

Лекція 9

Тема 1. Магнітне поле.

1. Магнітне поле і його характеристики.
2. Магнітна взаємодія струмів. Закон Ампера.
3. Закон Біо-Савара-Лапласа та його застосування до розрахунку найпростіших полів.
4. Циркуляція вектора напруженості. Вихровий характер магнітного поля.
5. Робота при русі провідника зі струмом в магнітному полі.
6. Дія магнітного поля на рухомий заряд. Сила Лоренца.
7. Визначення питомого заряду електрона (самостійно)
8. Ефект Холла та його застосування.

1. Магнітне поле і його характеристика.

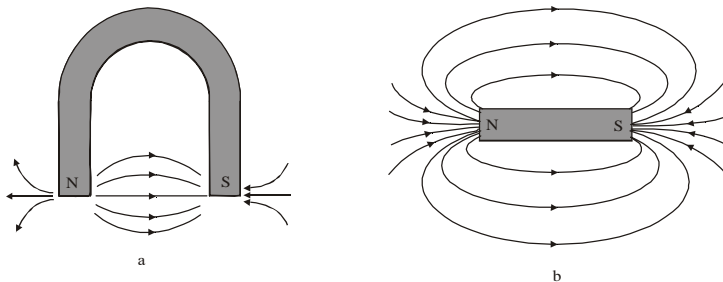
Ще кілька тисячоліть тому в природі був відомий камінь, який, будучи вільно підвішеним, завжди орієнтується в певному напрямку. Цей камінь отримав назву природного магніту. Пізніше було з'ясовано, що цим каменем є магнетит (оксид заліза). Будь-який магніт володіє двома полюсами. Полюс, який направлений на північ у вільно підвішеного магніту, називають **північним полюсом** і позначають його буквою *N*. Протилежний полюс, направлений на південь, називається **південним полюсом**. Позначають південний полюс магніту літерою *S*.

Добре відомо, що якщо до північного полюса одного магніту піднести північний полюс іншого магніту, то магніти будуть відштовхуватися; те ж саме буде, якщо піднести магніти один до одного південними полюсами. Але якщо до південного полюса одного магніту піднести північний полюс іншого магніту, то виникне притягання. Таким чином: **однойменні полюси магнітів відштовхуються, а різнойменні притягаються**. Подібна взаємодія спостерігається у електричних зарядів.

Відомо, що сильними магнітними властивостями володіють тільки деякі речовини: **залізо, кобальт, нікель і гадоліній**. Ці речовини називають **феромагнетиками**.

Навколо кожного магніту (як і навколо електричного заряду) існує силове поле, відоме як **магнітне поле**. Силу, з якою один магніт діє на інший, можна розглядати як результат взаємодії одного магніту з магнітним полем іншого.

Як і у випадку електричного поля магнітне поле можна зображати силовими лініями. Силкові лінії проводять таким чином, щоб: 1) магнітне поле було направлено по дотичній до силової лінії в будь-якій точці і 2) число ліній на одиницю площі було пропорційне величині магнітного поля.



Силкові лінії магнітного поля напрямлені від північного полюса магніту до південного. На рис. 11.1 показано силкові лінії магнітного поля підковоподібного магніту (а) і магнітного стержня (б). Там, де магнітні силкові лінії розміщуються густіше, поле сильніше і навпаки.

Магнітне поле, в якому силкові лінії є паралельними прямими, рівновіддаленими одна від одної, називається **однорідним**.

Встановлено, що магнітне поле існує і навколо Землі. Таким чином, Земля є своєрідним великим магнітом. Магнітні полюси Землі не збігаються з її географічними полюсами. Південний магнітний полюс Землі знаходиться поблизу її північного географічного полюса і навпаки. Магнітна вісь Землі нахилена до її осі обертання на 11° . Це слід враховувати при користуванні магнітним компасом.

Магнітне поле Землі незначне за винятком окремих районів **магнітної аномалії**, де знаходяться значні поклади залізних руд (відома у світі Курська аномалія). Встановлено, що магнітне поле Землі зазнає певних змін. Іноді ці зміни виникають швидко й різко. Такі явища

отримали назву **магнітних бур**. Знання періодичності зміни магнітного поля Землі має велике значення для життєдіяльності людини.

