. Конденсатори фільтра сіткової напруги. Їх не обов'язково повинно бути два. Для формування двополярної напруги та утворення середньої крапки встановлюють два конденсатори рівної ємності. Вони ділять випрямлену сіткову напругу навпіл, тим самим формуючи дві напруги різної полярності, з'єднані у загальній крапці. В схемах з однополярним живленням конденсатор один.
11. Елементи фільтра мережі від гармонік (перешкод), що генеруються блоком живлення.
12. Діоди діодного мосту, що здійснюють випрямлення змінної напруги мережі.

### **Блоки живлення формату АТХ з корекцією коефіцієнта потужності**

**Потужність** - фізична величина, що характеризує енергію, віддану або отриману об'єктом в одиницю часу. Відповідно, потужність буває виділяється (вихідна) і поглинається (споживана).

Потужність, як і енергія, буває різних видів (механічна, електрична, теплова, акустична, електромагнітна, хвильова і т.п.), які, у свою чергу, пов'язані з природою цієї енергії. Відношення що виділяється в ході перетворення енергії потужності до споживаної називається коефіцієнтом корисної дії (ККД), який характеризує ефективність цього перетворення.

Як відомо з шкільного курсу фізики, потужність  $P$  [Вт] для схеми постійного струму прямо пропорційна напрузі  $U$  [В] і силі струму  $I$  [А] в ділянці кола:

$$P = IU.$$

Цю формулу можна використовувати як для розрахунку потужності, споживаної пристроєм, так і для розрахунку вихідної потужності БЖ, а також для розсіювання теплової потужності.

Відповідно, теплова потужність, яка виділяється на елементі схеми блоку живлення (нагрівання елементу), буде прямо пропорційна силі струму, що проходить через всі споживачі.

Напевно, не треба пояснювати, що сумарна потужність всіх комплектуючих повинна бути менша від максимальної вихідної потужності джерела живлення.

Необхідно також відзначити, що система споживає потужність нерівномірно. Піки потужності припадають на включення ПК або окремого пристрою, задіяння сервоприводів, збільшення обчислювального навантаження на систему і т.д. Виробники часто вказують для пристроїв з великим енергоспоживанням значення пікової потужності. Таким чином, грубо прикинути максимальну споживану потужність навантаження можна просто склавши потужності всіх пристроїв, підключених до БЖ:

$$P = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_i.$$

У розглянутих схемах навантаженням мережі слугує конденсатор, що підключається до мережі через діодний міст. Зарядження конденсатора відбувається тільки в тому випадку, коли на ньому напруга менше ніж мережна. Внаслідок чого, струм носить імпульсний характер, що має безліч недоліків:

- струм вносить у мережу вищі гармоніки (перешкоди);
- велика амплітуда струму споживання;
- значна реактивна складова в струмі споживання;
- мережна напруга не використовується протягом всього періоду;
- ККД таких схем має невелике значення.

Нові блоки живлення мають вдосконалену сучасну схему, у ній з'явився ще один додатковий блок – коректор коефіцієнта потужності (ККП). Він здійснює підвищення коефіцієнта потужності. Або інакше кажучи, забирає деякі недоліки мостового випрямляча сіткової напруги:

$$S = P + jQ. \quad (1.2.33)$$

Коефіцієнт потужності (КП) характеризує, скільки в повній потужності активної складової та скільки реактивної. Взагалі, можна сказати, а навіщо

враховувати реактивну потужність, вона ж хибна та не несе користі. Формула коефіцієнта потужності:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{P+jQ}. \quad (1.2.34)$$

Наприклад, коли ми маємо прилад, блок живлення, з коефіцієнтом потужності 0,7 і потужністю 300 Вт, то як видно з розрахунків, наш блок живлення має повну потужність (суму реактивної і активної потужності) більшу, ніж зазначена на ньому. І цю потужність повинна дати мережа живлення 220 В. Хоча ця потужність не несе користі (навіть лічильник струму її не фіксує) вона все-таки існує:

$$|S| = \frac{P}{\cos\varphi} = \frac{300}{0,7} = 428,57 \text{ (В} \cdot \text{А)}.$$

Тобто внутрішні елементи і мережні проводи повинні бути розраховані на потужність 430 Вт, а не 300 Вт. Через це заборонено використовувати прилади з коефіцієнтом потужності менше 0,6.

Відповідно кампаніями були розроблені нові схеми блоків живлення, які мали ККП. Спочатку в якості ККП використовувався включений на вході дросель великої індуктивності, такий блок живлення називають блок живлення з PFC або пасивним ККП. Подібний блок живлення має підвищений КП. Для досягнення потрібного КП необхідно оснащувати блоки живлення більшим дроселем, тому що вхідний опір блоку живлення носить ємний характер через встановлені конденсатори на виході випрямляча. Встановлення дроселя значно збільшує масу блоку живлення, і підвищує КП до 0,85, що не так вже і багато.

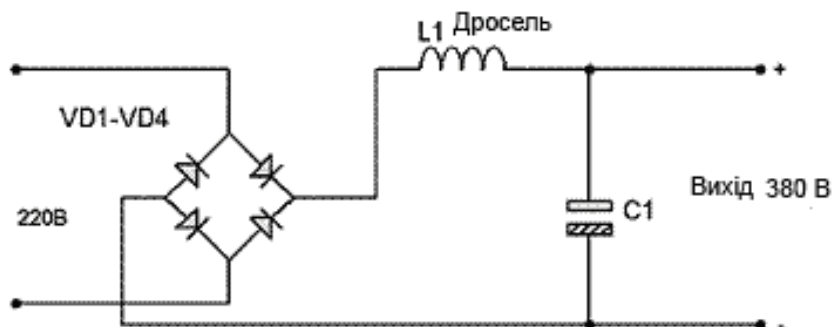


Рис. 1.2.31. Включення дроселя для корекції КП.

- Є і недоліки в цієї схеми - це зниження надійності БЖ і некоректна робота з деякими джерелами безперебійного живлення при перемиканнях режимів роботи батарея / мережа. Некоректна робота цієї схеми з ІБЖ викликана тим, що в схемі значно зменшилася ємність фільтра сіткової напруги. В момент, коли короткочасно пропадає напруга, сильно зростає струм ККП, необхідний для підтримки напруги на виході ККП, в наслідок чого спрацьовує захист від КЗ (короткого замикання) в БЖ.



Якщо подивитися на схему, то вона являє собою генератор імпульсів, що навантажений на дросель. Напруга мережі випрямляється діодним мостом і подається на ключ, що навантажений дроселем  $L1$  і трансформатором  $T1$ . Трансформатор введений для зворотного зв'язку контролера з ключем. Напруга з дроселя знімається за допомогою діодів  $D1$  і  $D2$ . Причому напруга знімається по черзі за допомогою діодів, то з діодного мосту, то з дроселя, і заряджає конденсатори  $C_{s1}$  і  $C_{s2}$ . Ключ  $Q1$  відкривається і у дроселі  $L1$  накопичується енергія потрібної величини. Розмір накопиченої енергії регулюється тривалістю відкритого стану ключа. Чим більше накопичено енергії, тим більшу напругу віддасть дросель. Після вимикання ключа відбувається віддача накопиченої енергії дроселем  $L1$  через діод  $D1$  конденсаторам.

Така робота дозволяє використати повністю всю синусоїду змінної напруги мережі на відміну від схем без ККП, а також стабілізувати напругу, що живить перетворювач.

У сучасних схемах блоків живлення, часто застосовують двоканальні ШІМ-контролери. Одна мікросхема здійснює роботу, як перетворювача, так і ККП. Внаслідок чого істотно знижується кількість елементів у схемі блоку живлення.

Розглянемо схему простого блоку живлення на 12В з використанням двоканального ШІМ-контролера ML4819 (рис. 1.2.33). Одна частина блоку живлення здійснює формування постійного стабілізованої напруги +380В. Інша частина являє собою перетворювач, що формує постійну стабілізовану напругу +12 В. ККП складається, як і у вище розглянутому випадку, з ключа  $Q1$ , навантаженого на нього дроселя  $L1$  трансформатора  $T1$  зворотного зв'язку. Діоди  $D5$ ,  $D6$  заряджають конденсатори  $C2$ ,  $C3$ ,  $C4$ . Перетворювач складається з двох ключів  $Q2$  і  $Q3$ , навантажених на трансформатор  $T3$ . Імпульсна напруга випрямляється діодною збіркою  $D13$  і фільтрується дроселем  $L2$  і конденсаторами  $C16$ ,  $C18$ . За допомогою патрона  $U2$  формується напруга регулювання вихідної напруги.

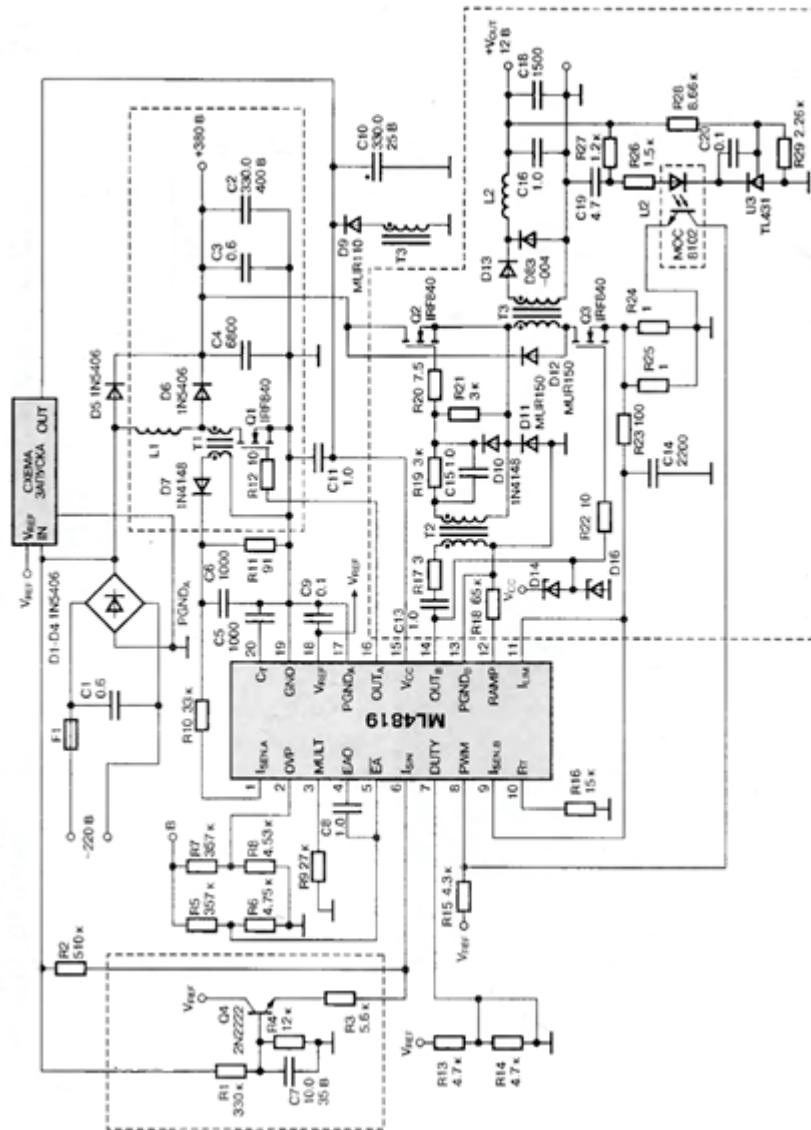


Рис. 1.2.33. Схема простого блоку живлення на двоканальному ШІМ-контролері.

Розглянемо конструкцію блоку живлення, у якій є активний ККП (рис. 1.2.34):

1. Плата керування струмовим захистом;
2. Дросель, що виконує роль як фільтра напруг +12 В и +5 В, так і функцію групової стабілізації;
3. Дросель фільтра напруги +3,3 В;
4. Радіатор, на якому розміщені випрямні діоди вихідних напруг;
5. Трансформатор головного перетворювача;
6. Трансформатор, що керує ключами головного перетворювача;

7. Трансформатор допоміжного перетворювача (формує чергову напругу);
8. Плата контролера корекції коефіцієнта потужності;
9. Радіатор, що охолоджує діодний міст і ключі головного перетворювача;
10. Фільтри сіткової напруги від перешкод;
11. Дросель коректора коефіцієнта потужності;
12. Конденсатор фільтра сіткової напруги.

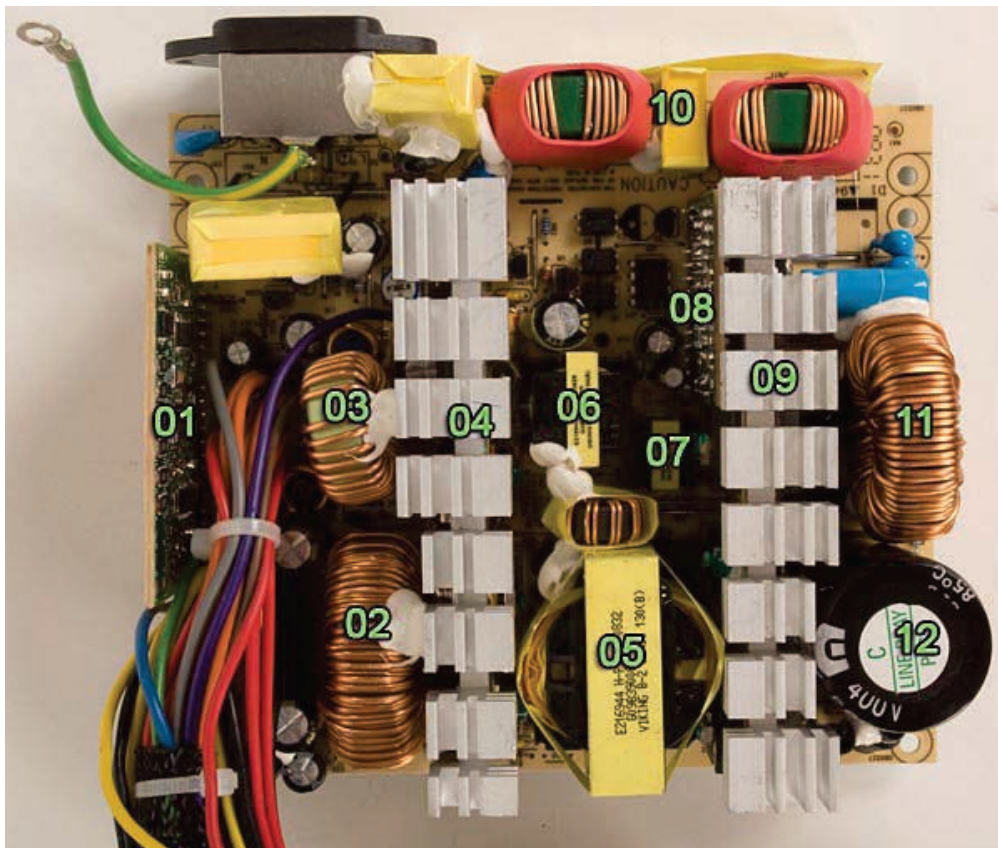


Рис. 1.2.34. Блок живлення *GlacialPower GP-AL650AA*.

### Конструктивні особливості та типи роз'ємів

Розглянемо види роз'ємів, які можуть бути на блоці живлення. На задній стінці блоку живлення розміщується роз'єм для підключення мережного кабелю та вимикач. Раніше поруч з роз'ємом мережного шнура знаходився також роз'єм для підключення мережного кабелю монітора. Опціонально можуть бути присутніми і інші елементи:

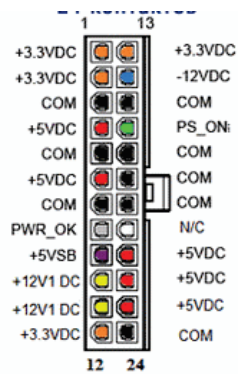
- індикатори сіткової напруги, або стан роботи блоку живлення;
- кнопки керування режимом роботи вентилятора;
- кнопка перемикання вхідної сіткової напруги (110 / 220) В;
- USB-порти вбудовані в блок живлення USB hub;
- інше.

На задній стінці все рідше розміщують вентилятори, які відтягують з блоку живлення повітря. Все частіше вентилятор розміщують у верхній частині блоку живлення через більший простір для встановлення вентилятора, що дозволяє встановити великий і тихий активний елемент охолодження. На деяких блоках живлення встановлюють навіть два вентилятори зверху та позаду (рис. 1.2.35).

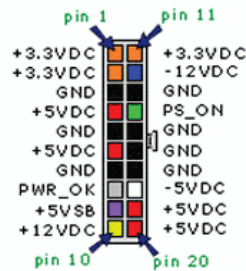


*Рис. 1.2.35. Блок живлення Chieftec CFT-1000G-DF.*

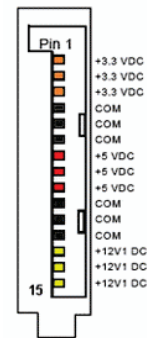
З передньої стінки виходить провід з роз'ємом підключення живлення материнської плати. У деяких блоках живлення, модульних, він, як і інші проводи, підключається через роз'єм. Нижче на рисунку зазначена розпіновка контактів всіх основних роз'ємів.



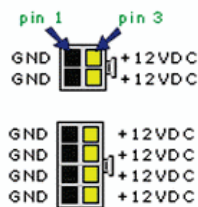
а) головний 24-контактний роз'єм



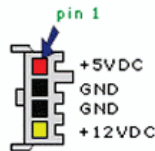
б) головний 20-контактний роз'єм



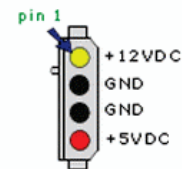
в) роз'єм SATA для підключення жорсткого диска



г) роз'єм для підключення додаткового живлення процесора



д) роз'єм для підключення живлення дисководу



е) роз'єм Molex для підключення живлення різних елементів

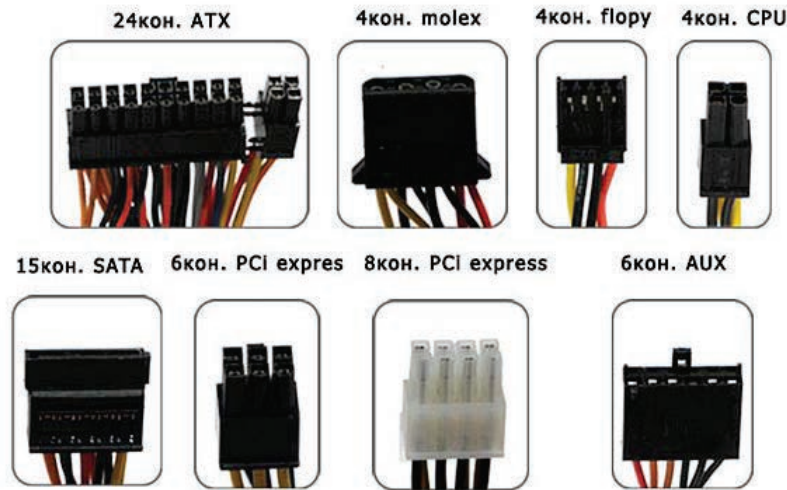
Рис. 1.2.36. Роз'єми на блоці живлення.

Можна помітити, що кожна напруга має свої кольори проводу:

- Жовті кольори – +12 В,
- Червоні кольори – +5 В,
- Помаранчеві кольори – +3,3 В,
- Чорні кольори - спільний або заземлення.

Для інших напруг кольори проводів у кожного виробника можуть змінюватися.

На рисунку не відображені роз'єми додаткового живлення відеокарт, тому що вони подібні роз'ємам додаткового живлення процесора. Також існують інші види роз'ємів, які зустрічаються в комп'ютерах фірмової зборки компаній Dell, Apple і інших.



*Рис. 1.2.37. Інтерфейси для підключення живлення елементів ПК до виходів з блоку живлення.*

### **Електричні параметри та характеристики блоків живлення**

Блок живлення має безліч електричних параметрів, більшість з яких не відзначаються в паспорті. На бічній наклейці блоку живлення відзначається звичайно тільки декілька основних параметрів – робочі напруга та потужність.

#### ***Потужність блоку живлення***

Потужність часто позначають на етикетці великим шрифтом. Потужність блоку живлення, характеризує, скільки він може віддати електричної енергії приладам, що підключаються до нього, (материнська плата, відеокарта, жорсткий диск і ін.).

По ідеї, достатньо сумувати споживання використовуваних компонентів і вибрати блок живлення трохи більшої потужності для запасу.

Але насправді все трохи складніше, тому що блок живлення видає різні напруги – 12 В, 5 В, -12 В, 3,3 В і ін. Кожна лінія напруги розрахована на свою потужність. Логічно було подумати, що ця потужність фіксована, а сума їх дорівнює потужності блоку живлення. Але в блоці живлення стоїть один трансформатор для генерації всіх цих напруг, використовуваних комп'ютером (крім чергової напруги +5 В). Правда, рідко, але все-таки можна знайти блок живлення з двома роздільними трансформаторами, але такі джерела живлення

дорогі та найчастіше використовуються в серверах. Звичайні ж БЖ АТХ мають один трансформатор. Через це потужність кожної лінії напруг може плавати: збільшується, якщо інші лінії слабо навантажені, і зменшуватися, якщо інші лінії сильно навантажені. Тому часто на блоках живлення пишуть максимальну потужність кожної лінії, і в результаті, якщо їх сумувати, вийде потужність навіть більше, ніж дійсна потужність блоку живлення. Таким чином, виробник може заплутати споживача, наприклад, заявляючи занадто велику номінальну потужність, що БЖ забезпечити не здатний.

Відзначимо, якщо в комп'ютері встановлений блок живлення недостатньої потужності, то це викличе збої в роботі пристроїв («зависання», перевантаження, клацання головок жорсткого диску), аж до неможливості включення комп'ютера. А якщо в ПК встановлена материнська плата, що не розрахована на потужність компонентів, які на ній встановлені, то найчастіше материнська плата функціонує нормально, але згодом роз'єми підключення живлення вигорають внаслідок постійного їх нагрівання та окислення.

### ***Допустимий максимальний струм лінії***

Хоч це і один з важливих параметрів блоку живлення, найчастіше користувач при покупці не звертає на нього уваги. Але ж при перевищенні припустимого струму на лини блок живлення вимикається, тому що спрацьовує захист. Для її відключення необхідно виключити блок живлення від мережі і почекати деякий час, близько хвилини. Варто врахувати, що зараз всі самі ненажерливі компоненти (процесор, відеокарта) живляться від лінії +12 В, тому більшою мірою треба приділяти увагу значенням зазначеного для неї струму. У якісних БЖ ця інформація, звісно, винесена у вигляді таблички або списку на бічну наклейку.

Джерела живлення, у яких така інформація не зазначена, одразу ж змушують засумніватися у якості виконання та відповідності заявленої потужності реальній.

Інші параметри блоків живлення не регламентуються, але не менш важливі. Визначити ці параметри можливо тільки провівши різні тести з блоком живлення.

### ***Діапазон робочих напруг***

Під діапазоном робочих напруг передбачають інтервал значень сіткової напруги, при якому блок живлення зберігає працездатність і значення своїх паспортних параметрів. Зараз все частіше виробляються блоки живлення з АККП (активний коректор коефіцієнта потужності), який дозволяє розширити діапазон робочих напруг від 110 до 230. Також є блоки живлення з малим робочим діапазоном напруг, наприклад блок живлення компанії FPS FPS400-60THN-P має діапазон від 220 до 240. В результаті цей блок живлення, включений навіть у парі з масовим джерелом безперебійного живлення, буде вимикатися при зменшенні напруги в мережі. Це викликано тим, що звичайний ІБЖ стабілізує вихідну напругу в діапазоні 220 В  $\pm$  5 %. Тобто мінімальна напруга для переходу на батарею складе 209 (а якщо врахувати повільність перемикання реле, то напруга може виявитися ще меншою), що нижче робочої напруги блоку живлення.

### ***Внутрішній опір***

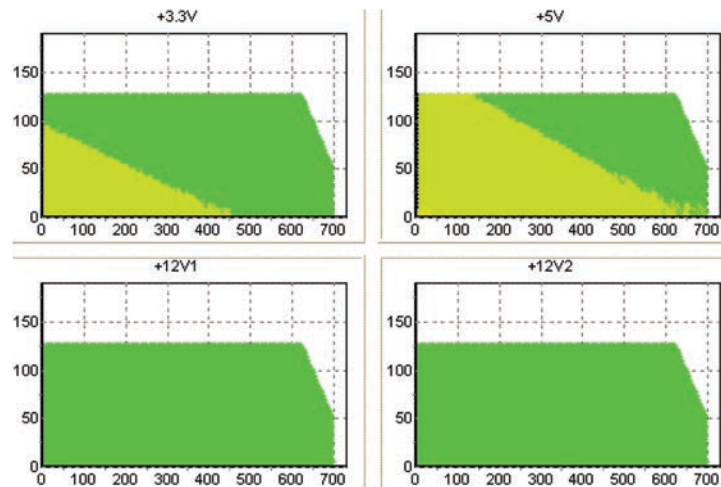
Внутрішній опір характеризує внутрішні втрати блоку живлення при протіканні струму. Внутрішній опір можна розділити на два види: звичайний по постійному струму та диференціальний по змінному струму.



*Рис. 1.2.38. Еквівалентна схема заміщення блоку живлення.*

Опір по постійному струму складається з опорів компонентів, з яких побудований блок живлення: опір проводів, опір обмоток трансформатора, опір проводів дроселя, опір доріжок друкованої плати і ін. Через наявність цього опору з ростом навантаженості блоку живлення напруга спадає. Цей опір можна

побачити, побудувавши крос-навантажувальну характеристику БЖ. Для зменшення цього опору в блоках живлення працюють різні схеми стабілізації.



*Рис. 1.2.39. Крос-навантажувальна характеристика блоку живлення.*

Диференціальний опір характеризує внутрішні втрати блоку живлення при протіканні змінного струму. Це опір ще називається електричним імпедансом. Зменшити цей опір найбільш складно. Для його зменшення в блоці живлення використовується ФНЧ. Для зменшення імпедансу не достатньо встановити в блок живлення конденсатори великої ємності і катушки з великою індуктивністю. Необхідно ще щоб конденсатори мали низький послідовний опір (ESR), а дроселі були виготовлені з товстого проводу. Реалізувати це фізично дуже складно.

### ***Пульсації вихідних напруг***

Блок живлення являє собою перетворювач, що не одноразово перетворює напругу зі змінного в постійну. Внаслідок цього на виході його ліній присутні пульсації. Пульсації являють собою різку зміну напруги протягом короткого проміжку часу. Головна проблема пульсацій в тому, що якщо в схемі або пристрої не стоїть фільтр у ланцюзі живлення або він поганий, то ці пульсації проходять за всією схемою, спотворюючи її робочі характеристики. Це можна побачити, наприклад, якщо викрутити гучність колонок на максимум під час відсутності сигналів на виході звукової карти. Будуть чутні різні шуми. Це і є пульсації, але не обов'язково це шуми блоку живлення. Проте, якщо в роботі звичайного підсилювача від пульсацій великої шкоди немає, збільшиться тільки

рівень шумів, то, наприклад, у цифрових схемах і компараторах вони можуть привести до помилкового перемикання або невірної сприйняття вхідної інформації, що обумовить виникнення помилок або непрацездатність пристрою.

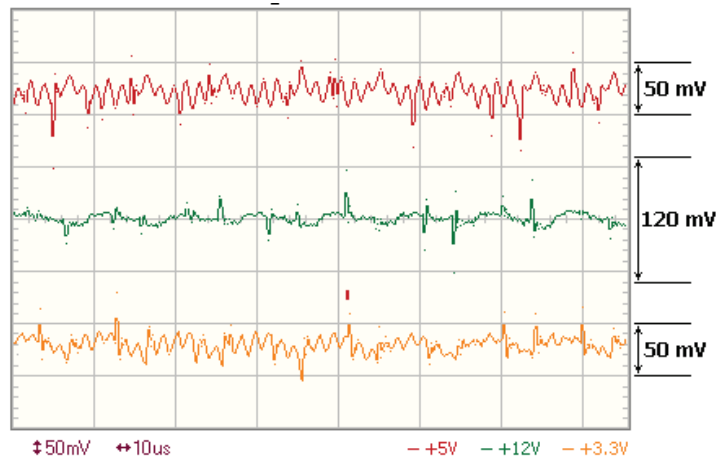


Рис. 1.2.40. Форма вихідних напруг блоку живлення Antec Signature SG-850.

### **Стабільність напруг**

Далі розглянемо таку характеристику як, стабільність напруг, видаваних блоком живлення. В процесі роботи, який ідеальний не був би блок живлення, його напруга змінюється. Збільшення напруги викликає в першу чергу збільшення струмів спокою всіх схем, а також зміну параметрів схем. Так, наприклад, для підсилювача потужності збільшення напруги збільшує його вихідну потужність. Збільшену потужність можуть не витримати деякі електронні деталі та згоріти. Це ж збільшення потужності обумовлює збільшення розсіювання потужності електронними елементами, а, отже, до зростання температури цих елементів. Що приведе до перегріву і /або зміни характеристик.

Зниження напруги навпаки зменшує струм спокою, і також погіршує характеристики схем, наприклад амплітуду вихідного сигналу. При зниженні нижче певного рівня певні схеми перестають працювати. Особливо до цього чутлива електроніка жорстких дисків.

Припустимі відхилення напруги на лініях блоку живлення описані в стандарті АТХ та в середньому не повинні перевищувати  $\pm 5\%$  від номіналу лінії.

Для комплексного відображення розміру осідання напруг використовують крос-навантажувальну характеристику. Це кольорове відображення рівня відхилення напруги обраної лінії при навантаженні двох ліній: обраної та +12 В.

### ***Коефіцієнт корисної дії***

Перейдемо тепер до коефіцієнта корисної дії або скорочено ККД. Зі школи більшість пам'ятають – це відношення корисної роботи до витраченого. ККД показує скільки зі спожитої енергії перетворилося в корисну енергію. Чим вище ККД, тим менше треба платити за електроенергію споживану комп'ютером. Більшість якісних блоків живлення мають схожий ККД, вона варіює в діапазоні не більше 10 %, але ККД блоків живлення з ПККП (PPFC) і АККП (APFC) значно вище.

### ***Коефіцієнт потужності***

Як параметр, на який варто звертати увагу при виборі БЖ, коефіцієнт потужності менш значний, але від нього залежать інші величини. При малому значенні коефіцієнта потужності буде і мале значення ККД. Як було відзначено вище, коректори коефіцієнта потужності приносять безліч покращень. Більший коефіцієнт потужності обумовить зниження струму в мережі.

### ***Неелектричні параметри та характеристики блоків живлення***

Звісно, як і для електричних характеристик, неелектричні параметри в паспорті вказується далеко не всі. Хоча неелектричні параметри блоку живлення також важливі. Перелічимо основні з них:

- діапазон робочих температур;
- надійність блоку живлення (час наробітку на відмову);
- рівень шуму створюваний блоком живлення при роботі;
- частота обертання вентилятора блоку живлення;
- вага блоку живлення;

- довжина живильних кабелів;
- зручність у використанні;
- екологічність блоку живлення;
- відповідність державним і міжнародним стандартам;
- розміри блоку живлення.

Більшість неелектричних параметрів зрозумілі всім користувачам. Однак зупинимося на більш актуальних параметрах. Більшість сучасних блоків живлення працюють тихо, вони мають рівень шуму близько 16 дБ. Хоча навіть у блок живлення з паспортним рівнем шуму 16 дБ може бути встановлений вентилятор з частотою обертання 2000 об/хв. В цьому випадку, при навантаженні блоку живлення близько 80 %, схема керування швидкістю обертання вентилятора включить його на максимальні оберти, що призведе до появи значного шуму, іноді більше ніж 30 дБ.

