

23.05.2021

Група 25

Фізика і астрономія

Урок 54-55

Тема: Енергія магнітного поля струму

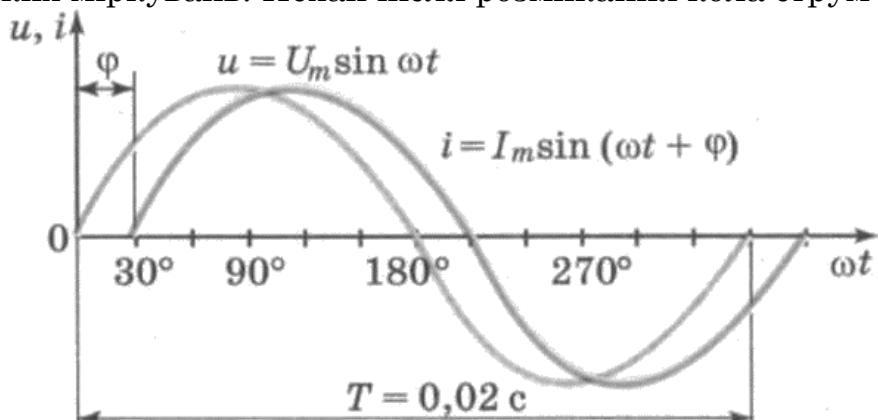
Мета: навчальна – ознайомити учнів з поняттям енергії у магнітному полі струму

розвивальна – формувати в учнів вміння користуватися науково-популярною літературою та виявлення творчих здібностей при розв'язуванні вправ; виховна – виховати трудолюбивість, точність і чіткість при відповідях і розв'язуванні завдань та навчити дітей «бачити» фізику навколо себе.

Матеріали до уроку:

Енергія магнітного поля. У попередньому параграфі ми розглянули дослід з виникнення у провідниках струму розмикання. Підкреслимо, що лампочка продовжувала горіти (струм текти) після вимкнення зовнішнього джерела. Це свідчить про те, що магнітне поле в катушці має енергію. Очевидно, після замикання електричного кола від джерела струму деяка додаткова енергія була затрачена на створення магнітного поля. Під час його зникнення енергія частково повертається в коло. Отже, магнітне поле, як і електричне, має енергію.

Енергію магнітного поля катушки індуктивності визначимо, виходячи з таких міркувань. Нехай після розмикання кола струм зменшується з часом



Мал. 148. Графіки зміни напруги та сили змінного струму

лінійно. У цьому разі ЕРС самоіндукції має постійне значення, що дорівнює $\mathcal{E}_{ci} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$. Нехай t – час, за який сила струму в колі лінійно зменшується від

початкового значення I до 0. За цей час в колі проходить електричний заряд $q = I_{sep}t = \frac{I}{2}t$. Робота електричного струму при цьому $A = q\mathcal{E}_{ci} = \frac{It}{2} \cdot \frac{LI}{t} = \frac{LI^2}{2}$.

Ця робота виконується за рахунок енергії магнітного поля катушки індуктивності.

 **Енергія W_m магнітного поля** котушки індуктивності дорівнює половині

$$\text{добутку її індуктивності на квадрат сили струму в ній}, W_m = \frac{LI^2}{2}.$$

Пригадаємо, що електрична енергія виражається формулами: $W_{\text{ел}} = q \frac{U}{2}$,

$W_{\text{ел}} = \frac{CU^2}{2}$ та $W_{\text{ел}} = \frac{q^2}{2C}$ і зосереджена між обкладками зарядженого конденсатора, тобто локалізована в об'ємі електричного поля.

Як і у випадку з конденсатором, магнітна енергія міститься безпосередньо в об'ємі магнітного поля.

Густину енергії магнітного поля. Встановимо зв'язок між енергією, яка міститься в одиниці об'єму поля, і індукцією магнітного поля. Цей

зв'язок можна встановити, розглянувши будь-який провідник зі струмом, для якого можна обчислити індуктивність та індукцію поля. Найзручніше це зробити для соленоїда, в якого магнітне поле, а отже, і енергія поля, зосереджені в межах його об'єму Sl (S – площа перерізу, l – довжина соленоїда), а індукцію магнітного поля в межах цього об'єму із задовільною точністю можна вважати скрізь однаковою і рівною $B = \mu \mu_0 \frac{IN}{l}$. Індук-

тивність такого соленоїда $L = \frac{\mu \mu_0 N^2 S}{l}$. Підставивши у формулу $W_m = \frac{LI^2}{2}$

вирази для індуктивності $L = \frac{\mu \mu_0 N^2 S}{l}$ та сили струму $I = \frac{Bl}{\mu \mu_0 N}$, отримаємо

$$W_m = \frac{B^2 Sl}{2\mu \mu_0}. \text{ Оскільки } Sl = V, \text{ то густина енергії } \omega_m = \frac{W_m}{V} = \frac{B^2}{2\mu \mu_0}.$$

Цей вираз спрвджується не тільки для однорідного поля, а й для довільних змінних магнітних полів.

Взаємозв'язок електричного і магнітного полів як прояв єдиного електромагнітного поля. Сформульовані раніше закони електромагнетизму встановлено для електричного струму провідності, який створюється напрямленим рухом мікроскопічних частинок – носіїв заряду (електронів та іонів) у провідниках та вакуумі.