Магнітне поле характеризують двома векторними величинами: **напруженістю \vec{H}** і **магнітною індукцією \vec{B}** . **Напруженість магнітного поля** можна визначити за допомогою сили, яка діє на пробний магніт, поміщений в магнітне поле. Оскільки магнітні полюси не існують окремо один від одного, на північний і південний полюси пробного магніту діють протилежно напрямлені сили, внаслідок чого виникає пара сил. Цей момент характеризує величину напруженості магнітного поля в даному місці. Напрямок вектора напруженості магнітного поля в кожній точці співпадає з напрямком силових ліній. В СІ **одиницею напруженості** магнітного поля є А/м.

Вектор магнітної індукції є також силовою характеристикою магнітного поля. Для вакууму в СІ

$$B_0 = \mu_0 H, \quad (11.1)$$

де $\mu_0 = 1,257 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{А} \cdot \text{м}$ – магнітна стала.

Якщо в магнітне поле помістити речовину, то магнітна індукція в магнетикі дорівнює сумі векторів магнітної індукції зовнішнього поля \vec{B} та індукції власного поля речовини (магнетика) \vec{B}' :

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}',$$

причому \vec{B}' визначається тільки магнітними властивостями середовища (магнетика). Величина, яка показує у скільки разів збільшується (зменшується) магнітна індукція у речовині, називається **відносною магнітною проникністю μ** :

$$\mu = \frac{B}{B_0}, \quad (11.2)$$

де B – магнітна індукція в речовині, B_0 – магнітна індукція у вакуумі.

Звідси

$$B = \mu B_0 = \mu \mu_0 H. \quad (11.3)$$

Добуток $\mu \mu_0$ називають **абсолютною магнітною проникністю речовини**.

Відносна зміну індукції магнітного поля називають **магнітною сприйнятливістю речовини**:

$$\chi = \frac{B - B_0}{B_0}, \quad (11.4)$$

звідки

$$1 + \chi = \frac{B}{B_0} = \mu,$$

або

$$\chi = \mu - 1. \quad (11.5)$$

Є речовини (залізо, кобальт, нікель), для яких відносна магнітна проникність велика ($\mu \gg 1$). Для таких речовин $\chi > 0$. Ці речовини називаються **феромагнетиками**. Речовини з відносною магнітною проникністю дещо більшою одиниці ($\mu > 1, \chi > 0$) (платина, алюміній, повітря) називають **парамагнетиками**, поле в них лише дуже мало зростає. **Речовини з $\mu < 1, \chi < 0$** (срібло, мідь, вісмут) дещо послаблюють магнітне поле. Такі речовини називають **діамагнетиками**.

2. Магнітна взаємодія струмів. Закон Ампера.

У 1820 р. датський фізик Ханс Крістіан Ерстед виявив дію електричного струму на магнітну стрілку. Оскільки магнітна стрілка відхиляється магнітним полем, то це означало, що електричний струм створює магнітне поле. Таким чином, Ерстед встановив існування зв'язку між електрикою і магнетизмом, що згодом призвело до виникнення нової галузі фізики – **електромагнетизму**.

Після відкриття Ерстеда почалися інтенсивні дослідження магнітних полів струмів. У 1820 р. французький фізик Ампер встановив закон механічної взаємодії двох елементів струмів, які містяться на певній відстані один від одного. Два паралельних провідники, по яких проходять струми однакового напрямку, притягаються один до одного.

Зміна напрямку одного з струмів приводить до відштовхування провідників із струмом. Ця дія на відстані не має нічого спільного з електростатичною взаємодією. Отже, спостережувана поведінка провідників з струмом визначається магнітною взаємодією.

Магнітне поле провідника зі струмом визначається силою і напрямком струму, а також формою цього провідника.

Силкові лінії магнітного поля прямолінійного провідника зі струмом мають вигляд концентричних кіл, розміщених в площинах, перпендикулярних до провідника. Магнітна стрілка в такому полі розміщується по дотичній до силової лінії в тій чи іншій точці. Напрямок силових ліній магнітного поля можна визначити за **правилом правого свердлика** або **правилом правої руки**: а) якщо свердлик вкручувати вздовж напрямку струму, то напрямок руху ручки свердлика покаже напрямок силових ліній магнітного поля, а); б) якщо провідник уявно обхопити правою рукою так, щоб великий палець вказував напрямок струму, то інші пальці виявляться зігнутими в напрямку силових ліній поля (рис. 4.6, б).