Також необхідно приділяти увагу зручності та ергономії блоку живлення. Використання модульного підключення кабелів живлення має багато переваг. Це і більш зручне підключення пристроїв, менше зайнятого простору в корпусі комп'ютера, що в свою чергу не тільки зручно, але поліпшує охолодження компонентів комп'ютера.

### **Стандарти та сертифікати**

При покупці БЖ, в першу чергу необхідно подивитися на наявність сертифікатів і на відповідність його сучасним міжнародним стандартам. На блоках живлення найчастіше можна зустріти вказівку наступних стандартів:

- RoHS, WEEE – не містить шкідливих речовин;
- UL, cUL – сертифікат на відповідність своїм технічним характеристикам, а також вимогам безпеки для вбудованих електроприладів;
- CE – сертифікат який показує, що блок живлення відповідає найсуворішим вимогам директив європейського комітету;
- ISO – міжнародний сертифікат якості;

- CB – міжнародний сертифікат відповідності своїм технічним характеристикам;
- FCC – відповідність нормам електромагнітних наведень (EMI) і радіонаведень (RFI), що генеруються блоком живлення;
- TUV – сертифікат відповідності вимогам міжнародного стандарту EN ISO 9001:2000;
- CCC – сертифікат Китаю відповідності безпеки, електромагнітним параметрам і захисту навколишнього середовища.

Також є комп'ютерні стандарти форм-фактору ATX, у якому визначені розміри, конструкція та багато інших параметрів блоку живлення, включаючи припустимі відхилення напруг при навантаженні. Сьогодні існують декілька версій стандарту ATX:

- ATX 1.3 Standard;
- ATX 2.0 Standard;
- ATX 2.2 Standard;
- ATX 2.3 Standard.

Відмінність версій стандартів ATX в основному стосується введення нових роз'ємів і нових вимог до ліній живлення блоку живлення.

### **Рекомендації з вибору блока живлення**

Ще до недавня вважалося, що блоку живлення потужністю 350 W вистачить для живлення будь-якого, самого потужного домашнього комп'ютера. Бери БЖ потужніший від відомого виробника, і можеш хоч обвішати різними девайсами - нічого рахувати не потрібно.

Але божевільна гонка за мегагерцями і fps'ами вносить свої корективи: на ринку з'явилися нові відеоадаптери від nVidia та ATI і користувачу вже рекомендують запастися БЖ потужністю 700 W! Закономірно виникає питання: Без заміни блоку живлення апгрейд тепер неможливий?

Відповісти на це питання не так складно - треба поррахувати потужність машини. Вміти обчислити споживану потужність системи корисно і при складанні та апгрейді комп'ютера будь-якої конфігурації.

Отже, якщо необдуманно перевантажити блок живлення, то в кращому випадку він просто не увімкнеться, а в гіршому - згорить.

### **Читаємо характеристики блоку живлення**

Та велика красива цифра, яку вказують у моделі блоку живлення, показує загальну потужність пристрою. Нас же повинні цікавити такі показники, як ефективна навантаження (ККД) та напруження на відмову при певному навантаженні і температурі. Перший показник говорить про те, яку потужність буде споживати навантаження, а яка виділиться вхолосту у вигляді тепла, тобто при заявленій потужності 350 W і ефективній навантаженні 68 % ми отримаємо 240 W. У різних виробників цей показник коливається від 65 % до 85 %. Другий показник дає нам дані про рекомендовані умови роботи БЖ, наприклад, 100000 годин при навантаженні 75 % і температурі 25 градусів Цельсія. Інші показники стосуються значень відхилень по вхідному і вихідному напрузі, захисту від перевантажень, короткого замикання і перегріву і т.д.

Однак є ще один блок характеристик. Справа в тому, що сумарна потужність блоку складається з показників потужності по окремих ланцюгів. Вони зазначені на кришці блоку живлення в спеціальній таблиці. Використовуючи наведену вище формулу, можна розрахувати мінімальну максимальну потужність навантаження по кожному колу. Склавши отримані потужності, отримаємо ефективну потужність БЖ. Потужності по кожному виходу також важливо враховувати, тому що навантаження споживає струм різного напруги і буде навантажувати відповідне коло БЖ.

### **Процесор**

Процесор, напевно, самий ненажерливий елемент у комп'ютері. Не дарма для нього виділили окрему розетку! Потужність, споживана тієї чи іншої моделлю CPU, зазвичай відома, і вказується виробником. Її також можна

розрахувати, помноживши струм, споживаний процесором (зазвичай також вказується) на напругу. Потужність CPU ти можеш подивитися в на сайті виробника.

Складнощі з розрахунком споживаної процесором потужності виникають, якщо CPU розігнано. Потужність збільшується при підвищенні тактової частоти і напруги на ядрі. Якщо підвищення напруги врахувати легко, то коефіцієнт залежності споживаного струму від частоти можна знайти тільки шляхом дослідження. Дуже наближено можна сказати, що при збільшенні частоти на 100 МГц споживана потужність збільшується на 0,6–1,0 W.

### **Відеоадаптер**

Сучасні відеоприскорювач по ненажерливості нітрохи не поступаються процесору. Відеочіп містить значну кількість транзисторів, частоти також високі, та й пам'ять потребує живлення.

Споживана потужність дуже сильно залежить від її стану: знаходиться вона в режимі очікування, використовується в 2D-додатках або обраховує складну 3D-сцену. Точні значення зміни споживаної потужності привести неможливо, однак тести показують, що при завантаженні системи 3D-додатком у високому розрішенні екрану споживана потужність системи може вирости на 80–100 W в порівнянні з незавантажені станом. Особливо хочеться відзначити характеристики hi-end відеоадаптерів. Наприклад, nVidia GeForce GTX295 при пікових навантаженнях споживає до 240 W.

### **Приводи**

Особливістю приводів є наявність механічних частин в конструкції, зокрема електромоторів, які споживають струм з напругою 12 В. Саме в момент позиціонування головок HDD або відкриття лотка CD-приводу відбувається збільшення споживаної енергії. Нам доводилося бути свідками відключення БП з-за спроби відкрити CD-ROM.

Окремо варто згадати CD-RW і DVD драйви. Через підвищену потужності лазерного променя ці приводи споживають трохи більше енергії, однак у порівнянні цифра незначна –  $\sim 15$  W. USB і IEEE 1394.

При гарячому підключенні пристроїв також відбувається стрибок споживаної потужності, і кожен пристрій споживає додаткову енергію. Таким чином, необхідно враховувати живлення тимчасово підключених пристроїв при плануванні запасу потужності блоку живлення.

### **Інші фактори**

При покупці блоку живлення завжди необхідно залишати певний запас потужності. Це пов'язано з можливістю майбутніх апгрейдів і з установкою додаткового обладнання. Також слід враховувати сезонну зміну умов роботи, знос і забруднення БЖ. Наприклад, дуже сильно впливає на роботу блоку пил. Пил є не тільки термоізолятором, який перешкоджає охолодженню, і не тільки перешкодою в роботі вентиляторів, він ще є прекрасним провідником статичної електрики. Так що пил в першу чергу небезпечний для комп'ютера, і при підвищенні споживаної потужності (тобто підвищенні напруги при включенні якого-небудь пристрою) може вийти з ладу будь-який компонент. Аналогічна ситуація і з зносом – він наближає вихід з ладу системи. На що потрібно звернути увагу при купівлі БЖ.

Перш за все, на якість виготовлення. Його можна оцінити навіть на вагу. Більша маса означає, що виробник не заощаджує на хороших масивних радіаторах і трансформаторах із запасом потужності, і навіть на силових елементах конструкції корпусу БЖ.

Також потужні блоки живлення оснащуються великим числом (від 7 і вище) якісних роз'ємів для підключення різних внутрішніх пристроїв.

Якщо є можливість, то бажано перевірити стабільність вихідної напруги в роботі. Для цього є різні утиліти, які дозволяють спостерігати і записують характеристики живлення в реальному часі. Зазвичай вони йдуть в комплекті з програмним забезпеченням до материнської плати.

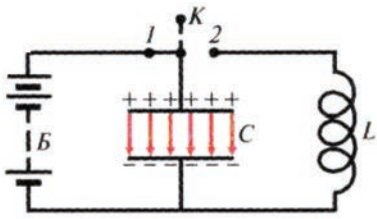
Отже, розраховувати споживану потужність навантаження і реальну вихідну потужність блоку живлення при прийнятті рішень про покупку нового девайса або апгрейду просто необхідно.

### 1.3. Електромагнітні коливання і хвилі

#### Електромагнітні коливання

Розглянемо електричний контур, що має конденсатор з ємністю  $C$  та соленоїд з індуктивністю  $L$  (рис. 1.3.1). Припустимо, що ми зарядили конденсатор при розімкненому контурі. Між пластинами конденсатора виникає електричне поле  $E$ , з енергією:

$$W_e = \frac{1}{2} \varepsilon_0 E^2. \quad (1.3.1)$$



Замкнемо контур. Конденсатор почне розряджатися, а його електричне поле буде зменшуватися.

Одночасно в контурі виникає електричний струм завдяки розряду конденсатора, а в соленоїді виникає магнітне поле. Через деякий час, що дорівнює четвертій частці періоду коливань, конденсатор розряджається повністю й електричне поле зникає, а магнітне поле досягає максимуму. При цьому енергія електричного поля (1.3.1) переходить в енергію магнітного поля:

$$W_e = \frac{1}{2\mu_0} B^2. \quad (1.3.2)$$

У подальший момент часу магнітне поле зменшується, що породжує струм самоіндукції, який спрямований у тому ж напрямку, що і струм розряду конденсатора. Таким чином, конденсатор перезаряджається і між пластинами з'являється електричне поле протилежного напрямку. За час, що дорівнює половині періоду коливань, магнітне поле зникає зовсім, електричне поле досягає максимального значення, при цьому енергія магнітного поля перетворюється в енергію електричного поля. Процес розрядження конденсатора повторюється нескінченно, а з ним і коливання заряду та струму в контурі (за умови, що опір провідників дорівнює нулю).

Виведемо рівняння вільних коливань в електричному контурі. Згідно з законом збереження енергії (другий закон Кірхгофа) сума спадів напруги в контурі дорівнює сумі ЕРС. Спад напруги на конденсаторі:

$$U_C = \frac{q}{C},$$

а ЕРС самоіндукції:  $\varepsilon_c = -L \frac{dI}{dt}$ .

Тоді закон збереження енергії в контурі матиме вигляд:  $\frac{q}{C} = -L \frac{dI}{dt}$ .

Перетворюючи це рівняння відносно заряду  $q$ :  $I = \frac{dq}{dt}$ ,

одержуємо  $L \frac{d^2q}{dt^2} + \frac{q}{C} = 0$ , або

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{q}{LC} = 0. \quad (1.3.3)$$

Вираз

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC},$$

де  $\omega_0$  – частота вільних коливань, а рівняння (1.3.3) збігається з рівнянням гармонічних коливань:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0, \quad (1.3.4)$$

розв'язок якого визначається гармонічною функцією:

$$q = A \cos(\omega_0 t + \varphi). \quad (1.3.5)$$

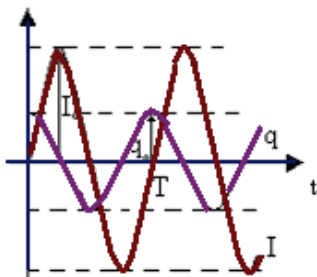
З врахуванням початкових умов:  $q_{t=0} = q$ ;  $I = \left(\frac{dq}{dt}\right)_{t=0} = 0$  розв'язок (1.3.4)

має вигляд:  $q = q_0 \cos \omega_0 t$ ,

де  $q_0$  – амплітуда коливань або повний заряд конденсатора,  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  – власна частота коливань контуру.

Таким чином, заряд в електричному контурі змінюється за гармонічним законом (рис. 1.3.2).

Рис. 1.3.2. Період коливань контуру  $T$  визначається формулою, яка носить назву **формули Томсона**:  
Коливання заряду і струму у контурі.



$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (1.3.6)$$

Напруга на конденсаторі:

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{q_0}{C} \cos \omega_0 t = U_0 \cos \omega_0 t,$$

де  $U_0 = \frac{q_0}{C}$  – амплітуда напруги, яка дорівнює початковій напрузі на конденсаторі.

Сила струму в контурі визначається рівнянням:

$$I = -\frac{dq}{dt} = q_0 \omega_0 \sin \omega_0 t = I_0 \sin \omega_0 t, \quad (1.3.7)$$

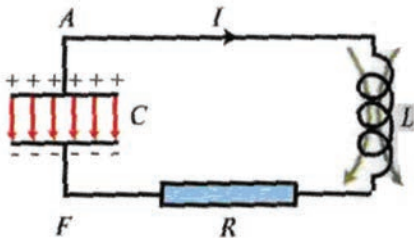
де  $I_0 = q_0 \omega_0$  – амплітуда струму. Знак мінус у рівнянні (1.3.7) означає, що напрямок струму відповідає зменшенню заряду конденсатора.

Оскільки  $\sin(\omega_0 t) = \cos\left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}\right)$ , то коливання струму

$I = I_0 \cos\left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}\right)$  відстають від коливання заряду на  $\frac{\pi}{2}$  (рис. 1.3.2).

### Згасаючі коливання

Описаний вище хід явищ відбувався б за умови, що в контурі немає ніяких



втрат електроенергії, зокрема на нагрівання

провідників. Насправді будь-який реальний

контур має активний електричний опір. Тому

запас електромагнітної енергії, що знаходиться в

контурі, поступово витрачається на подолання

електричного опору, нагрівання, внаслідок чого

вільні коливання згасають. Рівняння згасаючих

електричних коливань в реальному контурі

ALRFCA (рис. 1.3.3) можна одержати із закону

збереження енергії в коливальному контурі:

$$\frac{q^2}{2C} + \frac{LI^2}{2} + I^2 R t = W_e = \text{const},$$

де  $I^2 R t$  – кількість електромагнітної енергії, яка перетворюється на внутрішню енергію контуру за час  $t$ . Це рівняння можна також отримати із закону Ома.

Виявляється, що коли розміри кола невеликі, а електроємність конденсатора та індуктивність соленоїда значні, силу струму в усіх перерізах цього і контуру можна вважати однаковою. Тому миттєве значення  $I$  сили змінного струму в контурі має задовольняти всім законам постійного струму. Такі змінні струми називають **квазістаціонарними**.

Знайдемо залежність сили квазістаціонарного струму від часу для *ALRFCA* кола. Під час розряджання конденсатора в ньому тече електричний струм, який змінюється за рівнянням (рис. 1.3.3).

За законом Ома для неоднорідної ділянки кола:

$$IR = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon, \quad (1.3.8)$$

де  $I$ ,  $\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi$  і  $\varepsilon$  відповідно миттєві значення сили струму в колі, різниці потенціалів між обкладками конденсатора та алгебрична сума ЕРС, що діють на цій ділянці кола. В нашому прикладі виникатиме ЕРС самоіндукції:

$$\varepsilon_{ci} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (1.3.9)$$

Підставивши у формулу (1.3.8) вираз (1.3.9) одержимо:

$$IR = \Delta\varphi - L \frac{dI}{dt}. \quad (1.3.10)$$

Якщо заряд на обкладках конденсатора  $q$ , то струм у колі дорівнюватиме:

$$I = -\frac{dq}{dt}. \quad (1.3.11)$$

Звідки:

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{d^2q}{dt^2}. \quad (1.3.12)$$

Знак «мінус» у формулі (1.3.12) означає, що позитивному напрямку  $I$ , прийнятому при складанні рівняння (1.3.7), відповідає зменшення позитивного заряду на верхній обкладці конденсатора  $\frac{dq}{dt} < 0$ .

Різниця потенціалів між обкладками конденсатора буде  $\Delta\varphi = \frac{q}{C}$ .

Підставивши вирази (1.3.10) – (1.3.12) у рівняння (1.3.9), отримаємо:

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0, \quad (1.3.13)$$

або  $\frac{d^2q}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dq}{dt} + \frac{q}{LC} = 0$ .

За формою воно аналогічне до диференціального рівняння вільних згасаючих механічних коливань тіла підвішеного на пружині:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{r}{m} \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} x = 0, \quad (1.3.14)$$

або  $\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0$ , де  $2\beta = \frac{r}{m}$ ;  $\omega_0^2 = \frac{k}{m}$ .

Позначимо

$$2\beta = \frac{R}{L}; \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC}, \quad (1.3.15)$$

тоді (1.3.13) буде диференціальним рівнянням згасаючих електричних коливань і матиме вигляд:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0. \quad (1.3.16)$$

Знайдемо розв'язок рівняння (1.3.16) методом підстановки нової змінної величини  $z$ :

$$q = ze^{-\beta t}, \quad (1.3.17)$$

де  $z = f(t)$ .

Підставимо вираз (1.3.17) у (1.3.16) і, виконавши перетворення, одержимо:

$$\frac{d^2z}{dt^2} + (\omega_0^2 - \beta^2)z = 0. \quad (1.3.18)$$

Це рівняння для випадку, коли  $(\omega_0^2 - \beta^2) > 0$ , є гармонічним, і його розв'язком може бути функція:

$$z = A \cos(\omega t + \varphi), \quad (1.3.19)$$

де

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (1.3.20)$$

Підставимо  $z$  із формули (1.3.19) у вираз (1.3.17) і знайдемо:

$$q = Ae^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi). \quad (1.3.21)$$

Величину  $A$  визначимо з початкових умов:  $t = 0$ ,  $q = q_0$ .

Тоді  $A = q_0$  – максимальне значення заряду на обкладці конденсатора.

Отже, залежність

$$q = q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.3.22)$$

є розв'язком диференціального рівняння (1.3.16) і описує згасаючі коливання заряду  $q$  на обкладках конденсатора. Величина  $q_0 e^{-\beta t}$  – амплітуда, яка зменшується з часом за експоненціальним законом. Оскільки  $\beta = \frac{R}{2L}$ , згасання коливань буде тим швидшим, чим більше значення  $R$  і менше  $L$ .

Період вільних згасаючих електричних коливань:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}},$$

або:

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \quad (1.3.23)$$

Частота вільних згасаючих коливань:

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}. \quad (1.3.24)$$

Отже, період вільних згасаючих електричних коливань більший за період власних коливань, а частота згасаючих електричних коливань менша за частоту власних коливань контура.

Крім заряду, згасаючі електричні коливання в контурі можна характеризувати ще різницею потенціалів (напругою)  $\Delta\varphi = U$  на обкладках конденсатора або силою струму, який тече у контурі.

Зі співвідношення між зарядом, напругою і ємністю можна записати:

$$U = \frac{q}{C} = \frac{q_0}{C} e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi). \quad (1.3.25)$$

Силу струму знайдемо з означення миттєвої величини сили струму в колі:

$$\begin{aligned} I &= \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt} [q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi)] \\ &= -\beta q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi) - \omega q_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi) = \\ &= q_0 e^{-\beta t} [-\beta \cos(\omega t + \varphi) - \omega \sin(\omega t + \varphi)]. \end{aligned}$$

Помножимо і поділимо праву частину цього рівняння на  $\omega_0 = \sqrt{\omega^2 + \beta^2}$ .

Дістанемо:

$$I = \omega_0 q_0 e^{-\beta t} \left[ -\frac{\beta}{\omega_0} \cos(\omega t + \varphi) - \frac{\omega}{\omega_0} \sin(\omega t + \varphi) \right].$$

Введемо кут  $\theta$ , який визначається умовами  $\cos\theta = -\frac{\beta}{\omega_0}$  і  $\sin\theta = \frac{\omega}{\omega_0}$ .

Тоді можна написати:

$$\begin{aligned} I &= \omega_0 q_0 e^{-\beta t} [\cos\theta \cos(\omega t + \varphi) - \sin\theta \sin(\omega t + \varphi)] = \\ &= \omega_0 q_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi + \theta). \end{aligned} \quad (1.3.26)$$

Оскільки  $\cos\theta < 0$ , а  $\sin\theta > 0$ , то  $\frac{\pi}{2} < \theta < \pi$ . Отже, за наявності в електричному колі активного опору сила струму випереджає по фазі напругу на конденсаторі більш ніж на  $\frac{\pi}{2}$ .

Швидкість згасання електричних коливань, згідно з формулами (1.3.22), (1.3.25) і (1.3.26), характеризується величиною **коефіцієнта згасання**:

$$\beta = \frac{R}{2L}.$$

Замість коефіцієнта згасання часто розглядають **логарифмічний декремент згасання**  $\Delta$ , який дорівнює логарифму відношення амплітуди сили струму в момент часу  $t$  до амплітуди сили струму в момент часу  $t + T$ :

$$\Delta = \ln \frac{q_0 \omega_0 e^{-\beta t}}{q_0 \omega_0 e^{-\beta(t+T)}} = \beta T. \quad (1.3.27)$$

Оскільки період  $T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi\sqrt{LC}$ , а  $\beta = \frac{R}{2L}$ , то:

$$\Delta \approx \pi \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \pi \frac{R}{R_x}. \quad (1.3.28)$$

З виразу (1.3.28) випливає, що логарифмічний декремент згасання вимірюється відношенням активного опору контуру до його хвильового опору, помноженого на  $\pi$ .

На рис. 1.3.4 наведено графіки згасаючих коливань заряду однакового періоду за чотирьох значень логарифмічного декремента затухання.

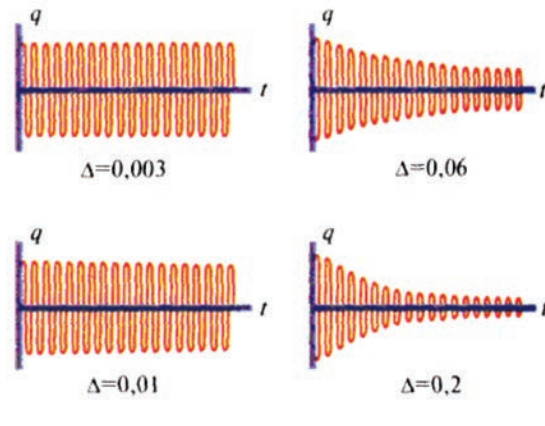


Рис. 1.3.4. Залежність згасаючих коливань заряду однакового періоду від логарифмічного декременту згасання.

Логарифмічний декремент – це величина, обернена до числа коливань, за які амплітуда зменшується в  $e$  разів:

$$\Delta = \frac{1}{N}.$$

Нерідко замість логарифмічного декременту згасання вводять іншу величину, що характеризує згасання, так звану **добротність** коливального контуру:

$$Q = \frac{\pi}{\Delta} = \pi N,$$

яка тим більша, чим менше згасання.

Якщо опір контура досить великий та  $\beta^2 > \omega_0^2$ , тоді коливання вироджуються у аперіодичну залежність.

### Вимушені електричні коливання

Вільні електричні коливання в контурі з часом згасають внаслідок втрат енергії на нагрівання провідників. Для одержання незгасаючих коливань у контур ззовні потрібно підводити енергію, яка б компенсувала енергію на нагрівання контуру. Так, включивши в контур джерело з електрорушійною силою, яка змінюється періодично, можна одержати незгасаючі коливання, тобто коливання з незмінними амплітудами заряду, сили струму і напруги.

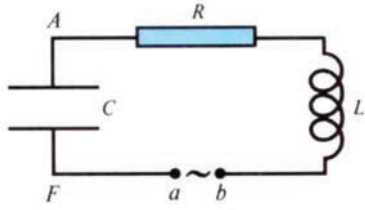


Рис. 1.3.5. Контур, який містить ЕРС.

Нехай коливальний контур складається з ємності  $C$ , індуктивності  $L$  й омичного опору  $R$  і розірваний у деякому місці а до вільних його кінців  $a$  і  $b$  підведені провідники від зовнішнього джерела зі змінною електрорушійною силою  $\varepsilon$  (рис. 1.3.5). Розглянемо випадок, коли вимушуюча електрорушійна сила змінюється в часі за законом синуса:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega' t,$$

де  $\varepsilon_0$  – амплітуда ЕРС;  $\omega'$  – циклічна частота. Для одержання диференціального рівняння вимушених електричних коливань у законі Ома (1.3.7) потрібно замінити  $\varepsilon$  на суму ЕРС, яка викликає коливання, та ЕРС самоіндукції. Після перетворення одержимо:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = -\varepsilon_0 \sin \omega' t, \quad (1.3.29)$$

яке є лінійним неоднорідним рівнянням. Загальний розв'язок неоднорідного диференціального рівняння (1.3.29) дорівнює сумі частинного розв'язку цього рівняння і розв'язку відповідного однорідного рівняння, тобто (1.3.22).

Величина другого члена суми, тобто виразу (1.3.22), містить експоненціальний множник  $e^{-\beta t}$ , тому вона швидко зменшується і через деякий час після початку коливань впливом цього члена можна знехтувати. Частинний розв'язок рівняння (1.3.29) шукатимемо, виходячи з таких міркувань. Оскільки в контурі існує змінна синусоїдальна ЕРС, то, очевидно, і сила струму в контурі буде змінною синусоїдальною ЕРС такої самої частоти, але, можливо, з деякою різницею фаз. Отже, розв'язок рівняння шукатимемо у вигляді:

$$I = -\frac{dq}{dt} = I_0 \sin(\omega' t - \varphi). \quad (1.3.30)$$

Завдання полягає в знаходженні таких значень **амплітуди сили струму  $I_0$**  початкової фази, щоб вираз (1.3.30) перетворював рівняння (1.3.29) на тотожність.

З рівняння (1.3.29) знайдемо:

$$\frac{dq}{dt} = -I_0 \sin(\omega' t - \varphi); \quad (a)$$

$$\frac{d^2 q}{dt^2} = -I_0 \omega' \cos(\omega' t - \varphi) = -I_0 \omega' \sin\left(\omega' t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right); \quad (б)$$

$$q = \int -I_0 \sin(\omega' t - \varphi) = -\frac{I_0}{\omega'} [-\cos(\omega' t - \varphi)] = -\frac{I_0}{\omega'} \sin\left(\omega' t - \varphi - \frac{\pi}{2}\right). \quad (в)$$

Підставивши одержані значення (а), (б), (в) у рівняння (1.3.29), отримаємо:

$$LI_0 \omega' \sin\left(\omega' t - \varphi + \frac{\pi}{2}\right) + I_0 R \sin(\omega' t - \varphi) + \frac{I_0}{\omega' C} \sin\left(\omega' t - \varphi - \frac{\pi}{2}\right) = \varepsilon_0 \sin \omega' t \quad (1.3.31)$$

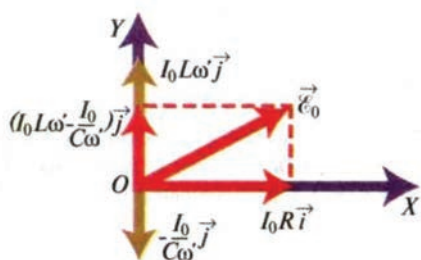


Рис. 1.3.6. Векторна діаграма

амплітудних значень напруг.

Тотожність (1.3.31) можна розглядати як проекцію векторної суми амплітуд напруг, що діють на ділянках контура, на довільно вибрану координатну вісь, наприклад  $OX$ . Так,  $I_0 R$  за змістом виражає амплітудне значення напруги на омичному опорі; аналогічно  $I_0 L \omega'$  – амплітудне значення

напруги на індуктивності, де  $X_L = L \omega'$  – величина індуктивного опору;  $I_0 \frac{1}{\omega' C}$  – амплітудне значення напруги на ємності  $C$ , де  $X_c = \frac{1}{\omega' C}$  – величина ємнісного опору. Побудуємо в прямокутній системі координат  $XOY$  вектори, які відповідають амплітудним значенням зазначених напруг. Їх векторна сума дорівнюватиме вектору амплітудного значення вимушуючої ЕРС  $\varepsilon_0$ . На горизонтальній осі  $OX$  відкладаємо вектор завдовжки  $I_0 R$ , тоді вектор завдовжки  $I_0 L \omega'$  буде напрямлений вздовж осі  $OY$  вгору, а вектор завдовжки  $I_0 \frac{1}{\omega' C}$  по осі  $OY$  – вниз (рис. 1.3.6).

З рисунка випливає, що:

$$I_0 R \cos \varphi = \varepsilon_0 \cos \varphi, \quad (1.3.32)$$

$$I_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{R^2 + \left(L \omega' - \frac{1}{\omega' C}\right)^2}} = \frac{\varepsilon_0}{Z}, \quad (1.3.33)$$

де

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega' - \frac{1}{\omega'C}\right)^2}. \quad (1.3.34)$$

Формула (1.3.33), що виражає залежність амплітуди  $I_0$  змінного струму в контурі від амплітуди  $\varepsilon_0$  вимушуючої ЕРС, аналогічна закону Ома для замкненого кола постійного струму. Тому величину  $Z$  називають **повним опором** коливального контуру (кола змінного струму), а величину

$$x = L\omega' - \frac{1}{\omega'C} = X_L - X_C \quad (1.3.35)$$

називають **реактивним опором**.

Амплітуда сили струму в контурі, згідно з виразом (1.3.33), залежить не

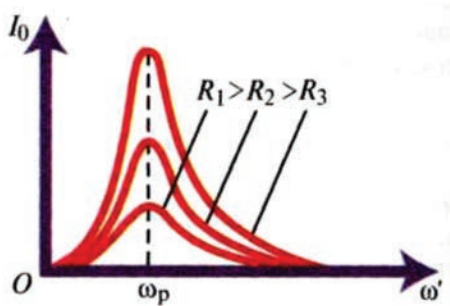


Рис. 1.3.7. Графік залежності амплітуди  $I_0$  сили струму від частоти.

лише від параметрів контуру  $R$ ,  $Z$ ,  $C$  та амплітуди  $\varepsilon_0$  вимушуючої ЕРС, а й від циклічної частоти  $\omega'$ . На рис. 1.3.7 наведено графіки залежності амплітуди  $I_0$  сили струму від частоти за сталих  $R$ ,  $L$ ,  $C$  і  $\varepsilon_0$ . Незалежно від величини  $R$  активного опору амплітуда сили струму в контурі досягає максимального значення тоді, коли реактивний опір дорівнює нулю. Частоту, за якої значення  $I_0$  максимальне, називають резонансною

частотою. Величину резонансної частоти визначають з умови:  $L\omega_p - \frac{1}{\omega_p C} = 0$ ,

звідки  $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ .

Отже, резонансна частота збігається з власною частотою контура  $\omega_0$ .

Явище різкого зростання амплітуди сили струму в коливальному контурі у разі наближення циклічної частоти змушувальної ЕРС до значення  $\omega_p$  називають **явищем резонансу**, а криву залежності  $I_0$  від  $\omega'$  — **резонансною кривою**.

### Змінний струм. Опір у колі змінного струму

Розглянемо частинний випадок, коли генератор змінного струму замкнений на опір  $R$  (рис. 1.3.8). Струм визначається формулою  $I = I_0 \sin \omega t$ . Тоді спад напруги на опорі дорівнює:

$$U_R = IR = I_0 R \sin \omega t. \quad (1.3.36)$$

Максимальна напруга (амплітудне значення) дорівнює:

$$U_R^0 = I_0 R, \quad (1.3.37)$$

а зміна напруги перебуває у фазі зі зміною струму (рис. 1.3.9).

Використовуючи метод векторних діаграм, оберемо напрямок вектора струму за вісь відліку. Тоді вектор коливання напруги  $U_R$  буде спрямований за віссю струмів, тому що різниця фаз між струмом та напругою  $U_R$  дорівнює нулю (рис. 1.3.10).