Проте Амперу та його сучасникам було невідомо, які ефекти виникатимуть під час руху макроскопічних заряджених тіл. Електричний струм, зумовлений переміщенням макроскопічних заряджених тіл, отримав назву **конвекційного**. Ученім, які розробляли класичну теорію електромагнетизму, не здавалось очевидним, що ці струми (проводності та конвекційний) є принципово однаковими джерелами магнітного поля.

Перші досліди, поставлені, щоб відповісти на питання, чи створює наелектризоване тіло, що перебуває в русі, магнітне поле (поряд з електричним), в Берлінському університеті у 1878 р., провів американський фізик Генрі Роуланд (1848–1901). Ці дослідження продовжив російський фізик О. О. Ейхенвальд (1863–1944) у 1901–1904 рр. Особливо важко було під час цих експериментів точно вимірюти напруженість магнітного поля конвекційного струму, створюваного зарядженим диском, який обертається навколо своєї осі. Адже індукція цього поля була в тисячі разів меншою за індукцію магнітного поля Землі.

Досліди Роуланда та Ейхенвальда дали позитивні результати: справді, конвекційні струми, пов'язані з механічним рухом наелектризованих тіл, створюють таке саме магнітне поле, як і відповідні їм струми провідності. Отже, в цих дослідах було доведено існування магнітного поля під час механічного руху наелектризованих тіл, а точними вимірюваннями підтверджено еквівалентність конвекційних струмів та струмів провідності. Досліди Роуланда і Ейхенвальда належать до серії перших експериментів, в яких було підтверджено теоретичні висновки про єдину природу електричних і магнітних явищ, які випливали із теоретичних праць Максвелла.

До Максвелла існували окрім вчення про електрику, вчення про магнетизм, вчення про світло. «Місток» між електричними та магнітними явищами було наведено експериментальними відкриттями Ерстеда, Ампера, Фарадея. Джеймс-Клерк Максвелл поставив перед собою завдання узагальнити всі відомі на той час експериментальні факти з макроскопічної електродинаміки і викласти їх у вигляді структої послідовної математичної теорії, яка б для електричних і магнітних явищ відігравала б таку саму роль, як закони динаміки Ньютона в класичній механіці. Результатом його теоретичних досліджень стала система рівнянь Максвелла, яку він виклав у своїй знаменитій праці «Трактат з електрики і магнетизму», що вийшла у світ у 1873 р. Пізніше в працях німецького фізика Генріха Герца (1867–1894) та англійського фізика Олівера Хевісайда (1850–1925) рівняння Максвелла набули сучасного вигляду.

Оскільки математична форма запису цих рівнянь передбачає знання інтегрального та диференціального числення, ми ознайомимось із ними лише якісно.

Перше рівняння Максвелла встановлює два джерела збудження магнітного поля. Оскільки у всіх експериментах магнітне поле було обов'язково пов'язане з електричним струмом, Дж. Максвелл у своїх теоретичних працях змінне електричне поле, яке породжувало вихрове магнітне поле, назвав струмом зміщення (на відміну від струму провідності та конвекційного струму). Тепер цю назву не можна визнати вдалою. Тільки при розгляді змінного електричного поля в діелектриках вона дещо відбиває дійсну фізичну картину, пов'язану зі зміщенням зв'язаних електричних зарядів у молекулах і атомах середовища. У вакуумі під струмом зміщення слід розуміти тільки змінне електричне поле. Іншими словами, перше рівняння Маквелла стверджує, що магнітне поле може збуджуватись не тільки рухомими зарядами, а й змінами електричного поля.

Друге рівняння Максвелла є відображенням закону електромагнітної індукції.

Третє рівняння – закон про поле електричних зарядів, тобто є узагальненням закону Кулона.

Із четвертого рівняння випливає, що у природі не існує вільних магнітних зарядів, на яких, подібно до електричних, могли б починатись і закінчуватись лінії індукції. Іншими словами, в природі не існує інших джерел магнітного поля, крім електричних струмів.

Слід зазначити, що у рівняннях Максвелла середовище враховується феноменологічно, тобто без розкриття внутрішнього механізму взаємодії речовини з полем, і тому питання пояснення, узагальнення і визначення меж застосування теорії на основі молекулярно-атомної структури речовини та електронної будови молекул і атомів у ній не розглядається. Систематичне вивчення цього кола питань – одне з основних завдань *електронної теорії*, виникнення якої було наступним після теорії Максвелла етапом у розвитку електродинаміки.

Підведемо підсумки. *Електромагнітне поле є формою матерії, завдяки якій здійснюється взаємодія між електрично зарядженими частинками.* Це

поняття відбиває єдність електричного і магнітного полів, прояв яких залежить від вибору системи відліку. Наприклад, у системі відліку, відносно якої електричні заряди перебувають у стані спокою, взаємодія між ними здійснюється через електростатичне поле, магнітне поле тут відсутнє. В системі відліку, відносно якої електричні заряди рухаються, взаємодія між ними відбувається за допомогою обох полів – електричного і магнітного. У випадку нестационарного електромагнітного поля зміни магнітного поля в деякій точці ведуть до виникнення там вихрового електричного поля і, навпаки, змінне або вихрове електричне поле створюють вихрове магнітне поле. Взаємозв'язок між ними та їх взаємоперетворення відображають рівняння Максвелла.

Домашнє завдання: написати конспект

Зворотній зв'язок

E-mail vitasergiiivna1992@gmail.com

!!!! у повідомленні з д/з не забуваєм вказувати прізвище, групу і дату уроку.