Досвід показує, що сила, яка діє на провідник зі струмом, завжди перпендикулярна і до провідника, і до вектора індукції. Визначити напрямок сили, що діє на провідник із струмом з боку магнітного поля, можна за **правилом лівої руки**: якщо розмістити ліву руку так, щоб магнітні силкові лінії входили в її долоню, а випрямлені чотири пальці вказували напрям струму, то відігнутий великий палець покаже напрям діючої на провідник сили.

$$F = IlB \sin \alpha, \quad (11.6)$$

Формулу іноді називають також **законом Ампера**, а силу, яка діє на провідник зі струмом у магнітному полі, називають **силою Ампера**.

3. Закон Біо-Савара-Лапласа та його застосування до розрахунку найпростіших полів.

Елемент провідника $d\vec{l}$ з струмом I створює у деякій точці A індукцію поля (рис., Огурцов):

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

де \vec{r} – радіус-вектор, проведений з елемента $d\vec{l}$ провідника у т. A .

Напрямок $d\vec{B}$ перпендикулярний $d\vec{l}$ і \vec{r} , і співпадає з дотичною до лінії магнітної індукції. Модуль вектора $d\vec{B}$ визначається виразом:

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

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

Магнітне поле прямого струму.

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2I}{R},$$

де R – відстань від т. A до провідника.

Магнітне поле в центрі колового струму.

На відстані r від центру витка вздовж осі витка магнітне поле буде:

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{2} \frac{IR^2}{(\sqrt{R^2 + r^2})^3}.$$

4. Циркуляція вектора напруженості. Вихровий характер магнітного поля.

Як зазначалося, магнітних зарядів у природі не виявлено. Магнітні поля створюються рухомими електричними зарядами або струмами. Спостереження спектрів магнітних полів показують, що лінії індукції магнітного поля, наприклад прямолінійного провідника з струмом, мають форму концентричних кіл, центри яких лежать на лінії струму. **Циркуляцією вектора \vec{B}** по заданому замкненому контуру L називається наступний інтеграл по цьому контуру (рис., Огурцов):

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl,$$

де $d\vec{l}$ – елемент довжини контуру, напрямлений вздовж обходу контуру, $B_l = B \cos \alpha$ – складова вектора \vec{B} у напрямі дотичної до контуру, з врахуванням вибраного напрямку обходу, α – кут між векторами \vec{B} і $d\vec{l}$.

Теорема про циркуляцію вектора \vec{B} (закон повного магнітного поля у вакуумі): циркуляція вектора \vec{B} по довільному замкненому контуру дорівнює добутку магнітної сталої μ_0 на алгебраїчну суму струмів, охоплених цим контуром:

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_t dl = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k,$$

де n – число провідників з струмами, охопленими контуром L довільної форми.

Для порівняння, циркуляція вектора напруженості електричного поля:

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

Принципова різниця між цими формулами в тому, що циркуляція вектора напруженості електричного поля завжди рівна нулю. Таке поле є потенціальним. Циркуляція вектора магнітної індукції не дорівнює нулю, таке поле називається **вихровим** або **соленоїдальним**.

5. Робота при русі провідника зі струмом у магнітному полі.

Провідник довжиною l (може вільно переміщатись) з струмом I знаходиться в однорідному магнітному полі (рис., Огурцов). Поле напрямлене перпендикулярно площині рисунка. Під дією сили Ампера $F = IlB$ провідник переміщається з положення 1 у положення 2.

Робота, виконувана магнітним полем:

$$dA = \vec{F} d\vec{x} = I d\vec{x} [\vec{l}, \vec{B}] = IlB dx = IB dS = Id\Phi,$$

де $dS = l dx$ – площа, яку перетинає провідник при його русі у магнітному полі; $BdS = d\Phi$ – потік вектора магнітної індукції, що пронизує дану площу.

Таким чином,

$$\boxed{dA = Id\Phi}.$$

Робота по переміщенню провідника з струмом у магнітному полі дорівнює добутку сили струму на магнітний потік, перетнутий рухомих провідником.

6. Дія магнітного поля на рухомий заряд. Сила Лоренца.