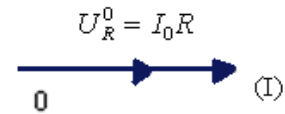
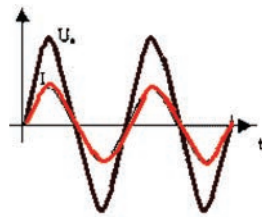
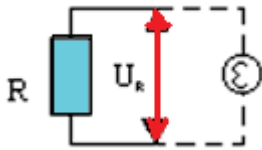


Рис. 1.3.8. Опір у колі змінного струму

Рис. 1.3.9. Коливання струму і напруги на опорі

Рис. 1.3.10. Векторна діаграма напруги на опорі

### Ємність у колі змінного струму

Розглянемо напругу на конденсаторі, який знаходиться в колі, що має ЕРС (рис. 1.3.11).

Струм у колі визначається законом  $I = I_0 \sin \omega t$ . Спад напруги на конденсаторі дорівнює  $U = \frac{q}{C}$ .

Зважаючи на те, що струм дорівнює зміні заряду:  $I = \frac{dq}{dt}$ , то заряд на конденсаторі визначається через силу струму:

$$q = \int I dt = I_0 \int \sin \omega t dt = -\frac{I_0}{\omega} \cos \omega t.$$

Отже, спад напруги:

$$U_C = -\frac{I_0}{\omega C} \cos \omega t = \frac{I_0}{\omega C} \sin(\omega t - \pi/2).$$

Порівнюючи з законом зміни струму  $I = I_0 \sin \omega t$ , бачимо, що коливання напруги на конденсаторі відбувається за законом синуса, але фаза відстає на  $\pi/2$  від коливання сили струму (рис. 1.3.12).

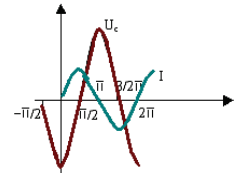
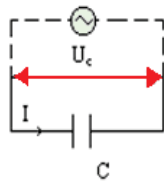
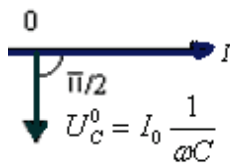


Рис. 1.3.11. Конденсатор у колі змінного струму.

Рис. 1.3.12. Коливання струму у колі і напруги на конденсаторі.

Амплітуда напруги на конденсаторі дорівнює:



$$U_C^0 = I_0 \frac{1}{\omega C} = I_0 R_C, \quad (1.3.38)$$

де величина

$$R_C = \frac{1}{\omega C} \quad (1.3.39)$$

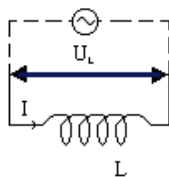
Рис. 1.3.13.

Векторна діаграма напруги на ємності.

відіграє роль опору на ділянці кола з ємністю  $C$ .

Векторна діаграма коливання напруги на конденсаторі зображена на рис. 1.3.13.

### Індуктивність у колі змінного струму



Розглянемо ділянку кола, яка має індуктивність  $L$  (рис. 1.3.14). Спад напруги на індуктивності дорівнює  $U_L = -\varepsilon = L \frac{dI}{dt}$ .

Рис. 1.3.14. Індуктивність у колі змінного струму.

Якщо сила струму у колі змінюється за законом  $I = I_0 \sin \omega t$ , тоді

$$U_L = I_0 \omega L \cos \omega t = I_0 \omega L \sin(\omega t + \pi/2).$$

Порівнюючи цей вираз з законом зміни струму, бачимо, що фаза коливання напруги на індуктивності випереджає фазу коливання струму на  $\pi/2$ , а коливання напруги на ємності – на  $\pi$  (рис. 1.3.15).

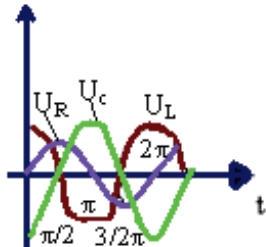


Рис. 1.3.15. Коливання  $U_C$ ,  $U_L$ ,  $U_R$ .

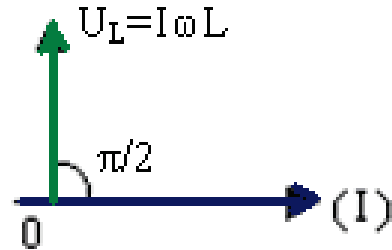


Рис. 1.3.16. Векторна діаграма напруги на індуктивності.

Амплітуда напруги на індуктивності дорівнює:

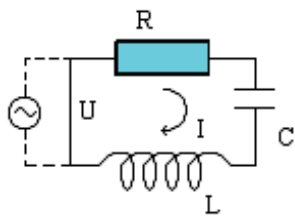
$$U_L^0 = I_0 \omega L, \quad (1.3.40)$$

де

$$R_L = \omega L \quad (1.3.41)$$

називається умовним *опором індуктивності*. Векторна діаграма напруги і струму на індуктивності зображена на рис. 1.3.16.

### Закон Ома у колі змінного струму



Розглянемо електричне коло, що включає опір, ємність та індуктивність (рис. 1.3.17), які з'єднані послідовно.

Нехай струм у колі змінюється за законом:

$$I = I_0 \sin \omega t,$$

тоді знайдемо повну напругу електричного кола.

Шукана напруга  $U$  дорівнює сумі трьох напруг:

$$U = U_C + U_R + U_L.$$

Використовуючи векторну діаграму (рис. 1.3.18)

Рис. 1.3.17. Послідовне коло, включає опір, ємність та індуктивність.

додамо усі три коливання. Різниця амплітуд напруги на ємності та індуктивності називається реактивною складовою напруги

$$U_p^0 = U_L^0 - U_C^0,$$

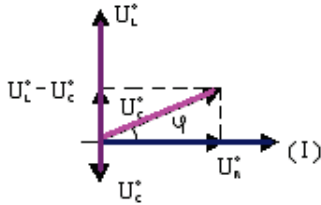


Рис. 1.3.18. Векторна діаграма напруги для послідовного кола.

тоді як напруга  $U_R^0$  називається активною складовою.

Для повної напруги  $U_0$  з рис. 1.3.18 одержуємо:

$$U_0 = I_0 \sqrt{R^2 + \left( \omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}.$$

Ця формула називається **законом Ома для змінного струму**. Він визначає тільки амплітуду напруги, а не миттєве значення напруги.

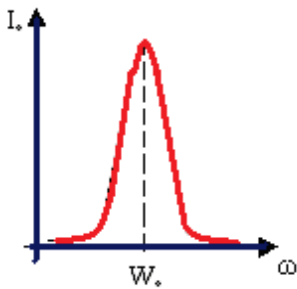


Рис. 1.3.19. Резонансна крива при резонансі напруг.

$$X = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0,$$

звідки

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} = \omega_0^2, \quad (1.3.42)$$

що визначає умову **резонансу напруги**, при якій реактивна напруга:

$$U_p = U_L^0 - U_C^0 = 0$$

дорівнює нулю, або амплітуди коливання на ємності та індуктивності дорівнюють одна одній, а різниця фаз їх дорівнює  $\square$ . Тобто, в умовах резонансу електричне коло має тільки активний опір. Такий резонанс називають резонансом напруги (рис. 1.3.19).

У зовнішньому колі виникають вимушені електричні коливання заряду – змінний синусоїдальний струм. Фаза, в якій коливається значення сили струму не збігається з фазою коливань ЕРС  $\varepsilon$  та напруги  $U$ ; між ними буде різниця фаз  $\varphi$ :

$$I = I_m \sin(\omega t \pm \varphi), \quad (1.3.43)$$

де

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{R}.$$

Величина цієї різниці фаз  $\varphi$  залежить від параметрів кола (значень активного опору, індуктивності та ємності).

**Діюче значення змінного синусоїдального струму** – це значення такої сили постійного струму, при якому виділилося б стільки ж енергії (теплової) на певній ділянці, як і при даному змінному струмі. Діючі значення сили та напруги змінного струму, відповідно, рівні:

$$I_d = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad (1.3.44)$$

$$U_d = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad (1.3.45)$$

де  $I_d$ ,  $U_d$  – діючі значення сили струму та напруги, а  $I_m$  та  $U_m$  – амплітудні значення.

У промислових колах змінного струму його частота – 50 Гц ( $\nu = 50$  Гц), значить циклічна частота рівна:

$$\omega = 2\pi\nu = 100\pi \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

### Випрямлення змінного струму

При однонапівперіодному випрямленні споживач і діод з'єднуються послідовно (рис. 1.3.20.а). При цьому струм на споживачі змінний, пульсуючий, розривчастий (діод пропускає струм тільки півперіоду кожного з коливань напруги).

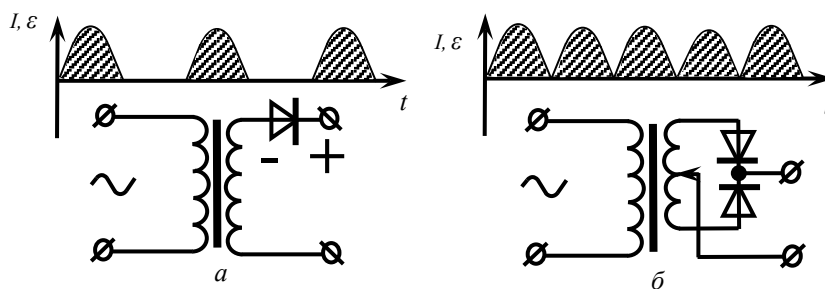


Рис. 1.3.20. Випрямлячі змінного струму.

При двонапівперіодному випрямленні (рис. 1.3.20.б), струм на споживачі змінний, пульсуючий (кожні півперіоди коливань працює один із діодів, залежно від полярності напруги).

При отриманні струму високої частоти біля осі провідника індукується електричне поле, яке направлене у сторону, протилежну до основного поля (правило Ленца), та послаблює струм до нуля. Струм високої частоти протікає практично тільки по поверхні провідника. Це називається поверхневим ефектом або **скін-ефектом**.

### **Взаємне перетворення електричного і магнітного поля. Теорія Максвелла**

Між електричними і магнітними полями існує глибокий внутрішній зв'язок, пов'язаний з можливістю перетворення цих полів одне в одне. Будь-яка зміна магнітного поля завжди супроводжується появою електричного поля та, навпаки, зміна електричного поля спричиняє появу магнітного поля. Це взаємне перетворення електричного і магнітного полів було відкрито на початку другої половини дев'ятнадцятого століття Джеймсом Максвеллом.

Перші догадки про існування електромагнітного поля належать М. Фарадею. Простір, що бере участь у передачі електричної дії, Фарадей назвав електричним полем, яке пронизано потоками електричних і магнітних сил – силовими лініями. Фарадей вважав, що поняття про силові лінії повинно розкрити загадку природи взаємодії магнетизму і електрики.

Максвелл дійшов висновку, що природа ЕРС індукції пов'язана з виникненням вихрового електричного поля (рис. 1.3.21), а електричне коло необхідне тільки як прилад для виявлення цього поля. Таким чином, будь-яка зміна магнітного поля приводить до появи вихрового електричного поля – це перше основне положення теорії Максвелла.

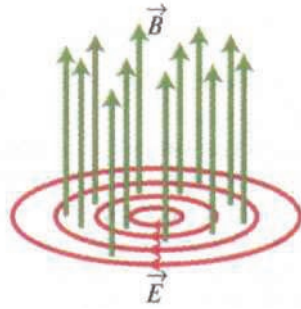


Рис. 1.3.21. Поява вихрового електричного поля у змінному магнітному полі.

Цей закон має вигляд закону електромагнітної індукції:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.3.46)$$

Враховуючи, що ЕРС дорівнює інтегралу  $\varepsilon = \oint_l E dl$ , де  $E$  – напруженість вихрового електричного поля, а  $\Phi$  – потік магнітної індукції; маємо:

$$\Phi = \oint_S B_n dS.$$

Отже, основне рівняння електромагнітної індукції (1.3.48) буде:

$$\oint_l E dl = - \frac{d}{dt} \oint_S B_n dS. \quad (1.3.47)$$

Це одне з основних рівнянь Максвелла.

З рівності (1.3.48) випливає *теорема Стокса*: циркуляція змінного вектора  $\vec{a}$  по довільній замкненій кривій  $L$  дорівнює потоку ротора цього вектора через поверхню  $S$ , що спирається на контур  $L$ :

$$\oint_L \vec{a} d\vec{l} = \int_S \text{rot} \vec{a} d\vec{s}. \quad (1.3.48)$$

Застосуємо теорему Стокса до електричного поля, тоді вираз (1.3.47) набуває вигляду:

$$\int_S \text{rot} \vec{E} d\vec{s} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{s}. \quad (1.3.49)$$

В останній рівності змінений порядок диференціювання та інтегрування в правій частині через те, що ці операції виконуються відносно незалежних змінних, похідна від вектора індукції береться як частинна через те, що індукція є функцією не тільки часу, а й координат.

З рівності (1.3.51) випливає математичний вираз першого рівняння Максвелла в диференціальній формі:

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (1.3.50)$$

Рівності (1.3.52) можна надати іншого вигляду з використанням "набла"-оператора:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}. \quad (1.3.51)$$

В інтегральному виді перше рівняння Максвелла записується як:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}. \quad (1.3.52)$$

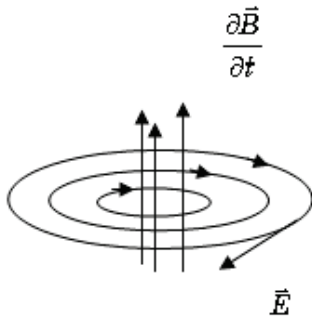


Рис. 1.3.22. Вихрове електричне поле.

Фізична сутність першого рівняння Максвелла в тому, що *змінне в часі магнітне поле породжує вихрове електричне поле* (рис. 1.3.22).

Ще в роботах Ерстеда і Ампера було встановлено, що магнітне поле виникає навколо провідника, по якому проходить електричний струм. У гіпотезі Максвелла стверджувалося, що магнітне поле виникає і за відсутності струму провідності: якщо електричне поле змінюється у часі, то повинно існувати і зворотне явище –

будь-яка зміна електричного поля повинна викликати появу вихрового магнітного поля. Це друге основне положення теорії Максвелла:

$$\oint_l B dl = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \oint_S E_n dS. \quad (1.3.53)$$

Тим самим Максвелл стверджував, що існує явище, зворотне до явища електромагнітної індукції, а його роботи фактично продовжили дослідження Фарадея. Свою роль у розвитку вчення Фарадея Максвелл оцінював надзвичайно скромно: «Я лише втілював ідеї Фарадея у математичну форму».

### Рівняння Максвелла

Повна система рівнянь Максвелла у вакуумі має вигляд:

$$\begin{aligned}\oint_S E_n dS &= \frac{q}{\varepsilon_0}; \\ \oint_S B_n dS &= 0; \\ \oint_l E dl &= -\frac{d\Phi_B}{dt}; \\ \oint_l B dl &= \mu_0 J_{\text{пр}} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{d\Phi_E}{dt},\end{aligned}\tag{1.3.54}$$

де  $\Phi_B, \Phi_E$  – потоки полів  $B$  та  $E$  відповідно.

Система рівнянь Максвелла у середовищі має вигляд:

$$\begin{aligned}\oint_S D_n dS &= q; \\ \oint_S B_n dS &= 0; \\ \oint E dl &= -\frac{d\Phi_B}{dt}; \\ \oint H dl &= J + \frac{d\Phi_B}{dt},\end{aligned}\tag{1.3.55}$$

де  $q$  – вільні заряди,  $J$  – струм електропровідності,  $\Phi_B$  – потік вектора електричної індукції:

$$\Phi_B = \oint_S D_n dS,$$

де  $D$  – електрична індукція,  $H$  – напруженість магнітного поля.

Між полями  $B, H$  та  $E, D$  існує зв'язок:

$$B = \mu \mu_0 H, \quad D = \varepsilon \varepsilon_0 E,\tag{1.3.56}$$

де  $\mu$  та  $\varepsilon$  – магнітна та діелектрична проникність речовини.

Рівняння Максвелла в диференціальній формі можна записати, якщо перейти до дивергенції вектора поля  $\frac{1}{\Delta V} \oint_S E_n dS \Rightarrow \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \text{div} E$  та ротора вектора поля  $\frac{1}{\Delta S} \oint_l E dl \Rightarrow \vec{\nabla} \times \vec{E} = \text{rot} E$ , де  $\vec{\nabla} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$  – оператор «набла». Рівняння Максвелла у диференціальній формі мають вигляд:

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \rho / \varepsilon_0; \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0;\end{aligned}\tag{1.3.57}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{dB}{dt};$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 j_{np} + \varepsilon_0 \mu_0 \frac{dE}{dt},$$

де  $r$  – об’ємна густина вільного заряду,  $j_{np}$  – густина струму електропровідності.

У випадку, коли заряди і струми дорівнюють нулю  $r = 0, j_{np} = 0$ , рівняння Максвелла набувають вигляду:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \vec{E} &= 0, & \vec{\nabla} \vec{B} &= 0, \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{dB}{dt}, & \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \varepsilon_0 \mu_0 \frac{dE}{dt}. \end{aligned}$$

Для поля в середовищі ( $r = 0, j_{np} = 0$ ) рівняння Максвелла мають вигляд:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \vec{D} &= 0, & \vec{\nabla} \vec{B} &= 0, \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{dB}{dt}, & \vec{\nabla} \times \vec{H} &= \frac{dD}{dt}. \end{aligned}$$

Рівняння Максвелла показують, що джерелом електричного поля може бути як електричний заряд, так і магнітне поле. І навпаки, джерелом магнітного поля виступає як електричний струм, так і електричне поле.

Випишемо рівняння Максвелла в інтегральній і диференціальній формі в табл. 1.3.1.

Таблиця. 1.3.1. Р-ня Максвелла в інтегральній та диференціальній формі.

| Інтегральна                                                                                          | Диференціальна                                                       | Диференціальна з використанням $\vec{\nabla}$                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| $\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$                   | $\text{rot} \vec{E} = -\frac{d\vec{B}}{dt}$                          | $\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{dB}{dt}$                |
| $\oint_S B_n dS = 0$                                                                                 | $\text{div} \vec{B} = 0$                                             | $\vec{\nabla} \vec{B} = 0$                                    |
| $\oint_l \vec{H} dl = \int_s \vec{j} d\vec{S} + \frac{\partial}{\partial t} \int_s \vec{D} d\vec{S}$ | $\text{rot} \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ | $\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{d\vec{D}}{dt}$ |

|                                    |                                     |                               |
|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| $\oint_S D_n dS = \oint_S \rho dV$ | $\operatorname{div} \vec{D} = \rho$ | $\vec{\nabla} \vec{D} = \rho$ |
|------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|

Для стаціонарного електростатичного поля  $\frac{d\vec{D}}{dt} = 0$ , для стаціонарного магнітного поля  $\frac{d\vec{B}}{dt} = 0$ , тоді система рівнянь Максвелла розпадається на дві системи:

а) систему рівнянь електростатичного поля:

$$\left. \begin{array}{l} \operatorname{rot} \vec{E} = 0 \\ \operatorname{div} \vec{D} = \rho \end{array} \right\}, \quad (1.3.58)$$

б) систему рівнянь статичного магнітного поля:

$$\left. \begin{array}{l} \operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j} \\ \operatorname{div} \vec{H} = 0 \end{array} \right\}, \quad (1.3.59)$$

фізична сутність яких у тому, що електростатичне поле є полем невихрової природи ( $\operatorname{rot} \vec{E} = 0$ ) і його джерелом є електростатичний заряд ( $\operatorname{div} \vec{D} = \rho$ ), а магнітне поле є вихровим ( $\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}$ ) і його джерелом є струм провідності, а не статичний магнітний заряд ( $\operatorname{div} \vec{H} = 0$ ). Для вакууму, що не містить електростатичного заряду ( $\rho = 0$ ) і струмів провідності ( $\vec{j} = 0$ ) система рівнянь Максвелла в диференціальній формі набуває вигляду:

$$\begin{array}{ll} \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, & \operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0, & \operatorname{div} \vec{D} = 0. \end{array}$$

Перепишемо ці рівняння з врахуванням того факту, що  $B = \mu\mu_0 H$ ,  $D = \varepsilon\varepsilon_0 E$ , і для вакууму  $\mu = 1$ ,  $\varepsilon = 1$ :

$$\begin{array}{ll} \operatorname{rot} \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, & \operatorname{rot} \vec{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \\ \operatorname{div} \vec{E} = 0, & \operatorname{div} \vec{H} = 0. \end{array}$$

Ця система рівнянь свідчить, що джерелом вихрового електричного поля у вакуумі є змінне в часі магнітне поле ( $\operatorname{rot} \vec{E} = -\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$ ,  $\operatorname{div} \vec{E} = 0$ ) джерелом вихрового магнітного поля у вакуумі є змінне в часі вихрове електричне поле

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \operatorname{div} \vec{H} = 0.$$

## Електромагнітні хвилі

За електромагнітною теорією Максвелла **електромагнітні хвилі (ЕМХ)** – це процес розповсюдження взаємопов'язаних змінних електричного та магнітного полів у просторі від джерела хвилі. Найпростішим джерелом ЕМХ може бути  $LC$ -контур, обкладки конденсатора якого розсунули так, щоб якомога більша енергія поля конденсатора випромінювалась у простір. Такий  $LC$ -контур на відміну від закритого  $LC$ -контура (в ньому вся енергія поля сконцентрована між обкладками конденсатора) називають *відкритим*. **Відкритий коливальний контур** – це і є найпростіша передавальна антена. За теорією Максвелла змінне електричне поле породжує змінне магнітне поле, а змінне магнітне, в свою чергу, породжує змінне електричне поле. Силкові лінії цих змінних полів є замкненими, тобто ці поля – вихрові. Створюється своєрідний нерозривний ланцюжок електричних та магнітних полів (єдине електромагнітне поле), що поширюється в просторі.

Важливою особливістю ЕМХ є те, що така хвиля на відміну від пружних може розповсюджуватись і в вакуумі.

Відомо, що як і в випадку механічних (пружних) хвиль, рівняння хвилі записують, виходячи з таких міркувань. Якщо визначається положення джерела  $y = 0$ ; а відстань до довільної точки простору за  $y$ , то закон коливань цієї довільної точки буде:

$$x = x_m \sin \omega (t - \Delta t), \quad (1.3.60)$$

де  $\Delta t = \frac{y}{v}$  – час, який необхідний для того, щоб хвиля від джерела ( $y = 0$ ) дійшла до точки з координатою  $y$ . Це рівняння ще називають *рівнянням хвилі*:

$$x = x_m \sin \omega \left( t - \frac{y}{v} \right), \quad (1.3.61)$$

де  $x_m$  – миттєве значення величини вектора напруженості електричного та магнітного полів у точці середовища з координатою  $y$  в момент  $t$ ;  $v$  – швидкість розповсюдження коливань у середовищі.

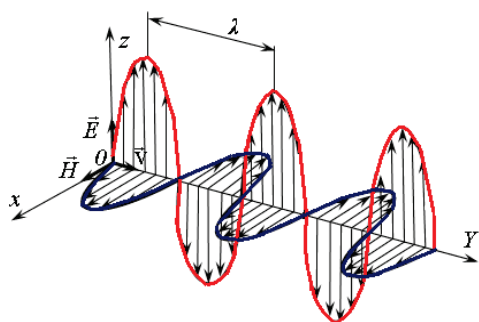
Електромагнітні хвилі є **поперечними**. Це означає, що коливання векторів напруженості електричного та магнітного полів проходять перпендикулярно до

напрямку поширення. Напруженості електричного та магнітного полів змінюються за гармонічним законом у просторі та часі, а їх коливання відбувається у взаємноперпендикулярних площинах. Ці коливання синфазні, тобто максимальні значення  $E_m$  та  $H_m$  досягаються одночасно, як звичайно і нульові значення напруженостей.

Напруженості електричного та магнітного полів змінюються за гармонічним законом у просторі та часі. Рівняння ЕМХ, що поширюється вздовж осі  $y$  (рис. 1.3.23), буде мати вид:

$$\left. \begin{aligned} E_z &= E_m \sin(\omega t - ky) \\ H_x &= H_m \sin(\omega t - ky) \end{aligned} \right\} \quad (1.3.62)$$

де  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;  $\omega = 2\pi\nu$  – хвильове число та циклічна частота, відповідно.



*Рис. 1.3.23. Розподіл величини та напрямку векторів напруженості електричного та магнітного полів у світловій хвилі.*

Графічно «моментальну фотографію» розподілу величини та напрямку векторів напруженості електричного та магнітного полів у ЕМХ можна представити так, як показано на рис. 1.3.23.

За електромагнітною теорією Максвела швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль в ізотропному середовищі становить:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\epsilon_0\mu\mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}, \quad (1.3.63)$$

звідки для вакууму:  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \left(\frac{м}{с}\right)$ .

Цю швидкість часто називають швидкістю світла в вакуумі, хоча треба пам'ятати, що це – швидкість будь-якої електромагнітної хвилі. Важливо зазначити, що це, теоретично отримане Максвелом значення, встановлено раніше, ніж було експериментально виміряне з достатньою точністю, що свідчить про правильність його теорії.

Характеристикою енергії, яку переносить ЕМХ є густина потоку електромагнітного випромінювання – енергія, яку переносить хвиля за одиницю

часу через площадку одиничної площі, яка розміщена перпендикулярно до напрямку розповсюдження хвилі. Отже, одиницею вимірювання цієї величини у СІ буде  $1 \text{ Дж}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ , тобто  $1 \text{ Вт}/\text{м}^2$ . З урахуванням напрямку розповсюдження будемо говорити про вектор густини потоку електромагнітної енергії (**вектор Пойнтінга**). Який характеризує перенесення електромагнітної енергії в напрямку поширення хвилі (вздовж осі  $y$  на рис. 1.3.23):

$$\vec{P} = [\vec{E} \times \vec{H}], \quad (1.3.64)$$

а модуль вектора  $\vec{P}$  дорівнює:

$$P = \left( \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{2} E^2 + \frac{\mu \mu_0}{2} H^2 \right) \cdot v = \omega v, \quad (1.3.65)$$

де  $v$  – модуль швидкості розповсюдження ЕМХ в середовищі;  $\omega$  – об'ємна густина енергії ЕМХ (вимірюється в  $\text{Дж}/\text{м}^3$ ).

Шкала електромагнітних випромінювань наведена в таблиці 1.3.2.

*Таблиця 1.3.2. Шкала електромагнітних випромінювань  
(межа між діапазонами достатньо умовна)*

| Частота, Гц                 | Довжина хвилі, м                    | Назва діапазону                           | Джерела випромінювань                                                                                                      |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $10^{-3} - 10^3$            | $3 \cdot 10^{11} - 3 \cdot 10^5$    | Низькочастотні хвилі (НЧХ)                | Генератори спеціальних конструкцій, промислові пристрої з частотою 50–60 Гц                                                |
| $10^3 - 10^{12}$            | $3 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^{-4}$    | Радіохвилі (РХ)                           | Генератори РХ, генератори надвисоких частот НВЧ (радіопередавачі, телепередавачі, мобільні телефони, супутниковий зв'язок) |
| $10^{12} - 4 \cdot 10^{14}$ | $3 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-7}$ | Теплове, інфрачервоне випромінювання (ІЧ) | Нагріті тіла, випромінювання молекул                                                                                       |

|                                     |                                                                   |                                          |                                                                                                  |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $4 \cdot 10^{14} - 8 \cdot 10^{14}$ | $8 \cdot 10^{-7} - 4 \cdot 10^{-7}$<br>0,8– 0,4 мкм<br>800–400 нм | Видиме випромінювання (видиме світло)    | Випромінювання атомів при переході електронів з одного енергетичного рівня на інший              |
| $8 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$ | $4 \cdot 10^{-7} - 10^{-9}$                                       | Ультрафіолетове випромінювання (УФ)      | Випромінювання атомів при опромінюванні речовини електронами з енергіями до 20 кеВ               |
| $3 \cdot 10^{17} - 5 \cdot 10^{19}$ | $10^{-9} - 6 \cdot 10^{-12}$                                      | Рентгенівське випромінювання (РВ)        | Рентгенівські трубки: енергетичні переходи, що збуджуються електронами з енергіями більше 20 кеВ |
| $> 5 \cdot 10^{19}$                 | $< 6 \cdot 10^{-12}$                                              | Гамма-випромінювання ( $\gamma$ -кванти) | Розпад тяжких ядер, радіоактивні перетворення                                                    |

### Класифікація радіохвиль і особливості їх поширення

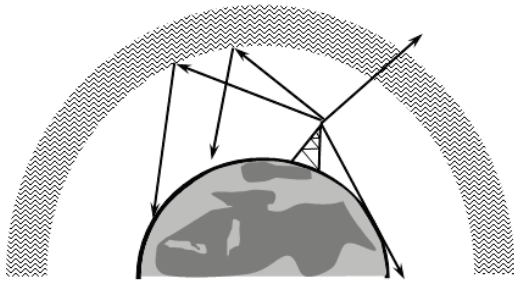
Радіохвилі поділяються на довгі, середні, короткі та ультракороткі:

– *довгі хвилі ДХ* (від 1 до 10 км) зазнають відчутної дифракції біля земної поверхні і притягуються до Землі наведеними ними індукційними струмами в земній корі; поширюються далеко за горизонт; потребують великих потужностей для зв'язку (десятки кіловат);

– *середні хвилі СХ* (від 100 до 1000 м) обумовлюють стійкий радіозв'язок між віддаленими пунктами на земній поверхні поза межами прямої видимості завдяки відбиванню радіохвиль від іоносфери і здатності радіохвиль огинати опуклу земну поверхню (дифракція хвиль); потребують великих потужностей для зв'язку (десятки кіловат);

– *короткі хвилі КХ* (10 – 100 м) – поширюються прямолінійно від передавальної антени (зазнаючи незначної дифракції); відбиваються від іоносфери Землі і повертаються до її поверхні; поширюються далеко за горизонт; потребують потужностей в одиниці кіловат;

– *ультракороткі хвилі УКХ* (менше, ніж 10 м) пронизують іоносферу (космічний зв'язок). Розповсюджуються вздовж поверхні Землі, в зоні прямої видимості. Забезпечують зв'язок тільки в межах прямого бачення, оскільки не відбиваються від іоносфери, а проходять крізь неї. Наприклад, радіостанція, телебачення, мобільний зв'язок.



*Рис. 1.3.24. Розповсюдження різних РХ в атмосфері та поблизу поверхні Землі.*

На рис. 1.3.24 показано схематично розповсюдження різних РХ в атмосфері та поблизу поверхні Землі.

Радіохвилі, що використовуються в радіозв'язку – це ЕМХ хвилі високої (несучої) частоти, модульовані звуковим або телевізійним сигналом.

*Модуляція* – зміна параметрів несучої хвилі за амплітудою або

частотою (амплітудна та частотна модуляція).

*Амплітудна модуляція* – це зміна амплітуди коливань несучої хвилі високої частоти (ВЧ) з частотою низькочастотних коливань звукової частоти (НЧ); здійснюється в передавальному пристрої (рис. 1.3.25.а).

*Частотна модуляція* – це вид модуляції, за якого інформаційний сигнал керує частотою несучого коливання.

*Демодуляція* – процес, обернений модуляції; здійснюється в приймальному пристрої (рис. 1.3.25.б). В приймачі радіосигналу з високочастотного сигналу шляхом детектування виділяють коливання звукової частоти, тобто низькочастотний сигнал, який людина сприймає вухом.

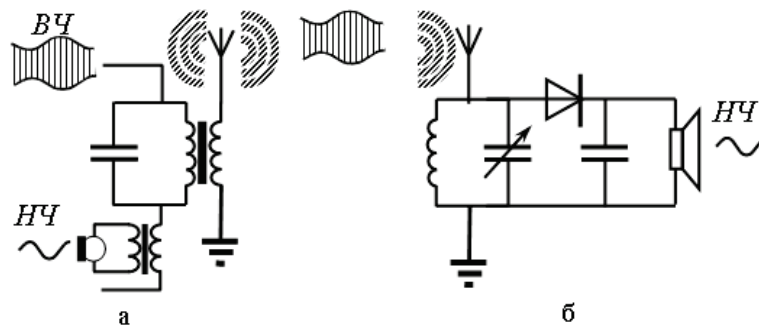


Рис. 1.3.25. а) Амплітудна модуляція; б) Демодуляція.

### Доступ в Інтернет

Доступ в Інтернет здійснюється через провайдера(постачальника) послуг (ISP) – організації, що є власником чи орендарем якоїсь частини Мережі і уклала міжмережеві угоди з власником (-ками) сусідніх мереж.

В найпростішому випадку фізичне з'єднання двох віддалених комп'ютерів здійснюється за допомогою модемів (вони під'єднуються до кожного з комп'ютерів через послідовний порт), сполучених між собою двохжильним кабелем на зразок телефонного. В модем з комп'ютера передається цифровий сигнал, там він перетворюється в аналоговий, а в модемі-приймачі знову перетворюється в цифровий і поступає в комп'ютер-приймач. Таке перетворення інформації необхідне для забезпечення неспотворення передачі інформації. Проте такий тип з'єднання підходить при відносно невеликій швидкості передачі (~ до 265 Кбіт/с).

Для більш швидких з'єднань замість простого телефонного кабелю застосовують спеціальні кабелі або прийомо-передаючі антени, використовуючи при цьому і спеціальні модеми.

### Комутована лінія

Комутована лінія – це спосіб підключення до інтернету, який використовує телефонну мережу для встановлення з'єднання між користувачем і провайдером через модем. При такому підключенні з'єднання створюється лише під час

активного використання інтернету, що означає, що коли користувач не онлайн, лінія вільна для інших абонентів. Це може бути вигідним для тих, хто використовує інтернет рідко або на короткий час. Проте, комутовані лінії зазвичай мають значно нижчу швидкість передачі даних, зазвичай до 56 Кбіт/с, і можуть піддаватися перервам у зв'язку через перевантаження мережі. Хоча ціни на комутовані підключення можуть бути нижчими, ніж на виділені лінії, вони вже стали досить застарілими через зростання можливостей сучасних технологій, таких як ADSL або оптоволоконні з'єднання.

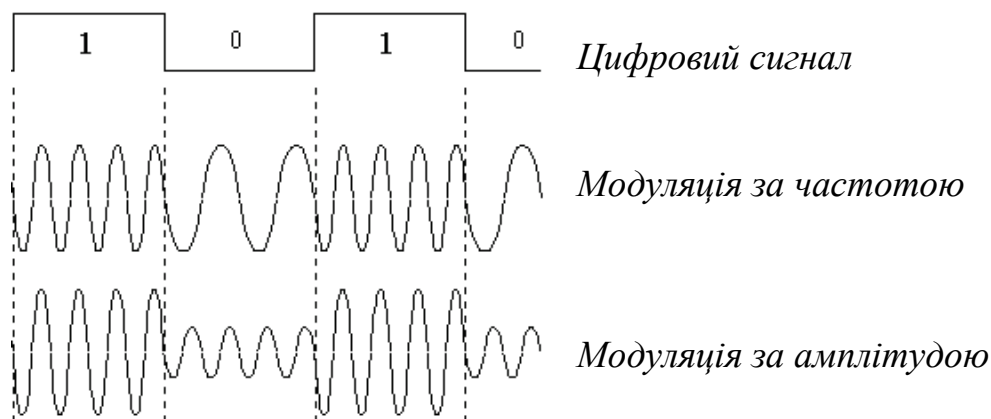


Рис. 1.3.26. Модуляція цифрового сигналу.

### Виділена лінія

Виділена лінія — це спосіб підключення до інтернету, який забезпечує постійний, виключний доступ до мережі для одного користувача або організації. Це означає, що не потрібно ділитися пропускнуною спроможністю з іншими абонентами, що забезпечує високу швидкість, стабільність та надійність з'єднання. Виділені лінії можуть працювати на різних технологіях, включаючи оптоволокно, цифрові підключення (T1, E1) або ISDN, і зазвичай використовуються підприємствами, що потребують великих обсягів даних або гарантованого рівня сервісу, наприклад, у банківських або медичних сферах. Вартість таких з'єднань може бути вищою, ніж у випадку з загальним доступом до інтернету, варіюючись від кількох тисяч гривень на місяць залежно від швидкості та провайдера.

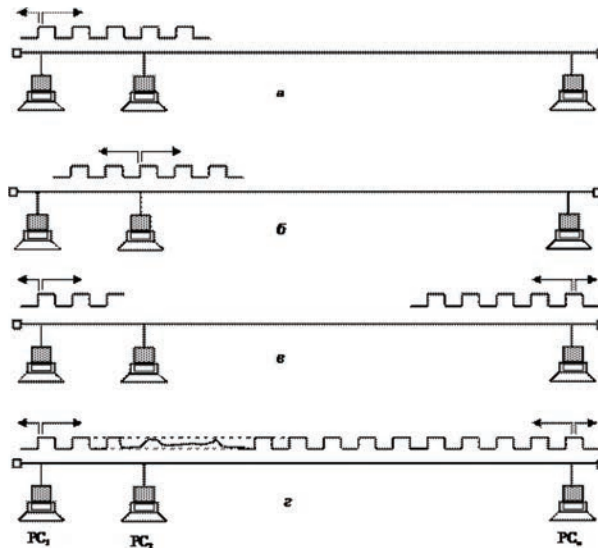


Рис. 1.3.27. Передавання комп'ютерами даних у мережу.

### Радіоканал



Рис. 1.3.28. Здійснення доступу до мереж через радіоканал.

Радіоканали як спосіб підключення до інтернету використовують бездротову технологію, що дозволяє передавати дані через радіохвилі. Цей тип з'єднання може бути корисним у віддалених районах або в місцевостях з поганим доступом до традиційних дротових технологій, таких як ADSL або оптоволокну.

Система зазвичай складається з базової станції, яка передає сигнал до кінцевих користувачів через радіоантени.

Користувачі, у свою чергу, встановлюють спеціальні приймачі, які підключаються до їхніх пристроїв, забезпечуючи доступ до інтернету. Швидкість передачі даних може варіюватись, але зазвичай досягає від 1 до 100 Мбіт/с залежно від відстані до базової станції та якості сигналу.

Ця технологія має свої переваги, такі як швидка установка і мобільність, але при цьому може бути піддана впливу зовнішніх факторів, таких як погодні умови чи перешкоди від будівель. Вартість підключення та абонентської плати

може варіюватись, зазвичай коливається від 300 до 800 гривень на місяць, залежно від провайдера та пакету послуг.

### Супутниковий канал



Рис. 1.3.29. Здійснення доступу до мереж через супутник.

Супутниковий зв'язок, який пропонує як телебачення, так і інтернет, зазвичай реалізується через комбіновані пакети послуг. Один із таких популярних провайдерів — **Viasat** або **HughesNet**. Ці компанії забезпечують абонентів супутниковим телебаченням високої якості,

пропонуючи широкий вибір каналів, у тому числі HD. Одночасно з цим, вони надають доступ до інтернету, що є особливо корисним у віддалених або сільських місцевостях, де інші види підключення можуть бути відсутні. Швидкість інтернету зазвичай коливається від 10 до 25 Мбіт/с, але варто враховувати, що затримки можуть бути більшими через використання супутникового зв'язку. Вартість таких комбінаційних пакетів може варіюватися, але зазвичай становить від 400 до 900 гривень на місяць залежно від пропозицій провайдера та вибору каналів.

### Мережа кабельного телебачення

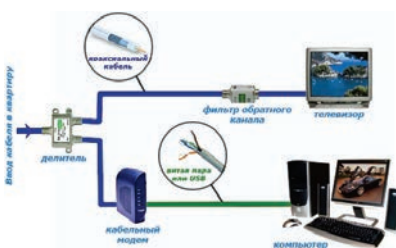


Рис.1.3.30. Здійснення доступу до мереж через кабельні комунікації.

Кабельне телебачення — це система, яка передає телевізійний сигнал через кабелі, зазвичай коаксіальні або волоконно-оптичні. Швидкість передачі даних варіюється в залежності від провайдера, але зазвичай забезпечує стабільне з'єднання та високу якість зображення, включно з HD та 4K форматами.

Важливо також звернути увагу на можливість комбінації кабельного телебачення з інтернет-послугами, що може бути вигідним варіантом для користувачів.

### LTE-мережа

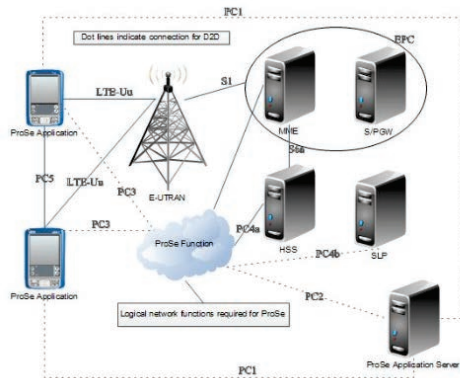


Рис. 1.3.31. LTE-технологія мобільного зв'язку.

LTE (Long Term Evolution) – це технологія мобільного зв'язку, що забезпечує високу швидкість передачі даних і низьку затримку порівняно з попередніми поколіннями (2G, 3G). Вона використовує нові методи модуляції, такі як OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access), що дозволяє ефективно використовувати

доступний спектр частот, а також MIMO (Multiple Input Multiple Output), яке підвищує швидкість та стабільність з'єднання. LTE підтримує різноманітні застосунки, від потокового відео до ігор, і призначена для роботи в різних частотних діапазонах, що робить її гнучким рішенням для мобільних операторів. Технологія активно розвивається й стає основою для мереж 4G та 5G, забезпечуючи швидкісний і надійний інтернет.

### Мережі 5G

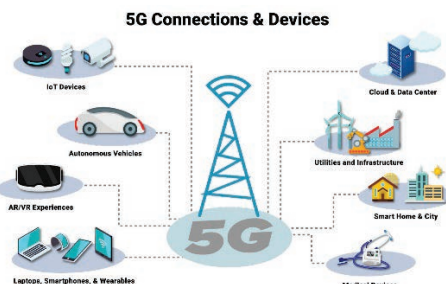


Рис. 1.3.32. Здійснення доступу до мереж через мережі 5G.

5G – це п'яте покоління мобільних мереж, яке забезпечує значно вищі швидкості передачі даних і зменшення затримок порівняно з попередніми технологіями, такими як 4G. Воно використовує радіохвилі в нових частотних діапазонах, зокрема, у

субванному та міліметровому діапазонах, що дозволяє обробляти величезну

кількість підключень одночасно. 5G підтримує не лише звичайний телефонний зв'язок, а й нові технології, такі як IoT (Інтернет речей), автономні автомобілі та розумні міста, підвищуючи можливості для розвитку різноманітних інновацій у сферах бізнесу, охорони здоров'я та розваг. На даний момент, в Україні вже запуснені тестові режими використання мережі 5G.

## РОЗДІЛ 2. ПРАКТИКУМ

### 2.1. Електрика

#### Приклади розв'язування задач

1. Визначити напруженість і потенціал електричного поля в точці, яка знаходиться між двома зарядами  $q_1 = 7$  нКл і  $q_2 = -4$  нКл на відстані 2 см від позитивного заряду. Відстань між зарядами  $r = 8$  см.

Кожний заряд утворює електричне поле незалежно від існування в просторі інших зарядів (принцип суперпозиції) (рис 2.1.1).

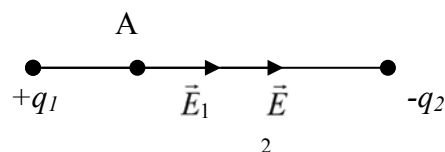


Рис. 2.1.1.

Напруженість поля в точці А дорівнює геометричній сумі напруженостей  $\vec{E}_1$  і  $\vec{E}_2$  полів утворених кожним зарядом окремо:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2. \quad (2.1.1.1)$$

Оскільки обидва вектора  $\vec{E}_1$  і  $\vec{E}_2$  направлені по одній прямій в один бік, то векторне рівняння (2.1.1.1) заміняємо скалярним:

$$E = E_1 + E_2. \quad (2.1.1.2)$$

Напруженість  $E_1$  електричного поля, утвореного в точці зарядом  $q_1$  дорівнює:  $E_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_1^2}$ .

Напруженість  $E_2$  електричного поля, утвореного в точці А зарядом  $q_2$  дорівнює:  $E_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_2^2}$ .

Підставив вирази  $E_1$  і  $E_2$  в формулу (2.1.1.2), отримаємо напруженість електричного поля в точці А:

$$E = E_1 + E_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left( \frac{q_1}{r_1^2} + \frac{q_2}{r_2^2} \right).$$

Потенціал в точці дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів полів, утворених в даній точці зарядами  $q_1$  і  $q_2$ :

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \quad (2.1.1.3)$$

Потенціал поля утворений точковим зарядом в точці, визначається по формулі:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}. \quad (2.1.1.4)$$

Потенціал  $\varphi_1$  – додатній, так як поле утворено позитивним зарядом  $q_1$ ; потенціал  $\varphi_2$  – від’ємний, так як поле утворено від’ємним зарядом  $q_2$ .

Відстань від другого заряду до точки А дорівнює:

$$r_2 = r - r_1 = (8 - 2) \cdot 10^{-2} = 6 \cdot 10^{-2} \text{ (м)}.$$

Обрахуємо значення  $E$ :

$$E = \frac{1}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \left( \frac{7 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 10^{-4}} + \frac{4 \cdot 10^{-9}}{36 \cdot 10^{-4}} \right) = 9 \cdot 10^4 \left( \frac{\text{В}}{\text{м}} \right).$$

Знайдемо  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ :

$$\varphi_1 = \frac{q_1}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_1} = \frac{7 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 10^{-2}} = 3,1 \cdot 10^3 \text{ (В)};$$

$$\varphi_2 = \frac{q_2}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r_2} = \frac{-4 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6 \cdot 10^{-2}} = -6 \cdot 10^3 \text{ (В)};$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = 3,1 \cdot 10^3 \text{ В} - 6 \cdot 10^3 = -2,9 \cdot 10^3 \text{ (В)}.$$

2. Електрон пройшов прискорюючи різницю потенціалів  $U = 800 \text{ В}$ . Визначити швидкість набути електронем.

По закону збереження енергії, кінетична енергія  $E_k$  набута зарядом, дорівнює роботі  $A$ , яка виконується електричним полем при переміщенні цього заряду:

$$A = E_k. \quad (2.1.2.1)$$

Робота сил електричного поля при переміщенні заряду ( в даному випадку електрона):

$$A = eU. \quad (2.1.2.2)$$

де  $e$  - заряд електрона.

Кінетична енергія електрона:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}, \quad (2.1.2.3)$$

де  $m$  – маса електрона,  $v$  – швидкість.

Підставив в (2.1.2.1) вирази для  $E_k$  і  $A$ , отримаємо:

$$\frac{mv^2}{2} = eU,$$

звідки  $v = \sqrt{\frac{2eU}{m}}$ , використовуючи табличні значення маси та заряду електрона, отримаємо:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 800}{9,11 \cdot 10^{-31}}} = 1,68 \cdot 10^7 \left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right).$$

3. Електричне коло складається з двох гальванічних елементів, трьох опорів і гальванометра. В цьому колі  $R_1 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 50 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 20 \text{ Ом}$ , ЕРС елемента 2 В. Гальванометр реєструє силу струму  $I_3 = 50 \text{ мА}$ , який йде в напрямі показаному стрілкою. Визначити ЕРС другого елемента. Опором гальванометра і внутрішнім опором елементів знехтувати.

Виберемо напрямки струмів, як вони показані на рисунку, і домовимося обходити контури по часовій стрілці (рис. 2.1.2).

За першому закону Кірхгофа для вузла F маємо:

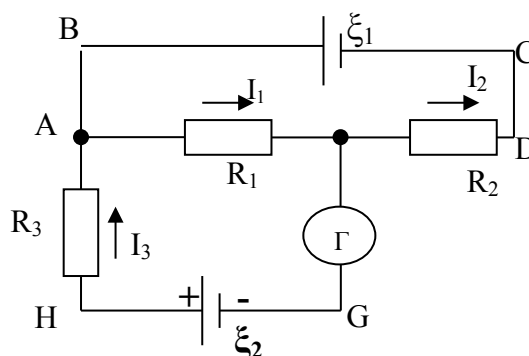


Рис. 2.1.2.

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0. \quad (2.1.3.1)$$

За другим законом Кірхгофа для контуру ABCDFA маємо:

$$-I_1 R_1 - I_2 R_2 = -\xi_1 \text{ або } I_1 R_1 + I_2 R_2 = \xi_1. \quad (2.1.3.2)$$

Відповідно для контуру AFGHA:

$$I_1 R_1 + I_3 R_3 = \xi_2. \quad (2.1.3.3)$$

Після підстановки числових значень в формули (2.1.3.1), (2.1.3.2) і (2.1.3.3) отримаємо:

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 - 0,05 &= 0; \\ 50 I_1 + 25 I_2 &= 1; \\ 100 I_1 + 0,05 \cdot 20 &= \xi_2. \end{aligned}$$

Перенесемо в цих рівняннях невідомі величини в ліві частини, а відомі в праві, отримаємо слідує систему рівнянь:

$$\begin{aligned} I_1 - I_2 &= 0,05; \\ 50 I_1 + 25 I_2 &= I; \\ 100 I_1 - \xi_2 &= -I. \end{aligned}$$

Цю систему з трьома невідомими можна рішити звичайними методами алгебри, але так як по умові задачі потрібно визначити тільки одне невідоме  $\xi_2$  з трьох, то використаємо метод визначника.

Складемо і обрахуємо визначник  $\Delta$  системи:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 50 & 25 & 0 \\ 100 & 0 & -1 \end{vmatrix} = 1 \begin{vmatrix} 25 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} - (-1) \begin{vmatrix} 50 & 0 \\ 100 & -1 \end{vmatrix} = -25 - 50 = -75.$$

Складемо і обрахуємо визначник  $\Delta_{\xi_2}$ :

$$\begin{aligned} \Delta_{\xi_2} &= \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0,05 \\ 50 & 25 & 1 \\ 100 & 0 & -1 \end{vmatrix} = 1 \begin{vmatrix} 25 & 1 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} - (-1) \begin{vmatrix} 50 & 1 \\ 100 & -1 \end{vmatrix} + 0,05 \begin{vmatrix} 50 & 25 \\ 100 & 0 \end{vmatrix} = \\ &= -25 - 50 - 100 - 125 = -300. \end{aligned}$$

Розділивши визначник  $\Delta_{\xi_2}$  на визначник  $\Delta$  знайдемо числове значення ЕРС:  $\{\xi_2\} = \frac{\Delta_{\xi_2}}{\Delta} = \frac{-300}{-75} = 4$ .

Отже  $\xi_2 = 4$  В.

4. Електрон, що має швидкість  $6 \cdot 10^9$  см/с, влітає в плоский повітряний конденсатор паралельно до його заряджених пластин. Віддаль між пластинами конденсатора 1 см, довжина пластин конденсатора 5 см, різниця потенціалів на пластинах 600 В. Знайти відхилення електрона, спричинене дією електричного поля конденсатора.

На електрон, що влетів у електричне поле, з боку поля діятиме сила:  $\vec{F} = e\vec{E}$ .

Оскільки на рис. 2.1.3 лінії напруженості електричного поля напрямлені вгору, то сила, яка діє на електрон, напрямлена вниз.

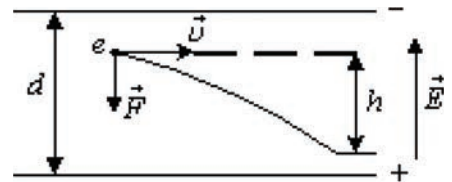


Рис. 2.1.3.

Тому рух електрона всередині конденсатора буде складним.

У горизонтальному напрямі він, як і раніше, рухатиметься рівномірно, бо в

цьому напрямі жодні сили не діють, і водночас з цим він рухатиметься рівноприскорено вниз під дією електричної сили  $\vec{F}$ .

Траєкторією руху буде парабола. Цей рух електрона в конденсаторі нагадує рух тіла, кинутого горизонтально. За час руху в конденсаторі електрон пролетить по горизонталі шлях:

$$S = \vec{v}t, \quad (2.1.4.1)$$

а по вертикалі

$$h = \frac{at^2}{2}, \quad (2.1.4.2)$$

де  $\vec{a}$  – прискорення електрона.

Розв'язуючи сумісно (2.1.4.1) та (2.1.4.2) рівняння, знаходимо  $h = \frac{\vec{a}S^2}{2\vec{v}^2}$ .

Щоб знайти прискорення  $\vec{a}$ , застосуємо другий закон Ньютона. На електрон у вертикальному напрямі діє одна електрична сила  $\vec{F}$  (вагою електрона нехтуємо):

$$\vec{F} = m\vec{a}. \quad (2.1.4.3)$$

З (2.1.4.3) виразимо прискорення  $\vec{a} = \frac{F}{m}$ , але,

$$\vec{F} = e\vec{E} \quad \text{і} \quad \vec{E} = \frac{U}{d}.$$

Тому  $\vec{a} = \frac{eU}{dm}$ ;  $h = \frac{S^2 eU}{2v^2 dm}$ .

$$h = \frac{(5 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 600}{2 \cdot (6 \cdot 10^7)^2 \cdot 10^{-2} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}} = 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}.$$

5. Коло, що складається з опорів  $R_1, R_2, R_3, R_4$  (рис. 2.1.4), замкнено на джерело струму з внутрішнім опором  $r$ . Пластины конденсатора ємністю  $C$  мають заряд  $q$ .

Визначити:

- 1) повний опір зовнішнього кола ( $R_0$ );
- 2) повний струм ( $I_0$ );
- 3) ЕРС джерела струму ( $\square$ );
- 4) повну потужність джерела струму ( $P$ );

- 5) корисну потужність ( $P_K$ );
- 6) ККД у колі у відсотках ( $\square$ );
- 7) струм короткого замикання ( $I_{K3}$ ).

Зовнішня ділянка кола є змішаним з'єднанням опорів  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ , а також конденсатора ємністю  $C$ . Опори  $R_2$ ,  $R_3$  з'єднані послідовно, тому:

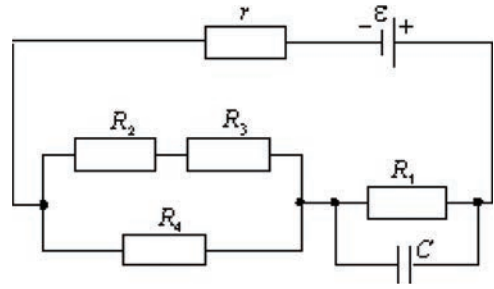


Рис. 2.1.4.

$$R_{23} = R_2 + R_3. \quad (2.1.5.1)$$

Ці опори, в свою чергу, паралельні опорі  $R_4$ . Звідси за законом з'єднання паралельних провідників отримаємо:

$$\frac{1}{R_{234}} = \frac{1}{R_{23}} + \frac{1}{R_4} \rightarrow R_{234} = \frac{(R_2 + R_3)R_4}{R_2 + R_3 + R_4}.$$

Опір конденсатора можна вважати нескінченно великим, а це означає, що опір паралельно з'єднаних опорів  $R_1$  і конденсатора  $C$  дорівнює величині опорів  $R_1$ :

$$\frac{1}{R_{1C}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_C} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{\infty} = \frac{1}{R_1}.$$

Опір  $R_1$  послідовно з'єднаний з групою провідників  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ , отже, повний опір кола дорівнює:  $R_0 = R_1 + R_{234}$ .

Знайдемо спад напруги на опорі  $R_1$ ; ємність відокремленого провідника:

$$C = \frac{q}{U_1}. \quad (2.1.5.2)$$

З (2.1.5.2) слідує, що:

$$U_1 = \frac{q}{C}. \quad (2.1.5.3)$$

Ділянка кола, що містить опір  $R_1$ , не має розгалужень (конденсатор є розірваною ділянкою кола). Тоді для визначення повного струму можна використати закон Ома для ділянки кола з опором  $R_1$ :  $I_0 = \frac{U_1}{R_1} = \frac{q}{CR_1}$ .

Знаючи повний струм, повний опір кола і внутрішній опір джерела струму, за законом Ома для повного кола можна визначити ЕРС джерела:

$$\square = I_0(r + R_0). \quad (2.1.5.4)$$

Виходячи із визначення повної (або затраченої) потужності, можемо записати:

$$P = I_0^2 R = I_0^2 (r + R_0). \quad (2.1.5.5)$$

Аналогічно знаходимо корисну потужність, розуміючи під нею потужність, що виділяється на зовнішній ділянці кола:

$$P_k = I_0^2 R_0. \quad (2.1.5.6)$$

За означенням, ККД можна знайти як відношення  $P_k$  до  $P$ :

$$\eta = \frac{P_k}{P} \cdot 100 \% = \frac{I_0^2 R_0}{I_0^2 (r + R_0)} \cdot 100 \% = \frac{R_0}{r + R_0} \cdot 100 \%.$$

Струм короткого замикання виникає при прямуванні зовнішнього опору до нуля:

$$I_{к.з.} = \frac{\mathcal{E}}{r}. \quad (2.1.5.7)$$

### Задачі для самостійного розв'язування

1. Конденсатор ємністю 20 мкФ заряджений до різниці потенціалів 100 В. Знайти енергію цього конденсатора.
2. Площа пластин плоского повітряного конденсатора 1 м<sup>2</sup>, відстань між ними 1,5 мм. Знайти ємність цього конденсатора.
3. Знайти ємність  $C$  земної кулі. Рахувати радіус земної кулі  $R = 6400$  км.
4. Напруга між полюсами батареї акумуляторів 40 В. Який заряд одержить конденсатор ємністю 500 мкФ, якщо його підключити до цієї батареї?
5. Модуль напруженості електричного поля в точці, де знаходиться заряд  $10^{-7}$  Кл, дорівнює 5 В/м. Визначити силу, яка діє на цей заряд.
6. ЕРС джерела 100 В. При зовнішньому опорі 49 Ом сила струму в колі дорівнює 2 А. Визначити внутрішній опір джерела і спад напруги на ньому.
7. Як зміниться сила взаємодії зарядів, якщо їх помістити в гас?
8. Яку роботу виконує поле під час переміщення заряду 20 нКл з точки, потенціал якої 700 В, у точку з потенціалом 200 В?
9. Провідником з опором 1,5 Ом протягом 4 с проходить заряд 12 Кл. Яку роботу виконує електричний струм, що проходить провідником?

10. Визначити напругу на затискачах джерела струму, що має ЕРС 2,0 В і внутрішній опір 0,50 Ом, до і після підключення до нього зовнішнього опору 4,5 Ом.

11. Знайти напруженість електричного поля в точці, яка лежить посередині між точковими зарядами 8 нКл і  $-6$  нКл. Відстань між зарядами 10 см,  $\varepsilon = 1$ .

12. Дві кулі з зарядами 6,66 нКл і 13,33 нКл знаходяться на відстані 40 см. Яку роботу  $A$  потрібно виконати, щоб зблизити їх до відстані 25 см.

13. Знайти ємність  $C$  системи конденсаторів, зображеної на рис. 2.1.5. Ємність кожного конденсатора  $C_i = 0,5$  мкФ.

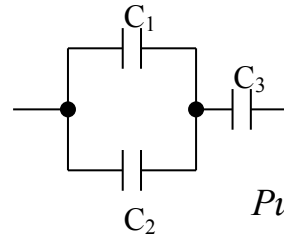


Рис. 2.1.5.

14. Котушка з мідного дроту має опір 10,8 Ом. Маса мідного дроту 3,41 кг. Якої довжини і якого діаметра намотаний дріт на котушці.

15. ЕРС батареї 100 В, опір  $R_1 = 100$  Ом,  $R_2 = 200$  Ом,  $R_3 = 300$  Ом, опір вольтметра  $R_V = 2$  кОм. Яку різницю потенціалів показує вольтметр (рис. 2.1.6)?

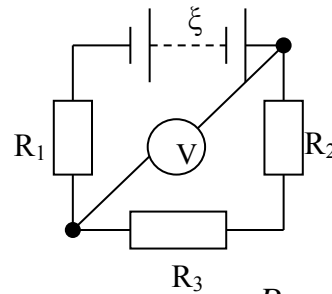


Рис. 2.1.6.

16. За який час при електролізі водного розчину хлорної міді ( $\text{CuCl}_2$ ) на катоді виділяється 4,74 г міді, якщо струм 2 А?

17. В центр квадрата, в кожній вершині якого знаходиться заряд 2,33 нКл, розміщений негативний заряд  $q_0$ . Знайти заряд, якщо на кожний заряд діє результуюча сила  $\vec{F} = 0$ .

18. Знайти швидкість електрона, який проходить різницю потенціалів, рівну: 1, 5, 10, 100, 1000 В.

19. В яких межах може змінюватися ємність системи, яка складається з двох конденсаторів змінної ємності, якщо ємність кожного з них змінюється від 10 до 450 пФ?

20. Знайти опір залізного стержня діаметром 1 см, якщо маса стержня 1 кг.

21. Батарея з ЕРС 240 В і внутрішнім опором 1 Ом замкнута на зовнішній опір 23 Ом. Знайти повну та корисну потужність, ККД батареї.

22. В вершинах правильного шестикутника розміщені три позитивних і три від'ємних заряду. Знайти напруженість електричного поля в центрі шестикутника при різних комбінаціях в розміщеннях цих зарядів. Кожний заряд  $q = 1,5 \text{ нКл}$ , сторона шестикутника  $a = 3 \text{ см}$ .

23. Два точкових заряди  $7,5 \text{ нКл}$  і  $-14,7 \text{ нКл}$  розміщені на відстані  $5 \text{ см}$ . Знайти напруженість електричного поля в точці, яка знаходиться на відстанях  $a = 3 \text{ см}$  від позитивного заряду і  $b = 4 \text{ см}$  від негативного заряду.

24. Знайти падіння потенціалу  $U$  в опорах  $R_1 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 4 \text{ Ом}$ , якщо амперметр показує струм  $I_1 = 3 \text{ А}$ . Знайти струми  $I_2$  і  $I_3$  в опорах  $R_2$  та  $R_3$  (рис. 2.1.7).

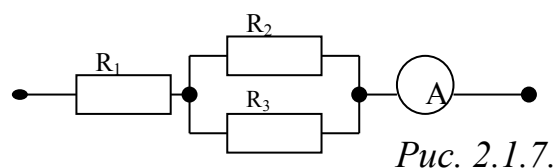


Рис. 2.1.7.

25. Дві кулі однакового радіуса і маси підвішені на нитках однакової довжини так, що їх поверхні стикаються. Після надання кілям заряду  $q_0 = 0,4 \text{ мКл}$  вони відштовхнулись один від одного і розійшлися на кут  $2\alpha = 60^\circ$ . Знайти масу кожної кулі, якщо відстань від центру куль до точки підвісу  $l = 20 \text{ см}$ .

26. ЕРС елементів  $\xi_1 = 2,1 \text{ В}$  і  $\xi_2 = 1,9 \text{ В}$  опори  $R_1 = 45 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 10 \text{ Ом}$ . Знайти струми  $I_i$  в всіх ділянках кола (рис. 2.1.8).

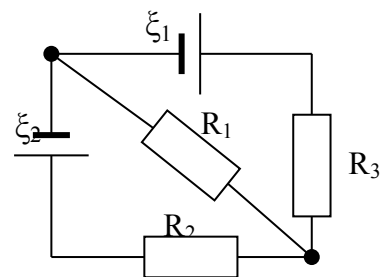


Рис. 2.1.8.