Провідник з струмом створює навколо себе магнітне поле. Електричний струм – це впорядкований рух електричних зарядів. Магнітне поле \vec{B} точкового заряду q , що вільно рухається з сталою нерелятивістською швидкістю ($v \ll c$):

$$\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{q[\vec{v}, \vec{r}]}{r^3}, \quad B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{qv \sin \alpha}{r^2},$$

де \vec{r} – радіус-вектор, проведений із заряду q до точки спостереження, α – кут між \vec{v} і \vec{r} .

Так само як і на провідник з струмом, магнітне поле діє і на окремий заряд, що рухається в магнітному полі.

Сила, що діє на електричний заряд q , який рухається у магнітному полі \vec{B} з швидкістю \vec{v} , називається **силою Лоренца**:

$$\vec{F} = q[\vec{v}, \vec{B}], \quad \text{або} \quad \boxed{F = qvB \sin \alpha},$$

де α – кут між \vec{v} і \vec{B} .

Напрямок сили Лоренца, так як і сили Ампера, визначається за правилом лівої руки. Сила Лоренца завжди перпендикулярна до швидкості зарядженої частинки. Тому вона змінює тільки напрям цієї швидкості, але не змінює її модуль. Отже, сила Лоренца роботи не виконує.

Постійне магнітне поле не виконує роботи над зарядженою частинкою, що рухаються в ньому, і кінетична енергія цієї частинки при русі у магнітному полі не змінюється.

Рух заряду, на який крім магнітного поля з індукцією \vec{B} діє і електричне поле з напруженістю \vec{E} описується формулою Лоренца:

$$\boxed{\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}]}.$$

8. Ефект Холла та його застосування.

Явище виникнення в твердих провідниках з струмом, вміщених у магнітне поле, електричного поля в напрямі, перпендикулярному до напрямку струму і індукції магнітного поля, називають **ефектом Холла**. Ефект Холла – це наслідок впливу сили Лоренца на рух носіїв струму.

У магнітному полі \vec{B} при протіканні через провідник струму з густиною \vec{j} встановлюється електричне поле з напруженістю

$$\vec{E} = R[\vec{B}, \vec{j}],$$

де R – стала Холла.

Нехай, наприклад, металічна пластинка з струмом розміщена у магнітному полі перпендикулярному струму (рис., Огурцов). Сила Лоренца приводить до зростання концентрації носіїв струму – електронів – біля верхнього краю пластинки. При цьому верхній край заряджається негативно, а нижній – позитивно. Стаціонарний розподіл зарядів буде досягнутий, коли дія створеного таким чином електричного поля зрівноважить силу Лоренца:

$$eE = e \frac{\Delta\varphi}{a} = evB,$$

або

$$\Delta\varphi = vBa,$$

де a – ширина пластинки, e – заряд електрона, $\Delta\varphi$ – поперечна (холлівська) різниця потенціалів.

Оскільки сила струму

$$I = jS = nevS,$$

де $S = ad$ – площа поперечного перерізу пластинки товщиною d і шириною a , n – концентрація електронів, v – середня швидкість впорядкованого руху електронів, то

$$\Delta\varphi = \frac{I}{nead} Ba = \frac{1}{en} \frac{IB}{d} = R \frac{IB}{d}.$$

Знак сталої Холла $R = \frac{1}{en}$ співпадає з знаком носія заряду, тому ефект Холла використовують для виявлення природи носіїв струму у речовинах і визначення їх концентрації.

Тема 3. Електромагнітна індукція.

1. Досліди Фарадея. Явище електромагнітної індукції. Закон Ленца.
2. Явище самоіндукції. Індуктивність.
3. Енергія магнітного поля (самостійно)

1. Досліди Фарадея. Явище електромагнітної індукції.

Англійський вчений Майкл Фарадей, знаючи про тісний зв'язок між електричним струмом і магнітним полем, був переконаний, що за допомогою магнітного поля можна створити в замкнутому провіднику електричний струм.

Він поставив ряд дослідів:

1. Соленоїд підключено до гальванометра (рис., Огурцов). Якщо в соленоїд всувати (чи висувати) постійний магніт, то в момент всування (чи висування) спостерігається відхилення стрілки гальванометра, тобто в соленоїді індукується ЕРС. Напрями відхилення стрілки при всуванні і висуванні протилежні. Якщо постійний магніт розвернути так, щоб полюси помінялись місцями, то і напрям відхилення стрілки зміниться на протилежний. Відхилення стрілки гальванометра буде тим більше, чим більша швидкість руху магніту відносно соленоїда. Такий же ефект буде, якщо постійний магніт залишити нерухомим, а відносно нього переміщати соленоїд.
2. Один соленоїд (K_1) під'єднано до джерела струму (рис., Огурцов). Інший соленоїд (K_2) під'єднано до гальванометра. Відхилення стрілки гальванометра спостерігається в моменти увімкнення чи вимикання струму, в моменти його збільшення чи зменшення чи при переміщенні котушок одної відносно іншої. При увімкненні та вимиканні стрілка відхиляється в різні боки, тобто знак індукційної ЕРС в цих випадках різний. Той самий ефект – створення в котушці (K_2) ЕРС різних знаків – спостерігається при збільшенні та зменшенні струму в котушці (K_1); при наближенні та віддаленні котушок.

Він багаточисельними дослідями підтвердив свої догадки, відкривши у 1831 р. явище електромагнітної індукції.

Фарадей експериментально встановив, що будь-яка зміна магнітного поля, що пронизує замкнутий контур, викликає в останньому появу електричного струму, так ніби в ньому

знаходиться джерело ЕРС. Отриманий в такий спосіб струм називають **індукційним (наведеним)**, а ЕРС, яка його створює – **ЕРС індукції**.

Пізніші детальні дослідження явища електромагнітної індукції засвідчили, що за допомогою цього явища можна отримати електричний струм практично будь-якої потужності, що дозволяє широко використовувати електричну енергію на практиці.

Фарадей, узагальнюючи дослідні факти, дійшов висновку, що ЕРС індукції залежить від того, як швидко змінюється магнітне поле: **чим швидше воно змінюється, тим більша ЕРС**. Однак ЕРС індукції не просто пропорційна швидкості зміни індукції магнітного поля, а пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, який визначається аналогічно потоку напруженості електричного поля. Тобто

$$\Phi_B = BS,$$

де B – індукція магнітного поля, S – площа, перпендикулярна лініям індукції поля, яку вони пронизують.

Якщо площа S не перпендикулярна, то

$$\Phi_B = BS \cos \theta,$$

де θ – кут між напрямком \vec{B} і перпендикуляром до площадки S .

Одиницею магнітного потоку є вебер ($Вб$).

Використовуючи поняття магнітного потоку, Фарадей сформулював наступний закон: **ЕРС індукції в контурі дорівнює швидкості зміни магнітного потоку через контур:**

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (12.1)$$

Це співвідношення називають **законом електромагнітної індукції Фарадея** і він є одним із фундаментальних законів електромагнетизму. Якщо замкнутий контур буде складатися не з одного, а N витків, то ЕРС індукції контуру дорівнюватиме сумі ЕРС індукції кожного із витків:

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (12.2)$$

Згідно експериментальних даних, ЕРС індукції збуджує в контурі електричний струм, який створює власне магнітне поле. Зв'язок між напрямком індукційного струму в контурі і індукційним магнітним полем був встановлений російським фізиком Ленцом (1833 р.). Знайдений ним зв'язок називають **правилом (законом) Ленца** для електромагнітної індукції: **ЕРС індукції створює в замкнутому контурі такий індукційний струм, який своїм магнітним полем протидіє тим змінам, які викликали індукційний струм.**

Напрямок індукційного струму можна визначити, користуючись **правилом правої руки: провідник (в нашому випадку виток) мисленно обхоплюється правою рукою так, щоб чотири пальці показували напрямок поля, а великий палець покаже напрямок індукційного струму.**

Зміст знаку мінус в формулі ЕРС: **він вказує напрямок, в якому діє ЕРС індукції.**

Зауважимо, що ЕРС індукції виникає тоді, і тільки тоді, коли відбувається зміна магнітного потоку. Звідси випливає, що ЕРС може бути індуквана двома способами: за рахунок зміни індукції магнітного поля або зміни площі контуру, або його орієнтації відносно магнітного поля.

2. Явище самоіндукції. Індуктивність.