27. Якої площі поперечного перерізу треба взяти нікеліновий дріт завдовжки  $20 \text{ м}$ , щоб виготовити з нього нагрівник на  $220 \text{ В}$ , за допомогою якого можна нагріти  $2,0 \text{ л}$  води від  $20^\circ \text{ C}$  до кипіння за  $10 \text{ хв}$  при ККД  $80 \%$ .

28. Яка напруга прикладена до мідного провідника завдовжки  $300 \text{ м}$ , якщо середня швидкість впорядкованого руху електронів у провіднику  $4,9 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$ , а концентрація електронів провідності  $8,5 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$ ?

29. Яка довжина мідної дротини перерізом  $0,50 \text{ мм}^2$ , якщо за  $1 \text{ хв}$  по ній проходить заряд  $60 \text{ Кл}$  при напрузі  $34 \text{ В}$ ?

30. Під кінець заряджання через акумулятор протікав струм 4 А, а напруга на його клеммах була 12,6 В. При розряджанні акумулятора струмом 6 А, напруга на його клеммах була 11,1 В. Визначити струм короткого замикання для даного акумулятора.

## 2.2. Магнетизм

### Приклади розв'язування задач

1. З дроту діаметром 0,1 мм і опором 25 Ом намотаний соленоїд на картонному циліндрі (витки щільно прилягають один до одного). Визначити індукцію магнітного поля на осі соленоїда, якщо напруга на кінцях обмотки дорівнює 2 В.

Індукція магнітного поля на осі соленоїда обраховується по формулі:

$$\vec{B} = \mu\mu_0 n I, \quad (2.2.1.1)$$

де  $n$  – число витків на одиницю довжини соленоїда,  $I$  – сила струму, яка йде по соленоїду.

Кількість витків отримаємо, розділивши одиницю довжини на діаметр дроту  $n = \frac{1}{d}$ .

Силу струму знайдемо за законом Ома для ділянки кола  $I = \frac{U}{r}$ .

Підставимо значення  $n$  та  $I$  в (2.2.1.1) формулу:

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \frac{U}{dr}.$$

Підставимо значення у вираз:

$$\vec{B} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \frac{2}{10^{-4} \cdot 25} = 1,01 \cdot 10^{-3} = 1,01 \text{ (мТл)}.$$

2. Прямий дріт довжиною 10см, по якому тече струм 0,5 А, розміщений в однорідному магнітному полі перпендикулярно силовим лініям. Знайти індукцію магнітного поля, якщо воно діє на дріт з силою 2,6 мН.

Сила з якою однорідне магнітне поле діє на прямий провідник з струмом, обраховується по формулі:

$$\vec{F} = I l \vec{B} \sin \alpha, \quad (2.2.2.1)$$

де  $I$  – сила струму, яка тече по провіднику,  $l$  – довжина провідника,  $\vec{B}$  – індукція магнітного поля, в якому розміщений дрiт,  $\alpha$  – кут між напрямом струму і напрямом ліній індукції.

З (2.2.2.1) знайдемо:

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}}{Il \sin \alpha}. \quad (2.2.2.2)$$

$$\text{Отже } \vec{B} = \frac{2,6 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 0,1} = 0,052 = 52 \text{ (мТл)}.$$

3. Протон, проходячи прискорюючи різницю потенціалів 400 В влетів в однорідне магнітне поле з індукцією 0,2 Тл і почав рухатися по колу. Знайти радіус кола.

На заряджену частинку, яка влетіла в магнітне поле діє сила Лоренца:

$$\vec{F} = q\vec{v}\vec{B}\sin\alpha,$$

де  $q$  – заряд частинки,  $\vec{v}$  – її швидкість,  $\vec{B}$  – індукція магнітного поля, в якому рухається частинка,  $\alpha$  – кут між напрямком векторів швидкості і індукції.

Так як по умові задачі протон рухається по колу, то сила Лоренца є доцентровою силою, тобто  $\vec{F}_n = \vec{F}_o$

$$q\vec{v}\vec{B} \sin\alpha = \frac{mv^2}{r},$$

де  $m$  – маса протона,  $r$  – радіус кола, по якому рухається протон.

Звідси:

$$r = \frac{mv}{qB \sin \alpha}. \quad (2.2.3.1)$$

Протон отримав швидкість, пройшовши прискорюючи різницю потенціалів. По закону збереження енергії, робота, яку виконує поле при переміщенні протона, дорівнює кінетичній енергії, набутою протоном, тобто:

$$A = E_k. \quad (2.2.3.2)$$

Робота сил електричного поля, при переміщенні заряду визначаються по формулі:

$$A = qU. \quad (2.2.3.3)$$

Кінетична енергія протона:

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (2.2.3.4)$$

З врахуванням цього рівняння (2.2.3.2) набуде вигляду:

$$qU = \frac{mv^2}{2},$$

звідки

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}. \quad (2.2.3.5)$$

Підставляючи вираз для  $v$  в (2.2.3.1) отримаємо:

$$r = \frac{\sqrt{2qUm}}{qB \sin \alpha}. \quad (2.2.3.6)$$

Підставляючи табличні значення для маси та заряду протона отримаємо:

$$r = \frac{\sqrt{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 4 \cdot 10^2}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{-1}} = 1,45 \text{ (см)}.$$

4. Прямокутну рамку зі струмом розміщено в магнітному полі паралельно до ліній магнітної індукції. На рамку діє обертальний момент  $M = 10^2 \text{ Н}\cdot\text{м}$ . Обчислити роботу сил поля під час руху рамки на кут  $\alpha = 30^\circ$ .

Робота сил поля під час руху рамки зі струмом дорівнює:

$$A = I(\Phi_2 - \Phi_1). \quad (2.2.4.1)$$

Потік індукції через рамку буде:

$$\Phi = BS \cos \alpha \quad (2.2.4.2)$$

Якщо рамка розміщена паралельно до ліній індукції поля, то нормаль до контуру рамки утворює з вектором  $\vec{B}$  кут  $\alpha = 90^\circ$ . Тому:

$$\Phi_1 = BS \cos \alpha = 0.$$

Якщо рамка повернеться на кут  $\alpha = 30^\circ$ , то кут між нормаллю і вектором  $\vec{B}$  дорівнюватиме  $\alpha = 60^\circ$ , тому  $\Phi_2 = BS \cos \alpha = \frac{BS}{2}$ .

$$\text{Тоді: } \Phi_2 - \Phi_1 = \frac{BS}{2}.$$

Обертальний момент, який діє на рамку зі струмом в її початковому положенні:

$$M_{об} = B|S|. \quad (2.2.4.3)$$

З (2.2.4.3) випливає, що  $I = \frac{M_{об}}{BS}$ .

Отже, враховуючи (2.2.4.1) робота сил поля:

$$A = I(\Phi_2 - \Phi_1) = \frac{M_{об}BS}{2BS} = \frac{M_{об}}{2}.$$

Отже  $A = 5 \cdot 10^{-3}$  Дж.

5. Котушку з дуже малим опором та індуктивністю 3 Гн під'єднано до джерела струму з ЕРС, яка дорівнює 15 В, і дуже малим внутрішнім опором. Через який проміжок часу струм у котушці досягне значення 50 А?

За законом Ома для повного кола:

$$\varepsilon = I(R + r), \quad (2.2.5.1)$$

де  $\varepsilon$  – повна ЕРС у колі, що дорівнює для цього випадку сумі  $\varepsilon_1$  (ЕРС джерела) і  $\varepsilon_2$  (ЕРС самоіндукції), яка виникає після під'єднання котушки до джерела:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2. \quad (2.2.5.2)$$

ЕРС самоіндукції можна визначити за формулою:

$$\varepsilon_2 = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (2.2.5.3)$$

Підставляючи значення в (2.2.5.2), з врахуванням (2.2.5.1) та (2.2.5.3) отримаємо:

$$\varepsilon_1 - L \frac{\Delta I}{\Delta t} = I(R + r).$$

За умовою задачі опори  $R$  і  $r$  дуже малі, тому:

$$\varepsilon_1 - L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0, \text{ або } \varepsilon_1 = L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Звідки можна знайти швидкість зміни струму  $\frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{\varepsilon_1}{L}$ .

Тепер можна визначити час, потрібний для наростання струму до значення  $I = 50$  А:

$$t = \frac{I}{\frac{\Delta I}{\Delta t}} = \frac{I}{\frac{\varepsilon_1}{L}} = \frac{IL}{\varepsilon_1}; \quad t = \frac{50 \cdot 3}{15} = 10 \text{ (с)}.$$

Отже, час  $t = 10$  с.

### Задачі для самостійного розв'язування

1. На провідник обмотки якоря електродвигуна при струмі 20 А діє сила 1 Н. Визначити магнітну індукцію в місці розташування провідника, якщо його довжина 0,2 м.
2. При рівномірній зміні сили струму від 1 до 6 А за 0,1 с в котушці виникає ЕРС самоіндукції 50 В. Яка індуктивність котушки?
3. Яка сила діє на провідник завдовжки 0,1 м в однорідному магнітному полі з магнітною індукцією 2 Тл, якщо струм у провіднику 5 А, а кут між напрямом струму та лініями індукції  $30^\circ$ ?
4. На якій відстані від прямолінійного провідника із струмом 12 А розміщені в повітрі точки з магнітною індукцією  $1,6 \cdot 10^{-5}$  Тл?
5. Якої сили струм протікає провідником завдовжки 40 см, поміщеному у магнітне поле перпендикулярно до ліній магнітної індукції, якщо магнітне поле з індукцією 1 Тл діє на провідник силою 0,80 Н?
6. Яка величина магнітного потоку через площу  $800 \text{ см}^2$ , вміщену в однорідне магнітне поле з індукцією 50 Тл під кутом  $30^\circ$  до ліній індукції?
7. Як зміниться сила Ампера, яка діє на прямолінійний провідник із струмом в однорідному полі, при збільшенні індукції магнітного поля в 3 рази і збільшенні сили струму в 3 рази? Провідник розміщений перпендикулярно до вектора індукції.
8. В тороїдальній котушці з площею витка  $200 \text{ см}^2$  магнітна індукція  $6,3 \cdot 10^{-4}$  Тл. Визначити магнітний потік в котушці. Як він зміниться, якщо в котушку помістити залізне осердя, для якого в умовах роботи  $\mu = 500$ ?
9. При переміщенні провідника довжиною 80 см із струмом 20 А в однорідному магнітному полі з індукцією 1,2 Тл перпендикулярно до нього виконано роботу 1,92 Дж. Визначити величину переміщення.
10. По довгому вертикальному провіднику зверху вниз тече струм 8 А. На якій відстані  $a$  від нього напруженість поля, отримана від додавання земного магнітного поля і поля струму, напрямлена вертикально вгору? Горизонтальна складова напруженості земного поля  $H_z = 16 \text{ А/м}$ .

11. Обмотка котушки зроблена з дроту діаметром 0,8 мм. Витки щільно прилягають один до одного. Рахуючи котушку достатньо довгою, знайти напруженість магнітного поля всередині котушки при стумі 1 А.
12. В однорідному магнітному полі з напруженістю 79,6 кА/м розміщена квадратна рамка, площа якої складає з напрямком магнітного поля кут  $\alpha = 45^\circ$ . Сторона рамки 4 см. Знайти магнітний потік, який пронизує рамку.
13. В магнітному полі, індукція якого 0,05 Тл, обертається стержень довжиною 1 м. Вісь обертання, проходить через один з кінців стержня, паралельна напрямку магнітного поля. Знайти магнітний потік, який пересікається стержнем при кожному обороті.
14. Між полюсами електромагніта утворюється однорідне магнітне поле з індукцією 0,1 Тл. По провіднику довжиною 70 см, розміщеному перпендикулярно до напрямку магнітного поля, тече струм 70 А. Знайти силу, яка діє на заряд.
15. Електрон влітає в однорідне магнітне поле, напрямком якого перпендикулярний до напрямку його руху. Швидкість електрона  $4 \cdot 10^7$  м/с. Індукція магнітного поля 1 мТл. Знайти тангенціальне і нормальне прискорення електрона в магнітному полі.
16. Заряджена частинка рухається в магнітному полі по колу з швидкістю  $10^6$  м/с. Індукція магнітного поля 0,3 Тл. Радіус кола 4 см. Знайти заряд частинки, якщо відомо, що її енергія 12 кеВ.
17. В однорідному магнітному полі з індукцією 0,1 Тл рухається провідник довжиною 10 см. Швидкість руху провідника 15 м/с і напрямлена перпендикулярно до магнітного поля. Знайти в провіднику ЕРС індукції.
18. Котушка діаметром 10 см, складається з 500 витків дроту, і знаходиться в магнітному полі. Знайти середню ЕРС індукції, яка виникає в цій котушці, якщо індукція магнітного поля збільшується на протязі  $t = 0,1$  с від 0 до 2 Тл.
19. В однорідному магнітному полі, індукція якого 0,8 Тл, рівномірно обертається рамка з кутовою швидкістю  $\omega = 15$  рад/с. Площа рамки  $150 \text{ см}^2$ .

Вісь обертання знаходиться в площині рамки і складає кут  $30^\circ$  з напрямом магнітного поля. Знайти максимальну ЕРС індукції в обертаючій рамці.

20. В однорідному магнітному полі з індукцією  $0,5$  Тл рухається рівномірно провідник довжиною  $10$  см. По провіднику тече струм  $2$  А. Швидкість руху провідника  $20$  см/с і напрямлена перпендикулярно до напрямку магнітного поля. Знайти роботу переміщення провідника за  $10$  с і потужність, яка витрачається на це переміщення.

21. Електрон, прискорений різницею потенціалів  $1$  кВ, влітає в однорідне магнітне поле, напрямом якого перпендикулярний до напрямку його руху. Індукція магнітного поля  $1,19$  мТл. Знайти радіус кола, по якому рухається електрон, і період обертання і момент імпульсу електрона.

22. Знайти напруженість магнітного поля, утворену відрізком  $AB$  прямолінійного провідника з струмом, в точці  $C$ , яка розміщена на перпендикулярі до середини цього відрізка на відстані  $5$  см від нього. По провіднику тече струм  $20$  А. Відрізок  $AB$  провідника знаходиться під кутом  $60^\circ$  до точки  $C$ .

23. В центрі колового провідникового витка утворюється магнітне поле з напруженістю  $H$  при різниці потенціалів  $U_1$  на кінцях витка. Яку потрібно прикласти різницю потенціалів  $U_1$ , щоб отримати таку ж напруженість магнітного поля в центрі витка вдвічі більшого радіуса, зробленого з такого самого дроту?

24. Два прямолінійно довгих провідника розміщені паралельно на відстані  $10$  см один від одного. По провідникам течуть струми  $I_1 = I_2 = 5$  А в протилежних напрямках. Знайти модуль і напрямок напруженості  $H$  магнітного поля в точці, яка знаходиться на відстані  $10$  см від кожного провідника.

25. Знайти напруженість магнітного поля в точці яка заходиться на відстані  $2$  м від нескінчене довгого провідника, по якому тече струм  $5$  А.

26. По дротяній рамці, яка має форму правильного шестикутника, йде струм  $2$  А. При цьому в центрі рамки утворюється магнітне поле напруженістю  $33$  А/м. Знайти довжину дроту, з якої зроблена рамка.

27. Електрон, прискорений різницею потенціалів 300 В, рухається паралельно прямолінійно довгому провіднику на відстані  $a = 4$  мм від нього. Яка сила  $F$  діє на електрон, якщо по провіднику пропустити струм 5 А?

28. Котушка індуктивності діаметром 20 см, що має 50 витків, знаходиться в змінному магнітному полі. Знайти швидкість зміни індукції поля в ту мить, коли ЕРС індукції, що збуджується в обмотці 100 В.

29. Електрон і протон влітають в магнітне поле перпендикулярно до напрямку вектора індукції. У скільки разів відрізнятимуться швидкості електрона і протона, якщо радіуси кривизни траєкторії частинок є однакові? У якої частинки швидкість буде більшою?

30. Соленоїд містить 1000 витків дроту. Сила струму в його обмотці 1 А, а переріз соленоїда пронизує магнітний потік 0,1 мВб. Визначити енергію магнітного поля в соленоїді.

## 2.3. Коливання та хвилі

### Приклади розв'язування задач

1. Визначити довжину математичного маятника, якщо за хвилину він виконує 30 коливань.

Період коливань маятника дорівнює часу на протязі якого виконано одне коливання, тобто:

$$T = \frac{60}{30} = 2 \text{ (с)}.$$

Період математичного маятника дорівнює:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (2.3.1.1)$$

звідки довжина дорівнює:

$$l = \frac{T^2 g}{4\pi^2}. \quad (2.3.1.2)$$

Підставляючи числові значення в (2.3.1.2) отримаємо:

$$l = \frac{2^2 \cdot 9,81}{4 \cdot 3,14^2} = 1 \text{ (м)}.$$

2. Матеріальна точка масою 5 г виконує гармонічні коливання з частотою  $0,5 \text{ с}^{-1}$ . Амплітуда коливань  $0,03 \text{ м}$ . Визначити:

- а) швидкість точки в момент часу, коли зміщення її дорівнює  $1,5 \text{ см}$ ;
- б) максимальну силу, яка діє на точку;
- в) повну енергію точки, яка здійснює коливання.

Рівняння зміщення  $x$  точки, яка здійснює коливання, має вигляд:

$$x = A \sin (\omega_o t + \varphi), \quad (2.3.2.1)$$

де  $x$  – значення величини що здійснює коливання, у даний момент часу  $t$ ,  $A$  – амплітуда,  $\omega_o t + \varphi$  – фаза коливань,  $\omega_o$  – циклічна частота.

Швидкість  $\vec{v}$  змінюються за гармонічним законом:

$$\dot{x} = v_x(t) = A\omega_o \cos (\omega_o t + \varphi). \quad (2.3.2.2)$$

Підставивши початкову фазу  $\varphi$  рівною нулю в (2.3.2.1) та (2.3.2.2) отримаємо:

$$x = A \sin \omega_o t;$$

$$v_x(t) = A\omega_o \cos \omega_o t.$$

Щоб виразити швидкість через зміщення, потрібно виключити з цих рівнянь час.

Для цього підніmemo ці рівняння до квадрату, перше рівняння розділимо на  $A^2$ , друге –  $A^2\omega^2$  і додамо. Тоді отримаємо:

$$\frac{x^2}{A^2} + \frac{v^2}{A^2\omega^2} = 1 \quad \text{або} \quad \frac{x^2}{A^2} + \frac{v^2}{4\pi^2\nu^2 A^2} = 1. \quad (2.3.2.3)$$

Розв'язавши (2.3.2.3) відносно  $v$  знайдемо:

$$v = \pm 2\pi\nu\sqrt{A^2 - x^2}. \quad (2.3.2.4)$$

Підставивши в (2.3.2.4) числові значення, отримаємо:

$$v = \pm 2 \cdot 3,14 \cdot 0,5 \sqrt{0,03^2 - 0,015^2} = \pm 0,082 \left( \frac{\text{м}}{\text{с}} \right).$$

Знак «плюс» відповідає випадку, коли точка віддаляється від положення рівноваги, знак «мінус» відповідає руху точки до положення рівноваги.

- б) силу, яка діє на точку, знайдемо по другому закону Ньютона

$$\vec{F} = m\vec{a}, \quad (2.3.2.5)$$

де  $\vec{a}$  – прискорення точки, яке отримаємо взявши похідну від швидкості по часу:

$$\ddot{x} = a_x(t) = -A\omega_0^2 \sin(\omega_0 t + \varphi), \text{ або } a = -4\pi^2\nu^2 A \sin(\omega t + \varphi).$$

Підставивши вираз для прискорення в (2.3.2.5) отримаємо:

$$\vec{F} = -4m\pi^2\nu^2 A \sin(\omega t + \varphi).$$

Звідси отримаємо вираз для максимального значення сили:

$$F_{max} = -4m\pi^2\nu^2 A. \quad (2.3.2.6)$$

Підставивши в (2.3.2.6) числові значення, знайдемо:

$$F_{max} = 1,48 \cdot 10^{-3} \text{ Н.}$$

в) Повна енергія коливаючої точки дорівнює сумі кінетичної і потенціальної енергії, обрахованих для довільного моменту часу.

В момент часу коли кінетична енергія досягає максимального значення, потенціальна енергія дорівнює нулю. Тому повна енергія коливаючої точки дорівнює максимальній кінетичній енергії  $W_{max}$ , і обрахована по формулі:

$$W = W_{max} = \frac{mv_{max}^2}{2}. \quad (2.3.2.7)$$

Максимальна швидкість визначається з формули (2.3.2.2) якщо в ній покласти  $\cos(\omega_0 t + \varphi) = 1$ :

$$v_{max} = 2\pi\nu A.$$

Підставив цей вираз швидкості в (2.3.2.7) знайдемо

$$W = 2\pi^2 m \nu^2 A^2.$$

Після підстановки значень отримаємо:

$$W = 2 \cdot 9,87 \cdot 0,005 \cdot 0,25 \cdot 0,0009 = 2,22 \cdot 10^{-5} \text{ (Дж)}.$$

3. В коло змінного струму з напругою 110 В включений послідовно конденсатор ємністю  $5 \cdot 10^{-5}$  Ф і котушка індуктивності 200 мГн і активним (омічним) опором 4 Ом. Визначити:

а) силу струму у колі, якщо частота змінного струму 100 Гц;

б) частоту змінного струму, при якій в даному контурі настане резонанс напруги;

в) силу струму і напругу на затискачах котушки і конденсатора в момент резонансу напруги.

а) Сила струму в колі, яке містить індуктивність, ємність, омичний опір, визначається по закону Ома для змінного струму:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} \quad (2.3.3.1)$$

Підставивши числові значення в (2.3.3.1) отримаємо

$$I_m = \frac{110}{\sqrt{16 + \left(2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 0,2 - \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}\right)^2}} = 1,17 \text{ (А)}.$$

б) Резонанс настає при умові рівності частоти мережі змінного струму, в яку ввімкнено коло, частоті власних електричних коливань в контурі:

$$\nu_{\text{рез}} = \nu_{\text{влас}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.3.3.2)$$

Підставимо числові значення в (2.3.3.2) отримаємо:

$$\nu_{\text{рез}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \sqrt{0,2 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}} = 50 \text{ (Гц)}.$$

в) При резонансі ємнісний і індуктивний опір компенсують один одного, тобто  $L\omega - \frac{1}{C\omega} = 0$  і повний опір:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = R. \quad (2.3.3.3)$$

Тому сила струму  $I = \frac{U}{R} = \frac{110}{4} = 27,5 \text{ (А)}.$

Напруга на затискачах котушки:

$$U_L = IR_L = I\omega L = 27,5 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,2 = 1727 \text{ (В)}.$$

Напруга на затискачах конденсатора при резонансі буде така ж як і на індуктивному опорі.

4. Неонову лампочку, яка спалахує і гасне при напрузі 84 В, ввімкнено в коло змінного струму промислової частоти з ефективною напругою 120 В. Визначити час між спалахами лампочки і тривалість спалаху.

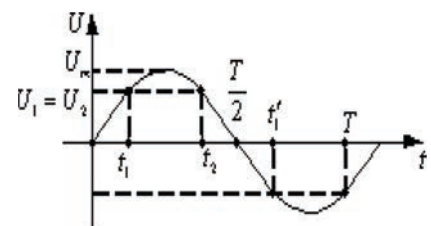


Рис. 2.3.1.

До лампочки підведена змінна напруга:

$$U = U_{max} \sin \frac{2\pi}{T}, \quad (2.3.4.1)$$

де  $U_{max}$  – амплітудне значення напруги (рис. 2.3.1).

Лампочка буде спалахувати в кожен півперіод, коли підведена до неї напруга досягає значення напруги спалаху. Час від початку періоду до моменту спалаху  $t_1$  знаходимо з умови:

Рис. 1.2.3.1.

$$U_1 = U_{max} \sin \frac{2\pi}{T} t_1. \quad (2.3.4.2)$$

Враховуючи, що

$$U_{max} = \sqrt{2} U_{ef} \quad (2.3.4.3)$$

та підставивши (2.3.4.3) в (2.3.4.2), отримаємо:

$$U_1 = \sqrt{2} U_{ef} \sin \frac{2\pi}{T} t_1.$$

Підставивши числові значення, знаходимо:

$$\sin \frac{2\pi}{T} t_1 = \frac{84}{1,4 \cdot 120} = \frac{1}{2},$$

тому  $\frac{2\pi}{T} t_1 = \frac{\pi}{6}$  або  $t_1 = \frac{T}{12}$ ;  $t_1 = \frac{0,02}{12} = 1,66 \cdot 10^{-2}$  (с).

За умовою задачі напруги спалаху і загасання лампи однакові  $U_1 = U_2$ , тому із рис. 2.3.1 випливає, що час між спалахами лампи:  $\Delta t_1 = t'_1 - t_2 = 2t_1 = \frac{T}{6}$ ;  $\Delta t_1 = 0,0033$  с, а тривалість спалаху  $\Delta t_2 = \frac{T}{2} - 2t_1 = \frac{T}{2} - \frac{T}{6} = \frac{T}{3}$ ;  $\Delta t_2 = 0,0066$  с.

5. Коливальний контур приймача складається із слюдяного конденсатора, площа пластин якого  $800 \text{ см}^2$ , а відстань між ними 1 мм, і котушки. На яку довжину хвилі резонує цей контур, якщо максимальне значення напруги на пластинах конденсатора в 100 разів більше максимального значення струму в котушці? Діелектрична проникність середовища дорівнює 7.

Шукана довжина хвилі залежить від періоду коливань заданого контуру:

$$\lambda = cT, \quad (2.3.5.1)$$

де  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – швидкість поширення електромагнітних хвиль, а

$$T = 2\pi\sqrt{LC}. \quad (2.3.5.2)$$

За умовою задачі можна знайти значення електроємності конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}. \quad (2.3.5.3)$$

Оскільки активним опором можна знехтувати, то виконується закон збереження енергії, згідно з яким максимальна енергія електричного поля конденсатора  $\frac{CU_{max}^2}{2}$  дорівнює максимальній енергії магнітного поля котушки  $\frac{LI_{max}^2}{2}$ . З цього випливає, що:

$$L = C \frac{U_{max}^2}{I_{max}^2}. \quad (2.3.5.4)$$

Підставляючи в (2.3.5.1) формули (2.3.5.2), (2.3.5.3) та (2.3.5.4) отримаємо:

$$\lambda = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 c S}{d} \frac{U_{max}}{I_{max}}. \quad (2.3.5.5)$$

Підставляючи значення в (2.3.5.5), отримаємо:

$$\lambda = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,08}{0,001} \cdot 100 = 933 \text{ (м)}.$$

### Задачі для самостійного розв'язування

1. Написати рівняння гармонічного коливального руху з амплітудою 5 см і періодом 8 с, якщо початкова фаза коливальних дорівнює а) 0; б)  $\frac{\pi}{2}$ ; в)  $\pi$ ; г)  $\frac{3\pi}{2}$ ; д)  $2\pi$ .
2. Амплітуда гармонічного коливання 5 см, період 4 с. Знайти максимальну швидкість і прискорення точки яка здійснює коливання.
3. Дві пружини, коефіцієнт жорсткості яких 2 Н/м і 8 Н/м з'єднано один раз послідовно, другий раз паралельно. У скільки разів будуть відрізнятися періоди коливань тягарця на таких пружинах?
4. Знайти ємність конденсатора у коливальному контурі, якщо за індуктивності 50 мкГн контур настроєний на довжину хвилі електромагнітних коливань 300 м.

5. На який діапазон довжин хвилі можна налаштувати коливальний контур, якщо його індуктивність 2 мГн, а ємність може змінюватися від 69 пФ до 533 пФ?
6. Знайти довжину хвилі коливання, період якого  $T = 10^{-14}$  с. Швидкість поширення коливання  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.
7. Як зміниться період вільних коливань в контурі, якщо індуктивність зменшити в два рази, а ємність збільшити у 8 разів?
8. Яку індуктивність потрібно ввімкнути в коливальний контур, щоб при ємності 2 мкФ одержати частоту 1000 Гц?
9. Моток дроту з індуктивністю 35 мГн вмикають в мережу змінного струму. Визначити індуктивний опір мотка дроту при частоті 60 Гц.
10. Електромагнітні хвилі розповсюджуються в діелектричному середовищі з швидкістю  $2 \cdot 10^8$  м/с. Яка довжина хвилі, якщо у вакуумі вона дорівнює 6 м?
11. Амплітуда гармонічних коливань матеріальної точки 2 см, повна енергія коливань 0,3 мкДж. При якому зміщенні від положенні рівноваги на точку діє сила 22,5 мкН?
12. Написати рівняння руху, яке відбувається в результаті додавання двох однаково направлених гармонічних коливань з однаковим періодом 8 с і однаковою амплітудою 0,02 м. Різниця фаз між цими коливаннями  $\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\pi}{2}$ . Початкова фаза одного з цих коливань дорівнює нулю.
13. Звукові коливання мають частоту 500 Гц і амплітуду 0,25 мм, поширюються в повітрі. Довжина хвилі 70 см. Знайти швидкість поширення коливань і максимальну швидкість частин повітря.
14. Котушка індуктивності 30 мкГн з'єднана з плоским конденсатором з площею пластин  $0,01 \text{ м}^2$  і відстанню між ними 0,1 мм. Знайти діелектричну проникність середовища, яке заповняє простір між пластинами, якщо контур налаштований на довжину хвилі 750 м.

15. Рівняння зміни з часом різниці потенціалів на обкладках конденсатора в коливальному контурі має вигляд  $U = 50 \cos 10^4 \pi t \text{ В}$ . Ємність конденсатора 0,1 мкФ. Знайти період коливань, індуктивність контуру, закон зміни з часом струму в колі, довжину хвилі, яка відповідає цьому контуру.

16. Котушка довжиною 50 см і площею поперечного перерізу  $10 \text{ см}^2$  ввімкнена в коло змінного струму з частотою 50 Гц. Кількість витків котушки 3000. Знайти опір котушки, якщо зсув фаз між напругою і струмом  $60^\circ$ .

17. Конденсатор і електрична лампочка сполучені послідовно і ввімкнені в коло змінного струму з напругою 440 В і частотою 50 Гц. Яку ємність повинен мати конденсатор для того, щоб через лампочку протікав струм 0,5 А і падіння потенціалу на ній було рівне  $U_n = 110 \text{ В}$ ?

18. Знайти формули для повного опору кола  $Z$  і зсуву фаз між напругою і струмом при різних способах ввімкнення опору, ємності і індуктивності. Розглянути випадки:

- а) опір і ємність ввімкнені послідовно;
- б) опір і ємність ввімкнені паралельно;
- в) опір і індуктивність ввімкнені послідовно;
- г) опір і індуктивність ввімкнені паралельно;
- д) опір, індуктивність і ємність ввімкнені послідовно.

19. В коло змінного струму з напругою 220 В і частотою 50 Гц ввімкнені послідовно ємність 35,4 мкФ, опір 100 Ом і індуктивність 0,7 Гн. Знайти струм в колі і падіння напруги на ємності, опорі, і індуктивності.

20. Вантаж масою 400 г здійснює коливання на пружині жорсткістю 250 Н/м. Амплітуда коливань 15 см. Знайти повну механічну енергію коливань і найбільшу швидкість руху вантажу.

21. До пружини підвішений вантаж. Максимальна кінетична енергія коливань вантажу 1 Дж. Амплітуда коливань 5 см. Знайти жорсткість пружини.

22. Конденсатор ємністю 10 мкФ зарядили до напруги  $U_1 = 400 \text{ В}$  і під'єднали до котушки. Після цього в контурі виникли загасальні коливання.

Яка кількість теплоти виділиться в контурі за час, протягом якого амплітуда напруги зменшиться у 2 рази?