Явище електромагнітної індукції спостерігається у всіх випадках, коли змінюється магнітний потік через контур. Якщо по провідному контуру тече струм, то він (контур) міститься у власному магнітному полі. Коли струм, що тече по контуру, змінюватиметься, то змінюватиметься і магнітний потік всередині контуру, який збуджуватиме в контурі ЕРС індукції. **Виникнення ЕРС індукції в контурі, яке викликано зміною магнітного поля струму, що тече в цьому ж контурі, називають явищем самоіндукції, а ЕРС, яка при цьому виникає – ЕРС самоіндукції.** Досвід показує, що коли струм у контурі збільшується, то зростаючий магнітний потік індукує в контурі ЕРС, під дією якої виникає струм, протилежний початковому струму, і старається загальмувати його ріст. Якщо ж струм в контурі зменшується, то магнітний потік, який також зменшується, збуджує ЕРС індукції, яка створює струм, направлений аналогічно вихідному, в результаті в контурі підтримується початкова сила струму.

Оскільки магнітне поле, яке пронизує контур, створюється струмом, що тече по контуру, то воно пропорційне струму в контурі ($\Phi \sim dI$). Крім того, магнітне поле залежить від форми і розмірів контуру, та магнітних властивостей середовища. Тому

$$d\Phi = LdI. \quad (12.3)$$

де L – стала величина, яка характеризує форму і розміри контуру та магнітні властивості середовища.

Оскільки самоіндукція є окремим випадком явища електромагнітної індукції, то закон Фарадея можна застосувати і для визначення ЕРС самоіндукції. Тоді

$$\varepsilon_c = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt}. \quad (12.4)$$

Сталу L називають **індуктивністю контуру** або **коефіцієнтом самоіндукції**.

В СІ одиницею індуктивності є генрі – Гн.

ЕРС самоіндукції завжди виникає при замиканні і розмиканні кола. Причому в деяких випадках вона може бути значною. Чим більша індуктивність кола, тим більша ЕРС і сила струму самоіндукції. Тому при вимиканні кіл з великою індуктивністю в них можуть виникати великі струми самоіндукції, що небезпечно як для самих кіл так і для людини, яка вимикає коло. Щоб запобігти виникненню великих струмів самоіндукції, вживають застережні заходи, як, наприклад, спочатку зменшують силу струму в колі, а потім повністю вимикають струм: для екстреного вимикання ліній електропередач, навантажених великою індуктивністю, передбачені спеціальні вимикачі, розміщені в приміщеннях без людей і забезпечених іскрогасними пристроями.

Тема 2. Електромагнітне поле.

1. Основні положення теорії Максвелла. Електромагнітне поле.
2. Електромагнітні хвилі і їх властивості.
3. Шкала електромагнітних хвиль (самостійно).

1. Основні положення теорії Максвелла. Електромагнітне поле.

До 1860 р. були вивчені чотири основні закони електромагнетизму:

1. Теорема Остроградського-Гаусса для електричного поля, яка встановлює точне співвідношення між потоком напруженості електричного поля через замкнуту поверхню і сумарним зарядом всередині цієї поверхні:

$$\Phi_E = \oint \vec{E} d\vec{S} = \frac{\sum q_i}{\varepsilon_0}. \quad (12.5)$$

2. Теорема Остроградського-Гаусса для магнітного поля:

$$\Phi_B = \oint \vec{B} d\vec{S} = 0. \quad (12.6)$$

Вона відображає той факт, що із замкнутого об'єму виходить стільки силових ліній індукції магнітного поля, скільки входить в нього.

Ці два закони відносяться до статичних ситуацій. Вони зв'язують електричні і магнітні поля з їх нерухомими джерелами.

3. Відкритий Фарадеєм закон електромагнітної індукції:

$$\varepsilon_i = \oint \vec{E} d\vec{l} \quad \text{або} \quad \varepsilon_i = -\frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (12.7)$$

Згідно закону електромагнітної індукції зміна магнітного поля призводить до появи електричного поля. Максвелл висловив гіпотезу: оскільки це справедливо, то повинно бути справедливим і зворотне – зміна електричного поля повинна супроводжуватись виникненням магнітного поля.