23. Напруга в колі змінного струму змінюється за законом  $U = 300 \sin 100\pi t$  (В). Яка кількість теплоти виділяється в електроплитці з активним опором 70 Ом, яку ввімкнено в коло, за час, що дорівнює періоду зміни струму.

24. Повна енергія тіла, яке виконує гармонічні коливання, дорівнює 30 мкДж; максимальна сила, яка діє на тіло,  $F_{max} = 1,5$  мН. Написати рівняння руху цього тіла, якщо період коливань  $T = 2$  с і початкова фаза  $\varphi = \frac{\pi}{3}$ .

25. Період коливань у контурі дорівнює  $10^{-5}$  с. Який максимальний струм в котушці, якщо максимальна напруга на пластинах конденсатора 900 В? Максимальна енергія електричного поля  $9 \cdot 10^{-4}$  Дж.

26. У коливальному контурі, індуктивність якого 0,01 Гн, заряд конденсатора зменшується в 10 раз за період  $10^{-5}$  с. Визначити опір контуру.

27. Коливальний контур складається з конденсатора ємністю 2,22 нФ і котушки довжиною 20 см з мідного дроту діаметром 0,5 мм. Знайти логарифмічний декремент затухання коливань.

28. Решето комбайна робить в горизонтальній площині вимушені коливання з періодом 0,4 с. Коли амплітуда коливань досягне 1 см, зерно, що сиплеться з нього починає ковзати. Визначити коефіцієнт тертя спокою зерна на решеті.

29. Звук грому дійшов до рибалки через 12 с після того, як він помітив блискавку. На якій відстані від рибалки виникла блискавка?

30. Знайти відношення енергії магнітного поля коливального контуру до енергії його електричного поля для моменту часу  $T/8$ .

## РОЗДІЛ 3. ВІРТУАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ

### 3.1. Заряди і поля

Теми:

- Електричне поле.
- Електростатика.
- Еквіпотенціальний.
- Електростатичний потенціал.
- Електричний заряд.
- Напруга.

Приклади навчальних цілей:

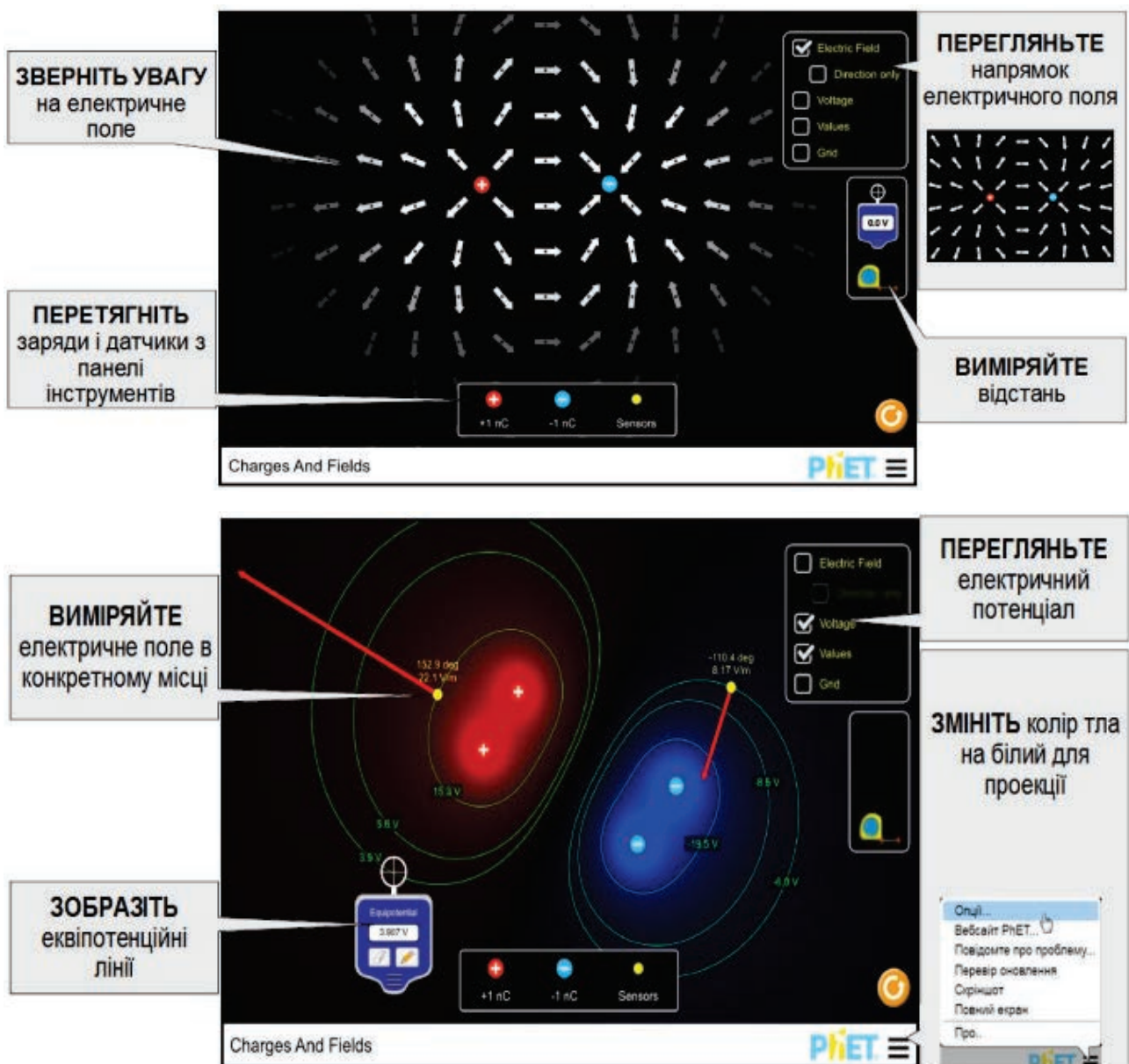
- Визначте змінні, які впливають на взаємодію заряджених тіл.
- Передбачте, як заряджені тіла будуть взаємодіяти.
- Опишіть силу і напрям електричного поля навколо зарядженого тіла.
- Використайте діаграми і вектори для того, щоб допомогти пояснити взаємодію.

Інформаційні ресурси:

- <https://phet.colorado.edu/uk/simulations/charges-and-fields>.

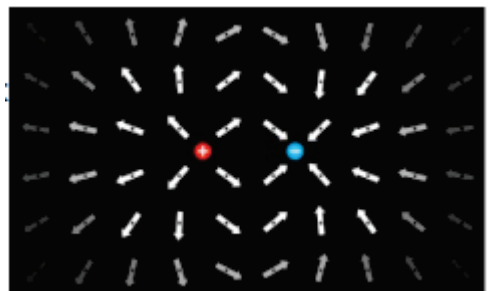
Інструкції щодо використання:

В симуляції *Заряди і поля* студенти досліджують електростатику, розміщуючи позитивні та негативні заряди і спостерігаючи за результуючим електричним полем, напругою та еквіпотенціальними лініями.



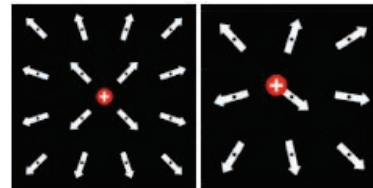
### Спрощення в моделюванні:

- Заряди вважаються закріпленими, де б вони не були розміщені.
- Електричне поле відображається за допомогою масиву стрілок, прикріплених до сітки. Яскравість стрілок вказує на величину поля. Це уявлення дозволяє обговорювати напрямок і величину електричного поля.
- Сітка розташована таким чином, що якщо один заряд розміщується на великому перехресті, електричне поле буде виглядати як класичне зображення підручника (ліворуч), в той час, як заряд,



що міститься поза сіткою, може виглядати дивно (хоча все ще правильно) на перший погляд (праворуч).

- Опція «Тільки напрям» видаляє градієнт яскравості зі стрілок ЕП, щоб дозволити досліджувати напрямок електричного поля окремо від його величини.



- Датчики можна використовувати для виявлення точної величини та напрямку електричного поля в будь-якому місці.
- Заряди можна розміщувати один над одним. Якщо пара  $+/-$  перекривається, електричне поле стане нульовим. Якщо три або більше  $+/-$  пар перекриваються, в симуляції може виникнути помилка.
- Електростатичний потенціал може відображатися за допомогою прапорця *Напруга (Voltage)*.
- Чим яскравіше колір, тим більша величина напруги. Позитивні напруги червоні, а негативні – сині, чорні – 0 В (хоча напруги, які відносно невеликі, можуть також виглядати чорними).



Приклади завдань студентами для дослідження:

- Створіть заряд  $+2$  нКл (або  $+3$  нКл,  $-2$  нКл,  $-3$  нКл).
- Передбачте напрямок і величину датчика до того, як його розміщувати.
- Визначте, де найбільше електричне поле для двох протилежних зарядів на одній лінії. Чи є точка, де електричне поле дорівнює нулю?
- Розробити експеримент для визначення співвідношення між відстанню, величиною заряду та силою електричного поля навколо одного заряду.
- Виберіть конфігурацію заряду з принаймні двома іншими зарядами і передбачте, як електричне поле навколо зарядів буде виглядати в чотирьох різних точках. Перевірте прогноз за допомогою векторного додавання.
- Побудуйте конденсатор з паралельною пластиною і перевірте електричне поле між пластинами.

- Визначіть фактори, які сприяють великому електричному потенціалу (напрузі).
- Досліджуйте поведінку електричного поля вздовж екіпотенціальної лінії.

### 3.2. Закон Ома

Теми:

- Закон Ома.
- Схеми.
- Струм.
- Опір.
- Напруга.

Приклади навчальних цілей:

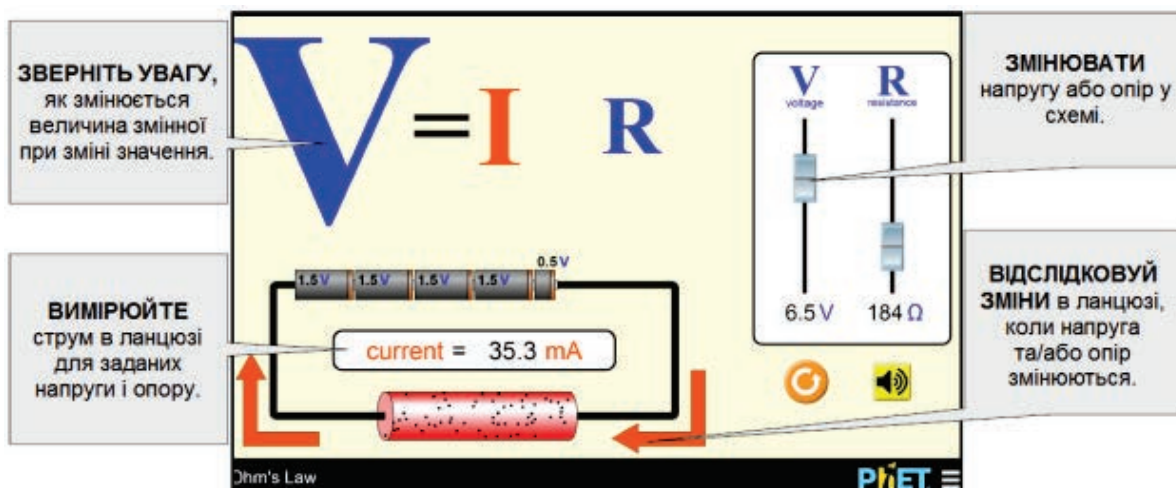
- Передбачте, як змінюється струм, коли опір в колі незмінний, а напруга змінюється.
- Передбачте, як буде змінюватися струм, коли напруга в колі незмінна, а опір змінюється.

Інформаційні ресурси:

- <https://phet.colorado.edu/uk/simulations/ohms-law>.

Інструкції щодо використання:

У симуляції *Закон Ома* учні вивчають, як зміна напруги або опору впливає на струм у ланцюзі.



Спростення в моделюванні:

- Чорні точки в дроті являють собою домішки в металевій решітці. Матеріали з високою щільністю домішок мають більшу ймовірність зіткнень між електронами і катіонами в решітці, що призводить до більш високого питомого опору.
- Оскільки довжина і площа резистора не змінюються, повзунок опору контролює питомий опір матеріалу.

Приклади завдань студентами для дослідження:

- Опишіть, що відбувається з струмом в ланцюзі, коли напруга збільшується. Що відбувається, коли опір зменшується?
- Чи зміна напруги в ланцюзі призводить до зміни опору ланцюга? Чому так чи чому ні?
- Поясніть, чому струм і опір обернено пропорційні.

### 3.3. Постійний струм

Теми:

- Послідовний контур.
- Паралельний ланцюг.
- Закон Ома.
- Закони Кіргофа.

Приклади навчальних цілей:

- Досліджуйте основні поняття з електрики.
- Поясніть основні закономірності в колі при послідовному та паралельному з'єднанні.
- Використовуйте амперметр та вольтметр щоб зняти покази.
- Надайте пояснення вимірювань і співвідношень в схемах.
- Побудуйте ланцюги зі схем.
- Визначте, чи є звичайні об'єкти провідниками чи ізоляторами.

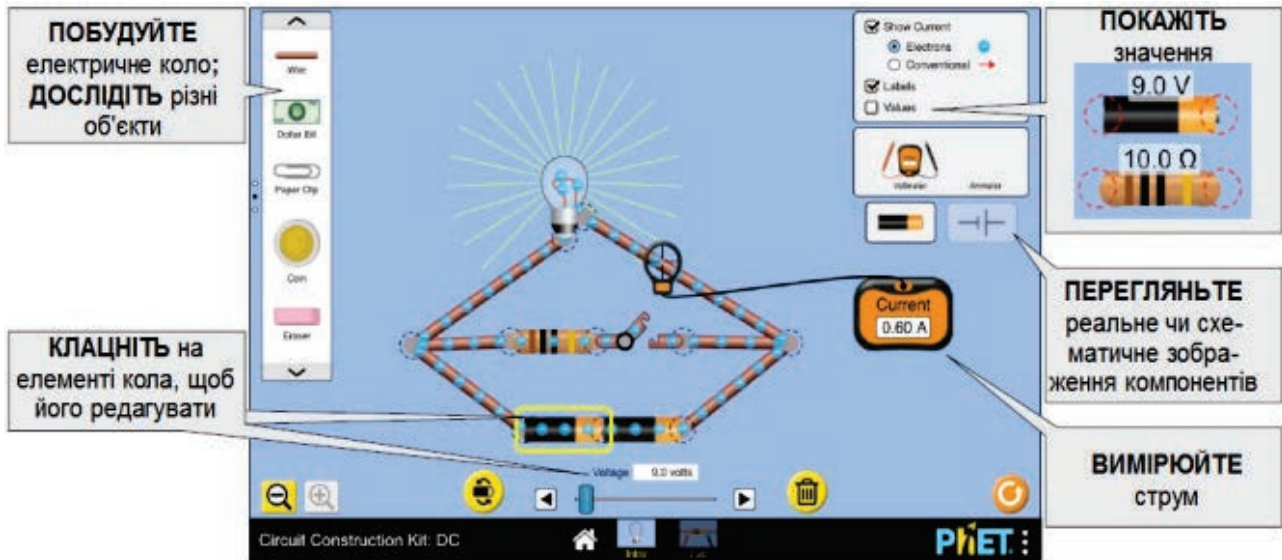
Інформаційні ресурси:

- <https://phet.colorado.edu/uk/simulations/circuit-construction-kit-dc>.

## Інструкції щодо використання:

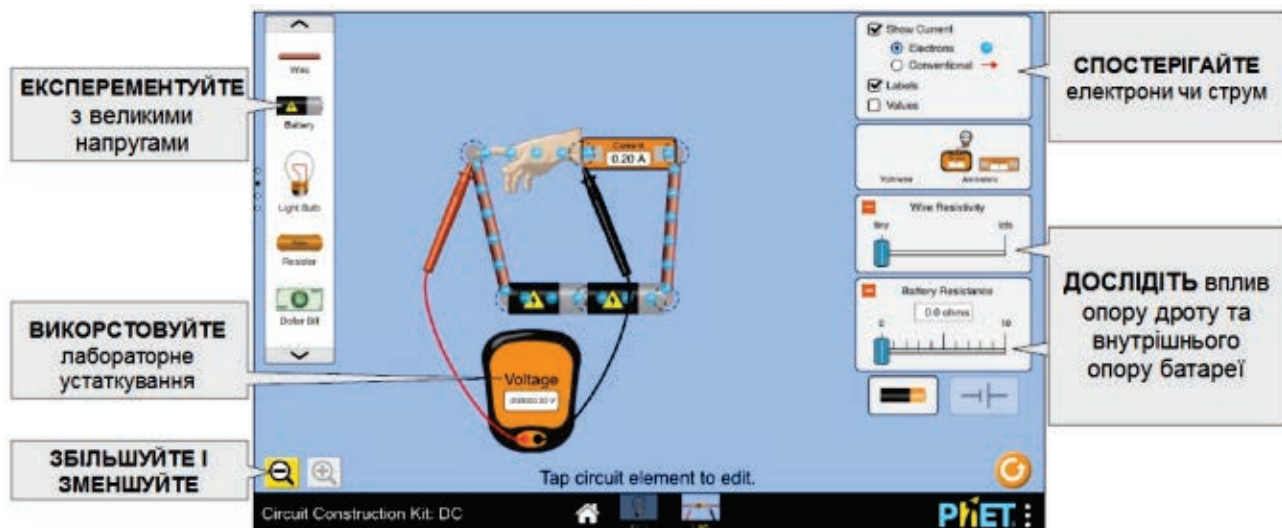
### Вкладка *Вступ*

Створюйте схеми з бабареями, лампочками, резисторами та перемикачами. Дослідіть співвідношення між напругою, струмом і опором.



### Вкладка *Лабораторія*

Експериментуйте з провідниками та ізоляторами, а також проводьте вимірювання лабораторним обладнанням.



## Спрощення в моделюванні:

- І електрони, і традиційне подання струму подібні до мультиплікаційного зображення і неідеально моделюють струм у ланцюзі. Їх швидкість і густина є наближеними, і їх не слід сприймати буквально. Поточна анімація буде призупинена, коли елемент схеми перетягується.

- Зображення пожежі означає коротке замикання або дуже великий струм (більше 15 ампер). Коли струм дуже великий, моделювання не може належним чином анімувати струм, тому швидкість моделювання буде зменшена, і на екрані з'явиться попередження.
- Дроти не ідеальні (мінімальний питомий опір  $10^{-5}$  Ом), а довгі дроти можуть впливати на струм у ланцюзі, оскільки опір пропорційний довжині. Щоб знайти опір для будь-якого сегмента дроту в межах повної схеми, виміряйте струм і напругу і використовуйте закон Ома для розрахунку опору.
- Якщо паралельно введений короткий проміжок, то на решті ланцюга, ймовірно, продовжуватиметься ненульовий струм (через питомий опір дроту), але електрони виявляються «замороженими» (через зниження швидкості анімації).
- Неконтактні амперметри (наприклад, для змінного/постійного струму) існують, хоча зазвичай використовуються для вимірювання  $\sim 1$ -1000 ампер. Для зручності зонд може читати поверх всіх елементів схеми, включаючи з'єднані батареї і лампочки. Віртуальна лабораторна версія цієї симуляції не включає безконтактний амперметр.
- Коли струм (0 А, 0,02 А), третю десяткову позначку буде показано при показах амперметра.
- Зонди вольтметра зчитують в будь-якій точці вершин компонента ланцюга. Іноді це може створити ілюзію, що зонди не контактують з провідними частинами компонента.
- Батареї з внутрішнім опором моделюються послідовно як батарея і резистор. Таким чином, падіння напруги на батареї в повній схемі буде дорівнювати нулю (якщо опір дроту не буде високим).
- Кольорові смуги на резисторах точно представляють опір в межах  $\pm 5\%$ , як зазначено зоною допуску золота.
- Олівець має опір 25 Ом, який має його ядро (графіт/клей), а не його дерев'яний корпус.

- Лампочка є лампою розжарення (омічна), хоча для пізніших версій буде додана більш реалістична неомічна лампочка.
- Яскравість лампочки пропорційна потужності через лампу ( $P = V^2 / R$ ), а максимальна яскравість досягається при 2000 Вт.

Приклади завдань студентами для дослідження:

- Створіть схему для включення лампочки.
- Передбачте, що станеться з яскравістю лампочки, коли змінюється напруга.
- Знайдіть спосіб підключення двох лампочок в ланцюзі так, щоб: (а) якщо одна лампочка від'єднана, обидві лампочки згасають, і (b) якщо одна лампочка від'єднана, інша лампочка буде світитися.
- Порівняйте схему з двома послідовно підключеними резисторами до контуру з двома паралельно з'єднаними резисторами. Опишіть, що відбувається з струмом і напругою на кожному резисторі.
- Поясніть переваги і недоліки послідовних і паралельних ланцюгів.
- Створіть експеримент, щоб визначити, які об'єкти є ізоляторами і які є провідниками.
- Визначте, як збільшити швидкість електронів або змінити напрямок їх руху. Поясніть свій метод.
- Що представляє вогонь в цій симуляції?
- Передбачте, що відбувається з струмом в ланцюзі при зміні опору батареї або опору дроту.

### **3.4. Лабораторія конденсаторів: основи**

Теми:

- Паралельний плоский конденсатор.
- Ємність.
- RC-контур.
- Схеми.

Приклади навчальних цілей:

- Поясніть співвідношення між напругою, зарядом, енергією, що зберігається, та ємністю.
- Передбачте, як змінюється ємність, коли змінюється площа пластини або відстань між пластинами.
- Опишіть, як заряд проходить з конденсатора в лампочку.

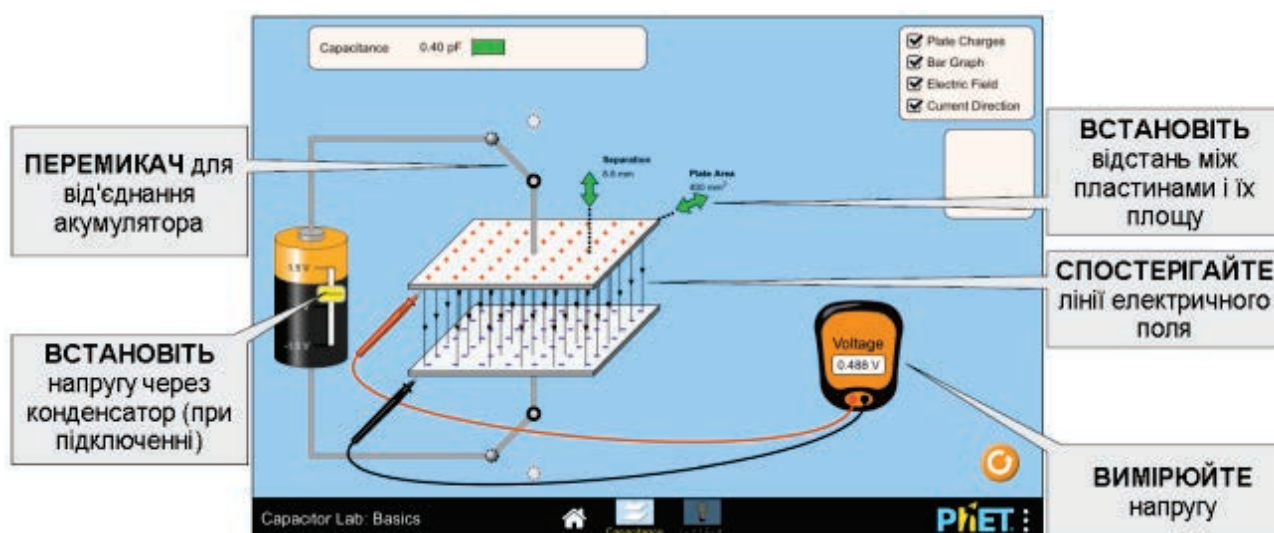
Інформаційні ресурси:

- <https://phet.colorado.edu/uk/simulations/capacitor-lab-basics>.

Інструкції щодо використання:

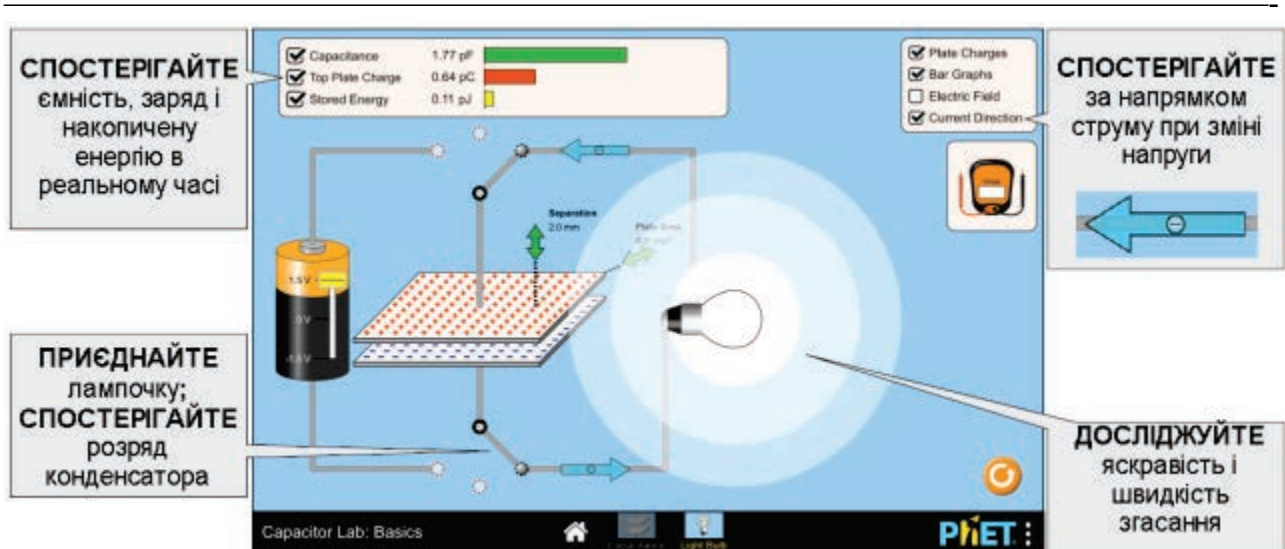
Вкладка *Ємність*

Дослідіть взаємозв'язок між ємністю, відстанню між пластинами і площею пластин.



Вкладка *Лампочка*

Підключіть конденсатор до лампочки і експериментуйте з розрядкою в RC-ланцюзі.



### Спрощення в моделюванні:

- Під час зарядки конденсатора опір явно не існує в моделі. Конденсатор заряджається миттєво, що можна пояснити дуже низьким внутрішнім опором акумулятора і дротів. Це було зроблено для того, щоб студенти побачили негайно зворотний зв'язок під час зарядки конденсатора.
- Опір лампочки надзвичайно великий ( $5 \times 10^{11} \Omega$ ), так що можна спостерігати швидкість згасання лампочки.
- Батарея використовується для встановлення напруги на конденсаторі, який може мати побічні ефекти. Наприклад, підключення зарядженого конденсатора до 0 В батареї відразу розряджає конденсатор.
- Електричне поле ідеалізується як поле конденсатора нескінчених паралельних пластини, а крайові поля не представлені. Щільність ліній електричного поля відображає його величину, і є мінімум чотири лінії Е-поля (по одному на квадрант конденсатора).
- Стрілки струму з'являються, коли відбувається зміна напруги в повній схемі, і вказують напрямок струму, але не його величину.
- Через обмеження точності, деякі значення можуть бути нульовими (наприклад, нульова енергія, що відбувається, коли лампочка гасне). Щоб звести до мінімуму цю проблему, повзунок батареї буде прив'язаний до нуля при розрядці, якщо напруга менше 0,150 В.
- Вся металева частина зонда вольтметра є провідною, тому можна

зіткнутися з ситуаціями, коли вольтметр показує деяку величину, незважаючи на те, що кінчик розташований у повітрі або на ізоляторі (наприклад, скло лампи або корпус батареї).

- Вольтметр буде показувати 0 В, коли його щупи торкаються або знаходяться дуже близько один до одного.
- Колонка графіка відображає абсолютне значення заряду на верхній пластині. Колір смуги вказує на знак цих зарядів (червоний = позитивний, синій = негативний).
- Коли конденсатор відключений (перемикач у вертикальному положенні), його заряд зберігається.

Приклади завдань студентами для дослідження:

- Знайдіть спосіб зміни ємності конденсатора.
- Передбачте, що відбудеться з ємністю, коли змінюється відстань між пластинами або площа пластин.
- Опишіть, що відбувається з зарядженим конденсатором, коли він відключений від акумулятора.
- Визначте співвідношення між напругою, ємністю, зарядом пластини і запасеною енергією.
- Розробити експеримент для визначення того, що відбувається з зарядом пластини, запасеною енергією і напругою, коли змінюється ємність відключеного (але зарядженого) конденсатора.
- Опишіть, що відбувається з яскравістю лампи, коли конденсатор розряджається.
- Визначте, як максимізувати (а) початкову яскравість лампи, і (б) кількість часу, коли лампочка залишається світитися.

### 3.5. Закон Фарадея

Теми:

- Закон Фарадея.
- Магнітні поля.
- Магніти.

Приклади навчальних цілей:

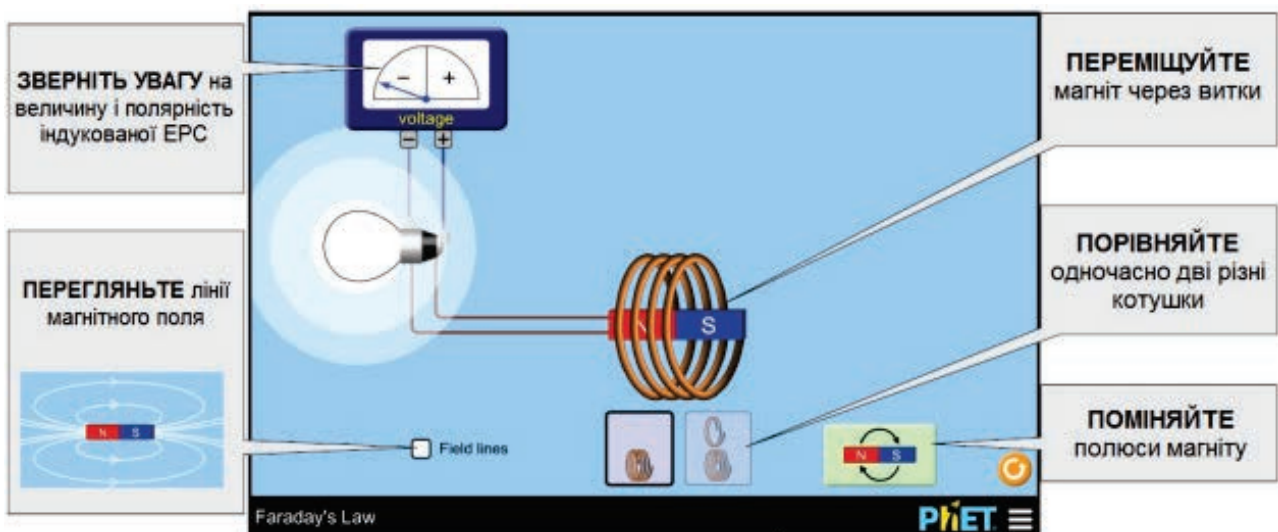
- Поясніть, що відбувається, коли магніт проходить через котушку з різною швидкістю, і як це впливає на яскравість лампи та величину, і знак напруги.
- Поясніть різницю між переміщенням магніту через котушку з правого боку в порівнянні таким же переміщенням з лівого боку.
- Поясніть різницю між рухом магніту через велику котушку у порівнянні з таким же рухом через меншу котушку.

Інформаційні ресурси:

- <https://phet.colorado.edu/uk/simulations/faradays-law>.

Інструкції щодо використання:

За симуляцією *Закон Фарадея* студенти можуть досліджувати, як зміна магнітного потоку може виробляти електроенергію.



Приклади завдань студентами для дослідження:

- Скільки є способів викликати індукцію? Поясніть ваш метод(и), посилаючись на докази з моделювання.

- Намалюйте дві різні ситуації, в яких загоряється лампочка. Вкажіть N/S полюси магніту і напрямок його руху. Яким є напрямок індукованого струму в кожному випадку?
- Передбачити, що відбувається з яскравістю лампи, коли кількість витків у котушці зменшиться вдвічі, але швидкість магніту залишається незмінною.
- Як швидкість магніту впливає на яскравість лампи?

## РОЗДІЛ 4. ТЕСТОВІ ЗАВДАННЯ

### 4.1. Електростатика

#### Закон Кулона

1. Яке з нижче перерахованих висловів є фундаментальною властивістю електричного заряду?

- a) Електричний заряд є релятивістські інваріантним: його величина не залежить від вибору системи відліку;
- b) Електричний заряд існує у двох видах: позитивний та негативний;
- c) Електричний заряд утворює навколо себе електричне поле;
- d) В будь-якій електрично ізольованій системі алгебраїчна сума зарядів не змінюється;
- e) Кожен процес зарядження тіл є процесом розділення електричних зарядів: на одному з тіл з'являється залишок позитивного, на іншому – негативного зарядів.

2. Виберіть правильне визначення поняття точковий «заряд».

- a) Точковим зарядом є заряджене тіло, розміри якого більші порівняно з відстанями від нього до інших заряджених тіл;
- b) Точковим зарядом є заряджене тіло, розмірами якого можна знехтувати порівняно з відстанями від нього до інших незаряджених тіл;
- c) Точковим зарядом є заряджене тіло, розмірами якого можна знехтувати порівняно з відстанями від нього до інших заряджених тіл;
- d) Точковим зарядом є заряджене тіло, розміри якого малі порівняно з відстанню, де розглядаються його електричні характеристики;
- e) Точковим зарядом є заряджене тіло будь-яких розмірів.

3. Яке з нижче приведених тверджень є правильним?

- a) Будь-який заряд можна розглядати як сукупність елементарних зарядів;
- b) Заряд є неподільним;

- c) Заряд є релятивістські інваріантним;
  - d) Сукупність зарядів не може розглядатися як єдине ціле;
  - e) Заряд може бути як позитивним, так і негативним.
4. Яка з нижчезазначених формул виражає закон Кулона в СІ?

- a)  $\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{e}_{12};$
- b)  $\vec{F}_{12} = \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{e}_{12};$
- c)  $\vec{F}_{12} = -k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{e}_{12};$
- d)  $\vec{F}_{12} = -\frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{e}_{12};$
- e)  $\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} e_{12}.$

5. Як змінюється сила взаємодії двох точкових зарядів при перенесенні їх із середовища з відносною діелектричною проникністю  $\epsilon$  у вакуум (відстань між зарядами  $r = \text{const}$ )?

- a) Збільшиться в  $\epsilon$  разів;
  - b) Зменшиться в  $\epsilon_0 \epsilon$  разів;
  - c) Зменшиться в  $\epsilon$  разів;
  - d) Збільшиться в  $\epsilon_0 \epsilon$  разів;
  - e) Збільшиться в  $4\pi \epsilon_0 \epsilon$  разів.
6. Якою за характером є кулонівська сила?
- a) Тензорною;
  - b) Частково тензорною;
  - c) Центральною;
  - d) Консервативною;
  - e) Тензорною та центральною.

### Напруженість електричного поля

7. Встановіть відповідність:

- 1.  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{2\tau}{r};$       а) Напруженість поля рівномірно зарядженої нескінченної площини;



a)  $\vec{E} = -\text{grad}\varphi;$

b)  $\rho = \frac{dq}{dv};$

c)  $\text{div}\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0};$

d)  $\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\varepsilon_0};$

e)  $\oint_l \vec{E} d\vec{l} = 0.$

13. Виберіть правильне визначення поняття теорема «Гаусса».

a) Повний потік вектора напруженості електричного поля крізь будь-яку замкнену поверхню дорівнює алгебраїчній сумі зарядів, що охоплені цією поверхнею і створюють цей потік, ділений на  $\varepsilon_0$ ;

b) Потік вектора напруженості крізь замкнену поверхню, що оточує заряди, які створюють потік, дорівнює алгебраїчній сумі цих зарядів, ділений на  $\varepsilon_0$ ;

c) Потік вектора електричної індукції  $\vec{D}$  крізь замкнену поверхню дорівнює алгебраїчній сумі зарядів, що охоплені цією поверхнею і створюють цей потік;

d) Повний потік вектора напруженості електричного поля крізь довільну замкнену поверхню дорівнює алгебраїчній сумі зарядів, що охоплені цією поверхнею, ділений на  $\varepsilon_0$ ;

e) Повний потік вектора напруженості електричного поля крізь будь-яку поверхню дорівнює алгебраїчній сумі зарядів, що охоплені цією поверхнею, поділеної на  $\varepsilon_0$ .

14. Яка з нижченаведених формул описує значення напруженості електростатичного поля в точці?

a)  $E = -\frac{d\varphi}{dl};$

b)  $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0} \frac{q}{r^3} \vec{r};$

c)  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0};$

d)  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r^2};$

e)  $E = \frac{\Phi_E}{S \cdot \cos \alpha}.$

15. Яка з наведених нижче формул описує теорему про циркуляцію вектора напруженості електростатичного поля?

a)  $E = -\frac{d\varphi}{dr};$

b)  $\Phi = \oint_S \vec{E} d\vec{S};$

c)  $\oint_S \vec{E} d\vec{S} = 0;$

d)  $\oint_l \vec{E} d\vec{l} = 0;$

e)  $\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\epsilon_0}.$

16. Яким виразом описується абсолютне значення напруженості електростатичного поля у випадку накладання двох електричних полів?

a)  $E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \alpha};$

b)  $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2;$

c)  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r^2};$

d)  $E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2 \cos \alpha};$

e)  $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r^3} \vec{r}.$

17. Виберіть правильну відповідь в нижчезазначених міркуваннях:

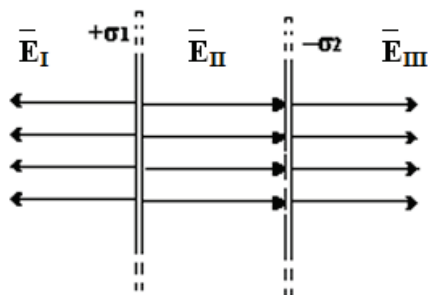
a) Силова лінія електростатичного поля – це траєкторія руху у цьому полі позитивного заряду;

b) Силові лінії електростатичного поля замкнуті, вони починаються на позитивному заряді та закінчуються на негативному;

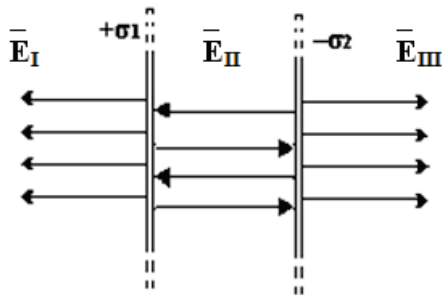
c) Силові лінії електростатичного поля – це неперервні лінії, дотичні до яких в кожній точці співпадають з напрямком вектора напруженості поля;

d) Силові лінії електростатичного поля перетинаються, оскільки в кожній точці поля вектор напруженості має лише один напрямок.

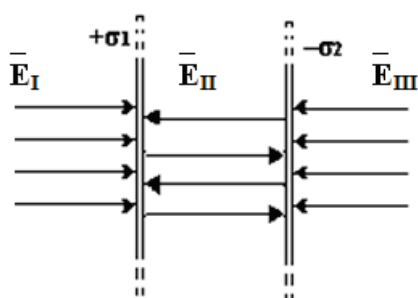
18. На якому з рисунків силові лінії електростатичного поля двох паралельних різнойменно заряджених пластин напрямлені правильно?



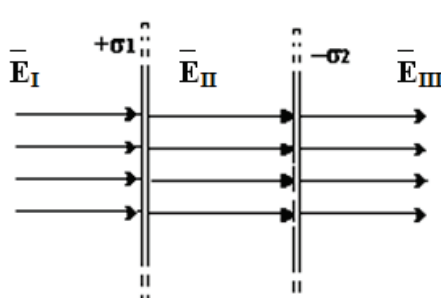
a)



b)



c)



d)

e) Свій варіант відповіді.

19. Якщо в поле позитивного електричного заряду внести рівний йому за модулем негативний заряд, тоді напруженість поля в точці  $A$ ...

- a) Збільшиться в 4 рази;
- b) Збільшиться в 2 рази;
- c) Дорівнюватиме нулю;
- d) Зменшиться в 4 рази;
- e) Зменшиться в 2 рази.

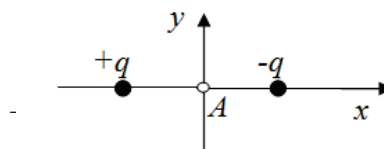


Рис. 4.1.1.

**Потенціал електричного поля. «Градiєнт» потенціалу. Потенціальна енергія**

20. Які з наведених нижче формул описують значення потенціалу поля в певній точці простору?

- a)  $\partial\varphi = -E\partial r$ ;

b)  $\varphi = \frac{A}{q_{np}};$

c)  $\varphi = \frac{W_p}{q_{np}};$

d)  $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r};$

e)  $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{R}.$

21. Який з нижченаведених виразів описує потенціал поля системи зарядів, розподілених нерівномірно по поверхні?

a)  $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \oint_V \frac{\rho dV}{r};$

b)  $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \oint_L \frac{\lambda dl}{r};$

c)  $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \oint_V \frac{\rho dV}{r};$

d)  $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i};$

e)  $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \oint_S \frac{\sigma dS}{r}.$

22. Як формулюється принцип суперпозиції для потенціалу поля?

a) Геометричне місце точок поля, потенціали в яких є однаковими.

b) Потенціал поля, створений системою зарядів, дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів, створених кожним зарядом окремо.

c) Потенціал поля, створений системою зарядів, дорівнює векторній сумі потенціалів, створених кожним зарядом окремо.

d) Геометричне місце точок поля, потенціал в яких дорівнює нулю.

e) Потенціал поля, створений системою зарядів, дорівнює різниці потенціалів, створених кожним зарядом окремо.

23. Який зв'язок між напруженістю та потенціалом електричного поля в загальному випадку?

a)  $E = -\frac{\partial \varphi}{\partial x};$

b)  $\vec{E} = -\frac{d\varphi}{dr} \frac{\vec{r}}{r};$

c)  $E = -\frac{\Delta \varphi}{\Delta r};$

d)  $d\varphi = \vec{E} d\vec{l}$ ;

e)  $\vec{E} = -\text{grad}\varphi$ .

24. Яку величину називають градієнтом потенціалу?

a) Величина, що чисельно дорівнює швидкості зміни потенціалу на одиницю відстані;

b) Величина, що чисельно дорівнює зміні напруженості на одиницю відстані;

c) Величина, що чисельно дорівнює вектору напруженості поля;

d) Величина, що чисельно дорівнює зміні потенціальної енергії на одиницю відстані;

e) Величина, що чисельно дорівнює зміні напруженості поля на одиницю відстані;

25. Виберіть правильну відповідь в нижченаведених міркуваннях:

a) Еквіпотенціальні поверхні не ортогональні до силових ліній;

b) Робота по переміщенню заряду по одній і тій же еквіпотенціальній поверхні дорівнює нулю;

c) Навколо будь-якої системи зарядів можна провести тільки одну еквіпотенціальну поверхню;

d) Еквіпотенціальні поверхні є силовими лініями площини.

26. Як формулюється величина потенціалу електричного поля?

a) Величина, що чисельно дорівнює відношенню потенціальної енергії поля до величини одиничного позитивного точкового заряду в даній точці поля;

b) Величина, що показує, яку потенціальну енергію має одиничний позитивний заряд в даній точці поля;

c) Векторна величина, що дорівнює потенціальній енергії одиничного позитивного точкового заряду в даній точці поля;

d) Величина, що чисельно дорівнює відношенню одиничного позитивного точкового заряду в даній точці поля до потенціальної енергії поля заряду.

27. Якою характеристикою електричного поля є його потенціал?
- Векторною;
  - Силовую;
  - Кількісною;
  - Статистичною;
  - Енергетичною.
28. Який вираз потенціалу в точці поля, створеного точковим зарядом  $q$  на відстані  $r$  від цього заряду?
- $\Delta\varphi = -E\Delta r$ ;
  - $\varphi = \frac{W_p}{q}$ ;
  - $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r}$ ;
  - $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{R}$ ;
  - $\varphi = \frac{A_\infty}{q}$ .
29. Які існують способи графічного зображення електростатичних полів?
- За допомогою вектора напруженості поля;
  - За допомогою силових ліній;
  - За допомогою радіус-вектора, проведеного від точкового заряду в певну точку;
  - За допомогою потенціалу поля;
  - За допомогою еквіпотенціальних полів.
30. Як називають поверхні з однаковим потенціалом?
- Електричні;
  - Сферичні;
  - Еквіпотенціальні;
  - Замкнені;
  - Потенціальні.
31. Як напрямлений вектор градієнта потенціалу поля?
- У бік максимального зростання потенціалу;

- b) У бік зменшення потенціалу;
- c) У напрямку збільшення напруженості електричного поля;
- d) У напрямку збільшення різниці потенціалів;
- e) У напрямку зменшення напруженості поля.

32. Яке поле називають потенціальним?

- a) Якщо циркуляція вектора напруженості електричного поля по довільному замкненому контуру, є величиною сталою;
- b) Якщо потенціал електричного поля, створений системою зарядів, дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів, створених кожним із зарядів окремо;
- c) Якщо циркуляція вектора напруженості електричного поля по довільному контуру, є величиною сталою;
- d) Якщо циркуляція вектора напруженості електричного поля по довільному замкненому контуру дорівнює нулю;
- e) Якщо потік вектора напруженості електричного поля у вакуумі крізь замкнену поверхню дорівнює алгебраїчній сумі електричних зарядів, охоплених цією поверхнею.

33. Які поверхні називають екіпотенціальними?

- a) Геометричне місце точок поля, напруженість в яких дорівнює нулю;
- b) Геометричне місце точок поля, потенціал в яких є однаковим;
- c) Геометричне місце точок поля, потенціальна енергія в яких однакова;
- d) Геометричне місце точок поля, потенціал в яких дорівнює нулю;
- e) Геометричне місце точок поля, напруженість в яких є однаковою.

34. Що є прикладом екіпотенціальної поверхні?

- a) Заряджений провідник;
- b) Поверхня зарядженого провідника;
- c) Поверхня діелектрика;
- d) Незаряджений провідник;
- e) Одиничний заряд.

35. Як розподілені електричні заряди у просторі?

- a) Дискретно;
- b) Хаотично;
- c) Неперервно;
- d) Нерівномірно;
- e) Рівномірно.

36. На рисунку зображено графік зміни напруженості електричного поля при переміщенні вздовж координати  $Ox$ . Як змінюється вздовж цієї осі модуль потенціалу поля?

- a) Не змінюється;
- b) Зменшується лінійно з ростом координати;
- c) Збільшується лінійно з ростом координати;
- d) Збільшується не лінійно з ростом координати.

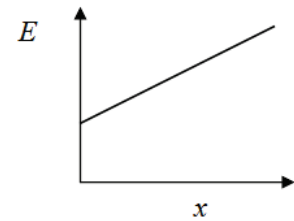


Рис. 4.1.2.

37. Встановіть правильні логічні пари:

- |    |                                                           |    |                                                                                         |
|----|-----------------------------------------------------------|----|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{r},$ | a) | Потенціал електричного поля;                                                            |
| 2. | $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{q}{R},$ | b) | Потенціал електричного поля, створеного точковим зарядом $q$ на відстані $r$ від нього; |
| 3. | $\varphi = \frac{W_p}{q}.$                                | c) | Потенціал електричного поля, створеного металевою сферою радіуса $R$ .                  |

38. Встановіть правильні логічні пари:

- |    |                                                                            |    |                                                                        |
|----|----------------------------------------------------------------------------|----|------------------------------------------------------------------------|
| 1. | $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \oint_V \frac{\rho dV}{r},$    | a) | Потенціал поля системи зарядів, розподілених нерівномірно по поверхні; |
| 2. | $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \oint_S \frac{\sigma dS}{r},$  | b) | Потенціал поля системи зарядів, розподілених нерівномірно лінійно;     |
| 3. | $\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \oint_L \frac{\lambda dl}{r}.$ | c) | Потенціал поля системи зарядів, розподілених нерівномірно по об'єму.   |

### Робота по переміщенню заряду в електростатичному полі

39. Який з наведених нижче виразів описує роботу, що здійснена силами електростатичного поля над зарядом  $q$  при переміщенні його з однієї точки поля в іншу в загальному випадку?

a)  $A_{1,2} = \int_1^2 \vec{F}(r) \vec{e}_r dl;$

b)  $A_{1,2} = qEl \cos \alpha;$

c)  $A_{1,2} = W_{p1} - W_{p2};$

d)  $A_{1,2} = q\varphi;$

e)  $A_{1,2} = \int_1^2 \vec{F}(r) d\vec{l}.$

40. У випадку, коли робота по переміщенню позитивного заряду  $q$  здійснюється силами поля, тоді робота є величиною...

a) Від'ємною;

b) Додатною;

c) Незмінною;

d) Дорівнює нулю.

41. Яка з нижченаведених формул описує роботу по переміщенню одиничного точкового заряду  $q'$  з точки 1 в точку 2?

a)  $A_{1,2} = q'El \cos \alpha;$

b)  $A_{1,2} = q'\varphi;$

c)  $A_{1,2} = q'(\varphi_1 - \varphi_2);$

d)  $A_{1,2} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right);$

e)  $A_{1,2} = W_{p1} - W_{p2}.$

42. Який з наведених нижче виразів описує теорему про циркуляцію вектора напруженості поля?

a)  $A_{1,2} = \sum_{i=1}^n A_i;$

b)  $\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0};$

c)  $\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0;$

d)  $\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i;$

e)  $dA = q_0 E dl \cos \alpha.$

43. Чому дорівнює потенціальна енергія заряду  $q'$  в полі, утвореному системою  $n$  точкових зарядів?

a)  $W_p = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n q_i \varphi_i;$

b)  $W_p = q' \varphi;$

c)  $W = \omega V;$

d)  $dW_p = -\delta A;$

e)  $W_p = q' \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r_i}.$

44. Від чого залежить робота по переміщенню електричного заряду  $q$  в електричному полі?

a) Від початкового положення заряду та форми траєкторії;

b) Тільки від початкового положення заряду;

c) Тільки від кінцевого положення заряду;

d) Від форми траєкторії переміщення заряду;

e) Від початкового та кінцевого положення заряду.

45. Який вигляд має теорема про циркуляцію вектора напруженості в диференціальній формі?

a)  $A = \oint_L q_0 E dl \cos \alpha;$

b)  $\oint_S \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i;$

c)  $\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0;$

d)  $\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0};$

e)  $\operatorname{rot} \vec{E} = 0.$

46. Встановіть правильні залежності:

|    |                                                    |             |    |                 |
|----|----------------------------------------------------|-------------|----|-----------------|
| 1. | Робота                                             | однорідного | a) | Матеріалу       |
|    | електростатичного поля при переміщенні провідника; |             |    |                 |
|    | в ньому заряду залежить від...                     |             | b) | Форми поверхні, |

2. Відношення заряду всередині якої знаходиться заряд; провідника до його потенціалу залежить с) Значення заряду на від... провіднику;

3. Повний потік вектора d) Траєкторії заряду. напруженості залежить від...

47. Встановіть відповідність:

- |    |                                                         |    |                                                                                    |
|----|---------------------------------------------------------|----|------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | $W_p = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \frac{qq'}{r};$ | a) | Вираз для потенціальної енергії заряду $q'$ в полі $n$ системи зарядів;            |
| 2. | $W_p = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i \varphi_i;$         | b) | Потенціальна енергія заряду, що знаходиться в точці поля з потенціалом $\varphi$ ; |
| 3. | $W_p = q'\varphi.$                                      | c) | Вираз для потенціальної енергії заряду $q'$ в полі створеного зарядом $q$ .        |

48. Встановіть відповідність:

- |    |                                                                                              |    |                                                                            |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|----------------------------------------------------------------------------|
| 1. | $A_{1,2} = q'El \cos \alpha;$                                                                | a) | Робота сил поля по переміщенню пробного заряду з точки 1 в точку 2;        |
| 2. | $A_{1,2} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right);$ | b) | Робота по переміщенню електричного заряду в однорідному електричному полі; |
| 3. | $A_{1,2} = q'\varphi.$                                                                       | c) | Робота сил поля по переміщенню пробного заряду у нескінченність.           |

### **Електроросмність. Конденсатори. З'єднання конденсаторів. Енергія конденсаторів**

49. Яку величину називають електроосмністю провідника?

a) Величина, що чисельно дорівнює зміні потенціалу по відношенню до заряду;

b) Величина, що чисельно дорівнює зарядові, який потрібен для зміни енергії поля;

c) Величина, що чисельно дорівнює потенціальній енергії, яку мав би в даній точці одиничний заряд;

d) Величина, що чисельно дорівнює зарядові, який потрібний для зміни потенціалу провідника на одиницю.

50. Ємність конденсатора залежить від...

a) Відстані між пластинами конденсатора;

b) Розмірів пластини конденсатора;

c) Геометричних розмірів конденсатора та діелектричної проникності речовини, що заповнює простір між пластинами;

d) Напруги між пластинами конденсатора.

51. Який фізичний зміст електроємності конденсатора?

a) Фізична величина, що характеризує енергію поля конденсатора;

b) Фізична величина, що характеризує дію електричного поля на заряд;

c) Фізична величина, що характеризує здатність двох провідників накопичувати електричний заряд;

d) Фізична величина, що характеризує електростатичне поле.

52. Який пристрій називають конденсатором?

a) Система двох рівномірно заряджених провідників, різних за абсолютним значенням та протилежних за знаком заряду;

b) Пристрій, що складається з двох паралельних металевих пластин площею  $S$  кожна, які розташовані на відстані  $d$  одна від одної;

c) Рівномірно заряджений провідник з великою кількістю рухомих зарядів;

d) Система двох рівномірно заряджених провідників, рівних за абсолютним значенням та протилежних за знаком заряду.

53. Яка величина залишається сталою при послідовному з'єднанні декількох конденсаторів?

- a) Потенціал;
- b) Напруга;
- c) Енергія конденсатора;
- d) Електроємність;
- e) Заряд.

54. Послідовне з'єднання конденсаторів використовують для...

- a) Збільшення енергії конденсаторів;
- b) Створення пробою конденсаторів;
- c) Зменшення електроємності батареї;
- d) Зменшення можливості пробою конденсаторів.

55. Як зміниться ємність плоского конденсатора, якщо між його обкладинками внести незаряджений металевий провідник?

- a) Збільшиться;
- b) Зменшиться;
- c) Не зміниться;
- d) Дорівнюватиме нулю.

56. Як називають величину при максимальному значенні якої, ще не відбувається пробій в конденсаторі?

- a) Пробивна напруга;
- b) Максимальна енергія;
- c) Максимальна ємність;
- d) Робоча напруга;
- e) Напруга джерела.

57. Яке з'єднання конденсаторів дає виграш в електроємності?

- a) Послідовне;
- b) Змішане;
- c) Паралельне;
- d) Змішане та послідовне;
- e) Змішане та паралельне.

58. Чому дорівнює енергія електростатичного поля в ізотропному середовищі?

- a)  $dW = \frac{1}{2} \varphi \rho dV$ ;
- b)  $dW = -\delta A$ ;
- c)  $dW = -q' d\varphi$ ;
- d)  $dW = \omega_e dV$ ;
- e)  $dW = \frac{qq'}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} dr$ .

59. Як називають енергію, що замкнена в одиниці об'єму електростатичного поля?

- a) Поверхнева густина енергії;
- b) Лінійна густина енергії;
- c) Об'ємна густина енергії;
- d) Густина енергії;
- e) Потенціальна енергія.

60. Чому дорівнює енергія системи вільних зарядів, що розподілені нерівномірно по об'єму діелектрика?

- a)  $W = \oint_V \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} dV$ ;
- b)  $W = \frac{1}{2} \varphi \sigma dS$ ;
- c)  $W = \frac{1}{2} \oint_V \rho \varphi dV$ ;
- d)  $\Delta W = \int_{r_1}^{r_2} dW$ ;
- e)  $W = \int_v w dV$ .

61. Де відбувається локалізація енергії поля?

- a) На заряді;
- b) В самому полі;
- c) Біля зарядженого провідника;
- d) В просторі;
- e) В конденсаторі.

62. Яка формула використовується для розрахунку ємності перелічених елементів?

- |                                   |                                                               |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 1. Плоского конденсатора;         | a) $C = \frac{Q}{j}$ ;                                        |
| 2. Відокремленого провідника;     |                                                               |
| 3. Сферичного конденсатора;       | b) $C = \frac{Q}{j_1 - j_2}$ ;                                |
| 4. Циліндричного конденсатора;    |                                                               |
| 5. Відокремленої провідної сфери. | c) $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$ ;                    |
|                                   | d) $C = 4\pi \epsilon_0 \epsilon R$ ;                         |
|                                   | e) $C = \frac{4\pi \epsilon_0 \epsilon R_1 R_2}{R_2 - R_1}$ ; |
|                                   | f) $C = \frac{4\pi \epsilon_0 \epsilon l}{\ln(R_2 / R_1)}$ .  |

#### 4.2. Основні закони постійного струму

63. Сформулюйте визначення поняття «електричний струм»:

- a) Електричний струм – це хаотичний рух електричних зарядів;
- b) Електричний струм – це упорядкований (спрямований) рух електричних зарядів;
- c) Електричний струм – це хаотичний рух позитивних зарядів;
- d) Електричний струм – це упорядкований (спрямований) рух позитивних зарядів;
- e) Електричний струм – це хаотичний рух негативних зарядів.

64. Виберіть правильне визначення густини струму:

- a) Густина струму – це кількість електрики, яка проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу;
- b) Густина струму – це кількість електрики, що проходить через одиницю площі перерізу провідника;
- c) Густина струму – це упорядкований рух позитивних зарядів, що проходять через поперечний переріз провідника за одиницю часу;

d) Густина струму дорівнює силі струму через одиницю площі поперечного перерізу провідника.

65. Назвіть причину виникнення постійного струму:

a) Щоб в провіднику протікав постійний струм, необхідно весь час підтримувати сталою різницю потенціалів;

b) Щоб в провіднику протікав постійний струм, необхідно весь час збільшувати опір провідника, пересуваючи заряди зовнішньою (неелектричною) силою;

c) Щоб в провіднику протікав постійний струм, необхідна наявність в провіднику заряджених частинок, які можуть переміщуватись в межах всього провідника;

d) Щоб в провіднику протікав постійний струм, необхідно весь час збільшувати опір провідника.

66. Виберіть правильне визначення однорідної ділянки кола:

a) Ділянка кола, на якій на носії струму діють сторонні сили, називається однорідною;

b) Ділянка кола, на якій збільшується напруга провідника, називається однорідною;

c) Ділянка кола, на якій струм залишається постійним, називається однорідною;

d) Ділянка кола, на якій опір провідника зменшується, називається однорідною;

e) Ділянка кола, на якій не діють сторонні сили, називається однорідною.

67. Що називається «вузлом»?

a) Вузол – це точка, в якій сходяться більш ніж два провідники;

b) Вузол – це точка, в якій сходяться тільки два провідники;

c) Вузол – це точка, в якій сходяться більш ніж два провідники, по яких течуть позитивні заряди;

d) Вузол – це точка, в якій сходяться більш ніж два провідники, по яких перміщуються електрони;

e) Вузол – це точка, в якій сходяться тільки два провідники, по яких течуть струми.

68. Виберіть правильну відповідь, яка вказує напрямок протікання струму (умовний):

a) Напрямок протікання струму співпадає з напрямком руху негативних зарядів, тобто від мінуса до плюса;

b) Напрямок протікання струму співпадає з напрямком руху позитивних зарядів, тобто від плюса до мінуса;

c) Напрямок протікання струму співпадає з напрямком руху негативних зарядів, тобто від плюса до мінуса;

d) Напрямок протікання струму співпадає з напрямком руху позитивних зарядів, тобто від мінуса до плюса;

e) Напрямок протікання струму співпадає з напрямком руху позитивних та негативних зарядів, які рухаються в одному напрямку, тобто від плюса до мінуса.

69. Що називають сторонніми силами?

a) Сторонні сили – це сили неелектростатичного походження, які необхідні для підтримання струму в колі або на окремих ділянках кола;

b) Сторонні сили – це сили електростатичного походження, які необхідні для підтримання струму в колі або на окремих ділянках кола;

c) Сторонні сили – це сили електростатичного походження, які необхідні для переносу позитивних зарядів в напрямку збільшення потенціалу;

d) Сторонні сили – це сили електростатичного походження, які діють на позитивні носії, що рухаються в бік зменшення потенціалу;

e) Сторонні сили – це сили неелектростатичного походження, які необхідні для переносу негативних зарядів в напрямку зменшення потенціалу.

70. Виберіть правильне визначення неоднорідної ділянки кола:

a) Ділянка кола, на якій на носії струму діють сторонні сили;

- b) Ділянка кола, на якій збільшується напруга на провіднику;
- c) Ділянка кола, на якій струм залишається постійним;
- d) Ділянка кола, на якій опір провідника змінюється;
- e) Ділянка кола, на якій не діють сторонні сили;
- f) Ділянка кола, на якій поперечний переріз провідника різний.

71. Виберіть правильне твердження закону Ома для однорідної ділянки кола:

- a) Струм, що протікає в однорідному провіднику, прямо пропорційний прикладеній напрузі  $U$  і обернено пропорційний опору провідника  $R$ ;
- b) Струм, що протікає в однорідному провіднику, прямо пропорційний опору провідника  $R$  і обернено пропорційний прикладеній напрузі  $U$ ;
- c) Струм, що протікає в однорідному провіднику, прямо пропорційний прикладеній напрузі  $U$  і обернено пропорційний опору провідника  $R$ ;
- d) Струм, що протікає в однорідному провіднику, прямо пропорційний електрорушійній силі  $\mathcal{E}$ , яка діє в колі, і обернено пропорційний опору провідника  $R$ ;
- e) Струм, що протікає в однорідному провіднику, прямо пропорційний електрорушійній силі  $\mathcal{E}$ , яка діє в колі, і обернено пропорційний опору провідника  $R$ .

72. Що можна сказати про струми, що входять до вузла або виходять з нього?

- a) Струми, що входять до вузла та виходять з нього, вважаємо негативними;
- b) Струми, що входять до вузла та виходять з нього, вважаємо позитивними;
- c) Струми, що входять до вузла, вважаємо позитивними, що виходять – негативними;
- d) Струми, що входять до вузла, вважаємо негативними, що виходять – позитивними;

е) Струми, що входять до вузла, вважаємо позитивними, що виходять – дорівнюють нулю.

73. Назвіть причини виникнення струму:

- а) Існування вільних електричних зарядів;
- б) Наявність магнітного поля;
- с) Наявність електричного поля;
- д) Наявність дифузії;
- е) Наявність високої температури.

74. Виберіть правильне визначення електрорушійної сили:

- а) Це величина, що дорівнює роботі сторонніх сил по переміщенню одиниці негативного заряду;
- б) Це величина, що дорівнює роботі сил електростатичного поля по переміщенню одиниці негативного заряду;
- с) Це величина, що дорівнює роботі сил електростатичного поля по переміщенню одиниці позитивного заряду;
- д) Це величина, що дорівнює роботі сторонніх сил по переміщенню одиниці позитивного заряду;
- е) Це величина, що дорівнює роботі струму за одиницю часу по переміщенню позитивного заряду.