4. Згідно четвертого закону, який був встановлений Ампером, замкнуті лінії магнітного поля створюються рухомими електричними зарядами, тобто електричним струмом:

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I \quad \text{або} \quad \sum \vec{B} \Delta \vec{l} = \mu_0 I. \quad (12.8)$$

Ці чотири рівняння були розглянуті Максвеллом, де він виявив елементи симетрії між електричними і магнітними полями. Але симетрія була неповна. Зокрема, в природі не існує магнітних зарядів, а тому не існує магнітних струмів. У цих рівняннях є ще одна прогалина. Третє рівняння описує процеси, які відбуваються при зміні в часі магнітного поля, а зміна електричного

поля ніде не врахована. Максвелл припустив, що змінне електричне поле еквівалентне електричному струму, який він назвав струмом зміщення I_D . Навколо струму зміщення виникає магнітне поле. Враховуючи це, закон Ампера можна представити у вигляді:

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0(I + I_D), \quad (12.9)$$

або

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}, \quad (12.10)$$

де

$$I_D = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}.$$

Таким чином, можна вважати, що струм зміщення описує певні реальні властивості електромагнітного поля. Згідно гіпотези Максвелла **струм зміщення створює в просторі, що його оточує, магнітне поле таке ж, як і магнітне поле еквівалентного струму провідності**. Однак струм зміщення виникає тільки тоді, коли є в наявності змінне в часі електричне поле. Таким чином, приходимо до висновку, що **будь-яке змінне в часі електричне поле зв'язано з наявністю магнітного поля**.

Електростатичне поле, тобто поле нерухомих і незмінних за величиною зарядів, діє тільки на електричні заряди і ніяких магнітних дій не виявляє. Однак, якщо заряди рухаються один відносно одного або змінюються за величиною, то змінюється і створюване ними електричне поле, і тоді виникають поряд з електричними і магнітні дії. Оскільки змінне електричне поле завжди має змінну похідну по часу, тобто створює змінний струм зміщення, то звідси випливає, що і магнітне поле, яке виникає при цьому, також змінне в часі. Таким чином, простір заповнений змінним електричним полем, одночасно заповнений і магнітним полем. Отже, якщо змінне магнітне поле призводить до появи електричного поля, то електричне поле також буде змінюватись. Ця зміна електричного поля призведе до появи змінного магнітного поля і т.д. Обидва ці поля незмінно зв'язані між собою і утворюють **електромагнітне поле**.

На основі цього **Максвелл записав чотири рівняння**, які при відсутності діелектриків і магнетиків матимуть вигляд:

$$\oint \vec{E} d\vec{S} = \frac{q}{\varepsilon_0}, \quad (12.11)$$

$$\oint \vec{B} d\vec{S} = 0, \quad (12.12)$$

$$\oint \vec{E} d\vec{S} = \frac{d\Phi_B}{dt}, \quad (12.13)$$

$$\oint \vec{E} d\vec{S} = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}. \quad (12.14)$$

Фізичний зміст рівнянь Максвелла у наступному:

- 1) узагальнений закон Кулона (12.11) пов'язує електричне поле з його джерелом, електричними зарядами;
- 2) математичне вираження факту відсутності ізольованих магнітних зарядів: силові лінії магнітного поля неперервні (12.12);
- 3) зміна магнітного поля породжує електричне поле (12.13);
- 4) магнітне поле створюється струмом або змінним електричним полем.

2. Електромагнітні хвилі і їх властивості.

Максвелл виявив, що, оскільки змінне електричне поле породжує у вільному просторі магнітне поле, а змінне магнітне поле породжує електричне, то кінцевим підсумком подібного зв'язку змінних полів буде поява хвилі, яка містить електричне і магнітне поле і здатна поширюватись у просторі. Миттєве зображення електромагнітної хвилі показано на рис. (12.1, рис. 8.8, Яцура). Вся ця картина рухається з часом вправо з швидкістю v .

Електромагнітні хвилі володіють такими **властивостями**:

- 1) вектори змінного електричного і змінного магнітного полів плоскої електромагнітної хвилі взаємно перпендикулярні;
- 2) напрямок поширення електромагнітної хвилі визначається за правилом правого гвинта: хвиля поширюється у напрямку поступального руху гвинта, коли гвинт повертається у напрямку від вектора \vec{E} до вектора \vec{B} .

- 3) електромагнітні хвилі є поперечними;
4) швидкість поширення всіх видів електромагнітних хвиль у вакуумі дорівнює

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с},$$

а в середовищі

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon \mu}};$$

- 5) електромагнітні хвилі переносять енергію і кількість руху (імпульс).