75. Від чого залежить величина опору провідника?

- а) Від форми провідника;
- б) Від наявності в провіднику вільних зарядів;
- с) Від матеріалу провідника;
- д) Від розмірів провідника;
- е) Від напруги на провіднику.

76. Виберіть правильне визначення першого правила Кірхгофа:

- а) Алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю;
- б) Для будь-якого замкнутого контура сума всіх струмів дорівнює нулю;

с) Для будь-якого замкнутого контура сума всіх падінь напруг на опорах дорівнює нулю;

д) Алгебраїчна сума всіх напруг дорівнює нулю;

е) Для будь-якого замкнутого контура сума всіх падінь напруг на опорах дорівнює сумі ЕРС в цьому контурі із врахуванням знаків.

77. Закон Джоуля-Ленца виражається формулою:

а)  $Q = I^2 R t$ ;

б)  $Q = \frac{U^2}{R} t$ ;

с)  $Q = \int_0^t R i^2 dt$ ;

д)  $Q = U I t$ ;

е)  $Q_{AB} = P_{AB} i t$ .

78. Виберіть правильне визначення сили струму:

а) Сила струму – це кількість електрики, яка проходить через поперечний переріз провідника;

б) Сила струму – це упорядкований рух електричних зарядів;

с) Сила струму – це упорядкований рух позитивних зарядів;

д) Сила струму – це упорядкований рух негативно заряджених частинок;

е) Сила струму – це кількість електрики, яка проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу.

79. Запишіть формулу, яка описує сторонню силу, що виконує роботу по переносу заряду  $q$ .

---

80. Виберіть правильне визначення питомого опору:

а) Питомим опором називають коефіцієнт, який залежить від форми матеріалу;

б) Питомим опором називають коефіцієнт, який залежить від електричних властивостей матеріалу;

с) Питомим опором називають коефіцієнт, який залежить від розмірів матеріалу;

д) Питомим опором називають коефіцієнт, який залежить від температури матеріалу;

е) Питомим опором називають коефіцієнт, який залежить від зовнішніх умов середовища.

81. Виберіть правильне визначення другого правила Кірхгофа:

а) Алгебраїчна сума всіх падінь напруг на опорах дорівнює сумі всіх ЕРС в цьому контурі;

б) Для будь-якого замкненого контура сума всіх падінь напруг на опорах дорівнює сумі всіх ЕРС в цьому контурі із врахуванням знаків;

с) Для будь-якого замкнутого контуру сума всіх падінь напруг на опорах дорівнює нулю;

д) Алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю;

е) Для будь-якого замкнутого контуру сума всіх струмів дорівнює нулю.

82. Що називається потужністю струму?

а) Потужність – це робота сторонніх сил по переміщенню одиниці позитивного заряду;

б) Потужність – це робота сили струму, який проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу;

с) Потужність – це робота сили струму, що проходить через одиницю площі поперечного перерізу провідника;

д) Потужність – це робота, виконана струмом, за одиницю часу;

е) Потужність – це кількість теплоти, виділеної струмом за одиницю часу.

83. Виберіть правильне визначення постійного струму:

а) Постійний струм – це кількість електрики, яка проходить через поперечний переріз провідника і з часом не змінюється;

б) Постійний струм – це упорядкований рух електричних зарядів;

- c) Постійний струм – це упорядкований рух позитивних зарядів;
- d) Постійний струм – це упорядкований рух негативно заряджених частинок;
- e) Постійний струм – це кількість електрики, яка проходить через поперечний переріз провідника за одиницю часу.

84. Виберіть правильне визначення напруженості поля сторонніх сил:

- a) Напруженість чисельно дорівнює силі, що діє на негативний заряд, поміщений в дану точку поля;
- b) Напруженість чисельно дорівнює силі, що діє на позитивний заряд, поміщений в дану точку поля;
- c) Напруженість – це здатність провідника накопичувати електричний заряд;
- d) Напруженість дорівнює роботі сторонніх сил по переміщенню одиниці позитивного заряду;
- e) Напруженість дорівнює роботі сторонніх сил по переміщенню одиниці негативного заряду.

85. Запишіть формулу, що виражає зв'язок між векторами густини струму  $\vec{j}$  та напруженістю  $\vec{E}$ .

---

86. Коефіцієнта корисної дії це...

- a) Відношення повної потужності до корисної потужності джерела струму;
- b) Відношення корисної потужності до повної потужності джерела струму;
- c) Відношення роботи струму, до повної потужності джерела струму.

87. Перше правило Кірхгофа виражається формулою:

- a)  $\sum_{i=1}^n I_i = 0;$
- b)  $\sum_{i=1}^n I_i R_i = 0;$
- c)  $\sum_{i=1}^n U_i = 0;$

d)  $\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^k \varepsilon_i;$

e)  $\sum_{i=1}^n I_i r_i = \sum_{i=1}^k \varepsilon_i.$

88. Виберіть правильні характеристики електричного струму:

- a) Сила струму;
- b) Провідність;
- c) Питомий опір;
- d) Густина струму;
- e) Питома провідність.

89. Умови існування електричного струму:

- a) Наявність заряджених частинок, які можуть вільно рухатися;
- b) Наявність магнітного поля;
- c) Наявність замкненого електричного кола;
- d) Існування в провіднику ділянки, де діють сторонні сили;
- e) Наявність різниці потенціалів.

90. Що називається падінням напруги або просто напругою на ділянці кола?

a) Величина, яка чисельно дорівнює роботі, що здійснюється електростатичними та сторонніми силами при переміщенні одиничного позитивного заряду;

b) Величина, що дорівнює роботі сторонніх сил по переміщенню одиниці негативного заряду;

c) Величина, що дорівнює роботі сил електростатичного поля по переміщенню одиниці позитивного заряду;

d) Величина, що дорівнює роботі сторонніх сил по переміщенню одиниці позитивного заряду;

e) Величина, що дорівнює роботі струму за одиницю часу по переміщенню позитивного заряду.

91. Друге правило Кірхгофа виражається формулою:

a)  $\sum_{i=1}^n I_i = 0;$

- b)  $\sum_{i=1}^n I_i R_i = 0;$
- c)  $\sum_{i=1}^n U_i = 0;$
- d)  $\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{i=1}^k \varepsilon_i;$
- e)  $\sum_{i=1}^n I_i r_i = \sum_{i=1}^k \varepsilon_i.$

### 4.3. Магнетизм

#### Магнітне поле постійного струму

92. Закон Біо-Савара-Лапласа виражається формулою:

- a)  $d\vec{B} = \frac{\mu_0 I [d\vec{l} \times \vec{r}]}{4\pi r^3};$
- b)  $B = \frac{\mu_0 \mu}{2} \frac{I}{R};$
- c)  $B = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{I}{r_0};$
- d)  $B = \mu_0 \mu n I;$
- e)  $B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{r_0} (\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2).$

93. Через яке поле відбувається взаємодія струмів?

- a) Однорідне;
- b) Вихрове;
- c) Електричне;
- d) Магнітне;
- e) Електромагнітне.

94. Який вплив здійснює магнітне поле на заряд, що знаходиться в стані спокою?

- a) Не спричиняє впливу;
- b) Безпосередній;
- c) Зворотній;
- d) Непрямий;
- e) Немає правильної відповіді.

95. Якими зарядами породжується магнітне поле?

- a) Зв'язаними;
- b) Нерухомими;
- c) Однойменними;
- d) Вільними;
- e) Рухомими.

96. Магнітна індукція в центрі колового провідника зі струмом виражається формулою:

- a)  $\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$ ;
- b)  $B = \frac{\mu_0 \mu}{2} \frac{I}{R}$ ;
- c)  $B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{r_0} (\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2)$ ;
- d)  $B = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{I}{r_0}$ ;
- e)  $B = \mu_0 \mu n I$ .

97. Індукція магнітного поля, створеного нескінченно довгим прямим провідником, виражається формулою:

- a)  $\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$ ;
- b)  $B = \frac{\mu_0 \mu}{2} \frac{I}{R}$ ;
- c)  $B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{r_0} (\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2)$ ;
- d)  $B = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \frac{I}{r_0}$ ;
- e)  $B = \mu_0 \mu n I$ .

98. Як називається величина, що показує в скільки разів вектор магнітної індукції в однорідному середовищі більший за вектор магнітної індукції у вакуумі?

- a) Магнітна проникність;
- b) Магнітна стала;
- c) Питома провідність;
- d) Питома густина;

е) Магнітна сприйнятливість.

99. Магнітне поле, характеристики якого не змінюються з часом називається...

- а) Вихровим;
- б) Однорідним;
- в) Стаціонарним;
- г) Неоднорідним;
- е) Однорідним магнітним.

100. Як називається поле, вектори магнітної індукції якого в кожній точці рівні між собою?

- а) Вихровим;
- б) Однорідним;
- в) Стаціонарним;
- г) Неоднорідним;
- е) Однорідним магнітним.

101. На рис. 4.3.1 зображено дротяний виток, по якому тече струм у напрямку, вказаному стрілкою. Виток розташований в горизонтальній площині. Який має напрямок вектор магнітної індукції поля у центрі витка?

- а) Вертикально вгору -  $\vec{B}$ ;
- б) Горизонтально вліво  $\neg \vec{B}$ ;
- в) Горизонтально вправо  $\otimes \vec{B}$ ;
- г) Вертикально вниз  $\neg \vec{B}$ ;
- е) Під кутом  $\alpha$   $\vec{B}$ .

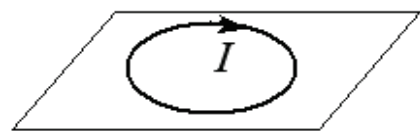
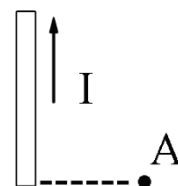


Рис. 4.3.1.

102. На рис. 4.3.2 зображено прямий провідник, по якому тече струм. Як спрямований вектор магнітної індукції відносно точки А?

- а) Вертикально вгору -  $\vec{B}$ ;
- б) Горизонтально вліво  $\neg \vec{B}$ ;
- в) Від нас  $\otimes$ ;



- d) Вертикально вниз  $-\vec{B}$ ;
- e) На нас  $\odot$ .

*Рис. 4.3.2.*

### **Робота по переміщенню провідника зі струмом в магнітному полі.**

#### **Електромагнітна індукція. Індуктивність**

103. Виберіть правильне формулювання правила Ленца:

- a) Індукційний струм, який виникає в замкненому контурі, має такий напрямок, при якому його магнітне поле протидіє зміні магнітного потоку, який є причиною виникнення струму;
- b) Індукційний струм, який виникає в замкненому контурі, має такий напрямок, при якому його магнітне поле збільшує магнітний потік, який є причиною виникнення струму;
- c) Індукційний струм, який виникає в замкненому контурі, має такий напрямок, при якому його магнітне поле співпадає з вектором магнітної індукції;
- d) Свій варіант відповіді.

104. Виберіть правильне визначення електромагнітної індукції:

- a) Електромагнітна індукція – це явище виникнення в замкненому провіднику (контурі) електричного струму, обумовленого зміною потоку магнітної індукції через поверхню, що обмежена цим контуром;
- b) Електромагнітна індукція – це енергетична характеристика магнітного поля в просторі, обмеженому контуром;
- c) Електромагнітна індукція – це процес перетворення енергії з форми магнітного поля в форму кінетичної енергії заряджених частинок;
- d) Електромагнітна індукція – це явище виникнення ЕРС індукції при зміні струму в контурі;
- e) Електромагнітна індукція – це явище виникнення ЕРС в одному із контурів при зміні сили струму в іншому.

105. Запишіть формулу для поточозчеплення.

---

106. Запишіть формулу для струму при розмиканні кола.

---

107. Енергія магнітного поля у випадку нескінченно довгого соленоїда виражається формулою:

- a)  $W = \frac{\Phi I}{2};$
- b)  $W = \frac{LI^2}{2};$
- c)  $W = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} V;$
- d)  $W = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu};$
- e)  $W = \frac{BH}{2}.$

108. Виберіть правильне визначення магнітного потоку:

- a) Магнітний потік – це явище виникнення в замкнутому провіднику (контурі) електричного струму, обумовленого зміною магнітного поля, що пронизує контур;
- b) Магнітний потік – це енергетична характеристика магнітного поля в просторі, обмеженому контуром;
- c) Магнітний потік – це процес перетворення енергії з форми магнітного поля в форму кінетичної енергії заряджених частинок;
- d) Магнітний потік – це явище виникнення ЕРС індукції при зміні струму в контурі;
- e) Магнітний потік – це явище виникнення ЕРС в одному із контурів при зміні сили струму в іншому.

109. Виберіть правильне визначення індуктивності:

- a) Індуктивність – це коефіцієнт пропорційності між силою струму та повним магнітним потоком;
- b) Індуктивність – це енергетична характеристика магнітного поля в просторі, обмеженому контуром;

с) Індуктивність – це характеристика магнітного поля;

д) Індуктивність – це явище виникнення ЕРС в одному із контурів при зміні сили струму в іншому;

е) Індуктивність – це явище виникнення ЕРС індукції при зміні струму в контурі.

110. Запишіть формулу для індуктивності соленоїда.

---

111. Виберіть правильне визначення електрорушійної сили індукції:

а) Електрорушійна сила індукції – це явище виникнення в замкнутому провіднику (контурі) електричного струму, обумовленого зміною магнітного поля, що пронизує контур;

б) Електрорушійна сила індукції – це енергетична характеристика магнітного поля в просторі, обмеженому контуром;

с) Електрорушійна сила індукції – це ЕРС, яка виникає в замкнутому контурі при зміні магнітного потоку;

д) Електрорушійна сила індукції – це виникнення ЕРС індукції при зміні струму в контурі;

е) Електрорушійна сила індукції – це виникнення ЕРС в одному із контурів при зміні сили струму в іншому.

112. Виберіть правильне визначення для самоіндукції:

а) Самоіндукція – це явище виникнення в замкнутому провіднику (контурі) електричного струму, обумовленого зміною магнітного поля, що пронизує контур;

б) Самоіндукція – це енергетична характеристика магнітного поля в просторі, обмеженому контуром;

с) Самоіндукція – це процес перетворення енергії з форми магнітного поля в форму кінетичної енергії заряджених частинок;

д) Самоіндукція – це явище виникнення ЕРС індукції при зміні струму в контурі;

е) Самоіндукція – це явище виникнення ЕРС в одному із контурів при зміні сили струму в іншому.

113. Робота переманічування феромагнетика виражається формулою:

а)  $dA = Id\psi$ ;

б)  $A = \oint dW = 0$ ;

в)  $A = \oint HdB = S_{\text{п}}$ ;

г)  $A = \frac{\Phi I}{2}$ ;

е)  $A = I\Delta\Phi$ .

114. Густина енергії магнітного поля виражається формулою:

а)  $w = \frac{\Phi I}{2}$ ;

б)  $w = \frac{LI^2}{2}$ ;

в)  $w = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} V$ ;

г)  $w = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu}$ ;

е)  $w = \frac{BH}{2}$ .

115. Виберіть правильне визначення закону електромагнітної індукції:

а) ЕРС електромагнітної індукції, обернено пропорційна швидкості зміні магнітного потоку через площу, обмежену контуром;

б) ЕРС електромагнітної індукції, пропорційна швидкості зміні магнітного потоку в контурі;

в) ЕРС електромагнітної індукції, обернено пропорційна швидкості зміні магнітного потоку в контурі;

г) ЕРС електромагнітної індукції, пропорційна швидкості зміні магнітного потоку через площу, обмежену контуром;

е) ЕРС електромагнітної індукції пропорційна роботі сторонніх сил по переміщенню одиниці позитивного заряду.

116. Енергія  $N$  зв'язаних один з одним контурів виражається формулою:

а)  $W = \frac{\Phi I}{2}$ ;

- b)  $W = \frac{LI^2}{2};$
- c)  $W = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} V;$
- d)  $W = \frac{B^2}{2\mu_0 \mu};$
- e)  $W = \frac{1}{2} \sum_{i,k=1}^N L_{ik} I_i I_k.$

117. Запишіть формулу для струму при замиканні кола.

118. Виберіть правильне визначення для взаємодукції:

- a) Взаємодукція – це явище виникнення в замкнутому провіднику (контурі) електричного струму, обумовленого зміною магнітного поля, що пронизує контур;
- b) Взаємодукція – це енергетична характеристика магнітного поля в просторі, обмеженому контуром;
- c) Взаємодукція – це процес перетворення енергії з форми магнітного поля в форму кінетичної енергії заряджених частинок;
- d) Взаємодукція – це явище виникнення ЕРС індукції при зміні струму в контурі;
- e) Взаємодукція – це явище виникнення ЕРС в одному із контурів при зміні сили струму в іншому.

### **Закон повного струму. Магнітний потік. Магнітні кола**

119. Виберіть правильне визначення магнітної індукції:

- a) Магнітна індукція – основна силова характеристика магнітного поля;
- b) Магнітна індукція – енергетична характеристика магнітного поля в просторі, обмеженому контуром;

с) Магнітна індукція – явище виникнення в замкненому провіднику електричного струму, обумовленого зміною магнітного поля, що пронизує контур;

д) Магнітна індукція – характеризує магнітні властивості середовища;

е) Магнітна індукція – процес перетворення енергії з форми магнітного поля в форму кінетичної енергії заряджених частинок.

120. Дайте визначення магнітної сили?

121. Виберіть правильне формулювання теореми Гаусса для вектора магнітної індукції:

а) Потік магнітної індукції пропорційний кількості ліній магнітної індукції, охоплюваних контуром;

б) Потік вектора магнітної індукції дорівнює алгебраїчній сумі струмів, охоплюваних контуром;

с) Поле з магнітною індукцією  $\vec{B}$ , яке створене декількома рухомими зарядами, дорівнює векторній сумі полів  $\vec{B}$ , створюваних кожним зарядом окремо;

д) Потік вектора магнітної індукції через будь-яку замкнену поверхню дорівнює нулю;

е) Потік вектора магнітної індукції через будь-яку замкнену поверхню дорівнює векторній сумі полів  $\vec{B}$ , створюваних кожним зарядом окремо.

122. Закон повного струму для довільного середовища виражається формулою:

а)  $\oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i;$

б)  $\oint \vec{B} d\vec{S} = 0;$

с)  $\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j} ;$

д)  $\oint_L H_l dl = \sum_{i=1}^n I_i;$

е)  $\int_L B_l dl = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i.$

123. Магнітна індукція в зазорі електромагніта виражається формулою:

- a)  $B = \frac{\mu_0 n I}{2};$
- b)  $B = \frac{n I \mu_0 R}{r};$
- c)  $B = \mu_0 I \frac{N}{l_{\text{пов}}};$
- d)  $B = \mu_0 n I;$
- e)  $B = 0.$

124. Виберіть правильне формулювання принципу суперпозиції для магнітного поля:

- a) Поле з магнітною індукцією  $\vec{B}$ , яке створене декількома рухомими зарядами, дорівнює векторній сумі полів  $\vec{B}$ , створюваних кожним зарядом окремо;
- b) Поле з магнітною індукцією  $\vec{B}$ , яке створене декількома рухомими зарядами, пропорційне кількості ліній магнітної індукції, охоплюваних контуром;
- c) Поле з магнітною індукцією  $\vec{B}$ , яке створене декількома рухомими зарядами, дорівнює алгебраїчній сумі струмів, охоплюваних контуром;
- d) Векторна сума полів  $\vec{B}$ , створюваних кожним зарядом окремо, дорівнює нулю;
- e) Векторна сума полів  $\vec{B}$ , створюваних кожним зарядом окремо, дорівнює зміні потоку вектора магнітної індукції.

125. Як спрямована магнітна сила?

- a) Магнітна сила спрямована паралельно до площини, в якій лежать вектори  $\vec{v}$  і  $\vec{B}$ ;
- b) Магнітна сила спрямована перпендикулярно до площини, в якій лежать вектори  $\vec{v}$  і  $\vec{B}$ ;
- c) Магнітна сила спрямована паралельно до площини, в якій лежить вектор  $\vec{v}$ ;
- d) Магнітна сила спрямована перпендикулярно до площини, в якій знаходиться вектор  $\vec{v}$ ;

е) Магнітна сила спрямована перпендикулярно до площини, в якій знаходиться вектор  $\vec{B}$ .

126. Виберіть правильне визначення напруженості магнітного поля:

а) Напруженість магнітного поля – це допоміжна величина, ротор якої визначається тільки макроскопічними струмами;

б) Напруженість магнітного поля – основна силова характеристика магнітного поля;

в) Напруженість магнітного поля – енергетична характеристика магнітного поля в просторі, обмеженому контуром;

г) Напруженість магнітного поля – явище виникнення в замкненому провіднику електричного струму, обумовленого зміною магнітного поля, що пронизує контур;

е) Напруженість магнітного поля – характеристика магнітних властивостей середовища.

127. Закон повного струму для магнітного поля у вакуумі виражається формулою:

а)  $\oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i$ ;

б)  $\oint \vec{B} d\vec{S} = 0$ ;

в)  $\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$ ;

г)  $\oint_L H_l dl = \sum_{i=1}^n I_i$ ;

е)  $\int_L B_l dl = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i$ .

128. Магнітна індукція всередині соленоїда виражається формулою:

а)  $B = \frac{\mu_0 n I}{2}$ ;

б)  $B = \frac{n I \mu_0 R}{r}$ ;

в)  $B = \mu_0 I \frac{N}{l_{\text{пов}}}$ ;

г)  $B = \mu_0 n I$ ;

е)  $B = 0$ .

129. Виберіть правильне визначення для напрямку магнітного поля (правило правого гвинта):

а) Якщо напрямок поступального руху «буравчика» співпадає з напрямком струму в провіднику, то напрямок обертання ручки «буравчика» протилежний до напрямку вектора магнітної індукції;

б) Якщо напрямок поступального руху «буравчика» співпадає з напрямком струму в провіднику, то напрямок обертання ручки «буравчика» співпадає з напрямком вектора магнітної індукції;

с) Якщо напрямок поступального руху «буравчика» протилежний до напрямку струму в провіднику, то напрямок обертання ручки «буравчика» співпадає з напрямком вектора магнітної індукції;

д) Якщо напрямок поступального руху «буравчика» протилежний до напрямку струму в провіднику, то напрямок обертання ручки «буравчика» також буде протилежним до напрямку вектора магнітної індукції;

е) Якщо напрямок поступального руху «буравчика» співпадає з напрямком струму в провіднику, то напрямок обертання ручки «буравчика» співпадає з напрямком сили, що діє на ділянку провідника.

130. Виберіть правильне визначення для сили Лоренца:

а) Сила Лоренца – це сила, яка діє на заряд, що рухається;

б) Сила Лоренца – це сила, яка діє на провідник зі струмом в магнітному полі;

с) Сила Лоренца – це сила, яка діє на заряд, що рухається в магнітному полі;

д) Сила Лоренца – це сила, яка діє на заряд, що рухається в електростатичному полі;

е) Сила Лоренца – це сила, яка діє на рухомий заряд.

131. Запишіть формулу для магнітної проникності речовини.

---

132. Запишіть зв'язок магнітної індукції з напруженістю магнітного поля.

---

133. Що називають лініями магнітної індукції?

- a) Лінії магнітної індукції – це концентричні кола в площині, перпендикулярній до проводу з центром в місці проходження провідника;
- b) Лінії магнітної індукції – це лінії, дотичні до яких спрямовані так само, як і вектор магнітної індукції в даній точці;
- c) Лінії магнітної індукції – це лінії, дотичні до яких спрямовані паралельно до вектора магнітної індукції в даній точці;
- d) Лінії магнітної індукції – це лінії, дотичні до яких спрямовані перпендикулярно до вектора магнітної індукції в даній точці;
- e) Свій варіант відповіді.

134. Виберіть правильне визначення закону Ампера:

- a) Магнітне поле струму є векторна сума елементарних полів, створюваних всіма окремими елементами провідника зі струмом;
- b) Магнітне поле діє на будь-який елемент провідника  $\Delta l$  з силою  $\vec{F}$ ;
- c) Магнітне поле діє на будь-який елемент провідника  $\Delta l$  зі струмом з силою  $\vec{F}$ ;
- d) Електростатичне поле діє на ділянку  $\Delta l$  провідника зі струмом з силою  $\vec{F}$ ;
- e) Електростатичне поле діє на ділянку  $\Delta l$  провідника з силою  $\vec{F}$ .

135. Запишіть теорему Остроградського-Гаусса для вектора магнітної індукції

---

136. Виберіть правильну відповідь: В який бік спрямована сила Ампера?

- a) Сила Ампера спрямована паралельно до площини, в якій знаходяться вектори  $d\vec{l}$  і  $\vec{B}$ ;
- b) Сила Ампера спрямована перпендикулярно до площини, в якій знаходяться вектори  $d\vec{l}$  і  $\vec{B}$ ;
- c) Сила Ампера спрямована паралельно до площини, в якій знаходиться вектор  $\vec{B}$ ;

d) Сила Ампера спрямована перпендикулярно до площини, в якій знаходиться вектор  $d\vec{l}$ ;

e) Магнітна сила спрямована перпендикулярно до площини, в якій знаходиться вектор  $\vec{B}$ .

137. Запишіть закон Біо-Саварра-Лапласа в скалярному вигляді.

---

138. Робота, яка здійснюється при переміщенні провідника зі струмом в магнітному полі виражається формулою:

a)  $A = qE\Delta l$ ;

b)  $A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ ;

c)  $A = F\Delta x$ ;

d)  $A = UI\Delta t$ ;

e)  $A = I\Delta\Phi$ .

### **СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:**

1. Аніщенко В.О. Електрика і магнетизм: навчально-методичний посібник / В.О. Аніщенко. – Ніжин: Ред. – вид. відділ НДПУ, 2001. – 148 с.
2. Атаманчук П.С., Криськов А.А., Мендерецький В.В. Збірник задач з фізики. Київ «Школяр» 1996. -300с.
3. Атаманчук П.С., Кух А.М. Управління процесом навчально-пізнавальної діяльності. Кам'янець-Подільський. 1997р.
4. Бланк О.Я., Гречко Л.Г. Фізика. – Х.: Факт. 2002. – 344 с.
5. Бригінець В.П., Подласов С.О., Сергієнко В.П. Лекції з курсу загальної фізики. Механіка: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів / За редакцією професора В.П. Сергієнка. – К. : Видавництво НПУ імені М.П.Драгоманова, 2010. – 170 с.
6. Горбачук І.Т., Сергієнко В.П., Собко І.М. Підвищення ефективності контролю знань, умінь і навичок студентів з курсу загальної фізики на основі використання нової інформаційної технології – К.: УДПУ, 1994. – с. 24.
7. Горбачук І.Т., Сергієнко В.П., Шут М.І. Нова технологія навчання в курсі загальної фізики. Наук. - метод. зб. – К.: МО України, 1994. – с. 271 – 273.
8. Дідович М.М., Пастушенко С.М., Сергієнко В.П. Розв'язування задач з фізики. – К.: ДІАЛ, 2004. – 178 с.
9. Електрика і магнетизм: [навчально-методичний посібник / під ред. Шута М.І.]. – К. : НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2004. – 215с.
10. Загальна фізика. Лабораторний практикум: Навч. посібник за заг.ред. І.Т. Горбачука. – К.: Вища школа, 1992. – 509 с.
11. Загальний курс фізики: Електрика і магнетизм: навч. посіб. [для студ. вищ. техн. і пед. закл. освіти] / І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук, П.П. Луцик; за ред. І.М. Кучерука. – К. : Техніка, 2001. – Т. 1-3. – 452 с.
12. Загальний курс фізики: Збірник задач / І.П. Гаркуша, І.Т. Горбачук, В.П. Курінний та ін./ За заг.ред. І.П. Гаркуші. – К.: Техніка., 2003.– 560 с.

13. Збаравська Л.Ю., Сергієнко В.П. та інші. Розв'язування задач з фізики: Навчальний посібник для студентів аграрно-технічних закладів освіти. – К.: НМУ аграрної політики, 2007. - 153 с.
14. Корсак К.В. Фізика: 25 повторювальних лекцій: Навч. посібник. - К.: Вища шк., 1994. - 431 с.
15. Курс фізики: Навч. посіб. для студентів комп'ютерних спеціальностей вищих навчальних закладів [Сергієнко В.П., Сліпухіна І.А., Войтович І.С.]; за ред. Сергієнка В.П. – К.: Видавництво НПУ, 2014. – 326 с.
16. Кучерук І.М, Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики, т. 2. – К.: Техніка, 2001. – 470 с.
17. Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики, т. 3. – К.: Техніка, 1999. – 536 с.
18. Кучерук І.М., Горбачук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики, т. І. – К.: Техніка, 1999. – 536 с.
19. Пастушенко С.М. Формули і закони загальної фізики: навч. посіб. [для студ. вищ. навч. закл.] / С.М. Пастушенко. – [2-е вид.]. – К. : Діал, 2005. – 268 с.
20. Пастушенко С.М., Пастушенко Т.С. Фізика. Означення, закони, приклади розв'язування задач: Навч. посібник. - К.: НАУ, Діал. Абетка, 2002. - 312 с.
21. Сергієнко В.П. Курс фізики: Навч. посібник для абітурієнтів. – К.: Майстер-клас, 2006. – 368 с.
22. Сергієнко В.П., Садовий М.І., Трифонова О.М.. Фізика: Підручник для слухачів підготовчих відділень вищих навчальних закладів. - Кіровоград: ПП «Ексклюзив – Систем», 2008. - 698 с.
23. Сергієнко В.П., Скубій Т.В. Розв'язування задач з електростатики: Посібник для студентів вищих навчальних закладів. – К.: Політехніка. 2005. – 132 с.
24. Сусь Б.А. Електростатика: навчальний посібник [для самостійної роботи студентів] / Б.А. Сусь. – Львів : Світ, 2002. – 68 с.

25. Фізика. Модуль 1. Механіка: Навч. посіб. / А.Г. Бовтрук, Ю.Т. Герасименко, Б.Ф. Лахін та ін.; За заг. ред. проф. А.П. Поліщука. – К. : Книжкове вид-во НАУ, 2007.– 232 с.
26. Фізика. Модуль 4. Коливання і хвилі : Навч. посіб./ Б.Ф. Лахін, К.К. Мартинчук, В.І. Оглобля та ін.; За заг. ред. проф. А.П. Поліщука. – 3-тє вид., стереотип.– К. : Книжкове вид-во НАУ, 2006.– 176 с.
27. Шут М.І., Сергієнко В.П. Науково-дослідна робота з фізики у середніх і вищих навчальних закладах. К.: Шкільний світ, 2004. – 128 с.

*Навчальне видання*

СЕРГІЄНКО В.П., СЛІПУХІНА І.А., ВОЙТОВИЧ І.С.,  
ЗБАРАВСЬКА Л.Ю., ЗАЗИМКО Н.М., МАЛЕЖИК П.М.,  
МАЛЕЖИК М.П., СКУБІЙ Т.В., КОЛУПАЄВ Б.Б.,  
ЛЕВЧУК В.В., ЛЯШУК Т.Г.

# **Фізика для інформатиків.**

## **Ч.2. Електрика та магнетизм**

*Навчальний посібник*

Формат 60x84 1/16. Папір офсет. Гарнітура «Times».  
Ум. друк. арк. 12,55. Зам. 90.  
Видавництво «Волинські обереги».  
33028 м. Рівне, вул. 16 Липня, 38; тел./факс: (0362) 62-03-97;  
e-mail: oberegi97@ukr.net  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єкта  
видавничої справи ДК № 270 від 07.12.2000 р.

