

§ 20. ДІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА РУХОМІ ЗАРЯДЖЕНІ ЧАСТИНКИ. СИЛА ЛОРЕНЦА



Рухомі електричні заряди не тільки створюють у навколишньому просторі магнітне поле, але й самі зазнають дії з боку магнітних полів. Про те, як розрахувати силу, з якою магнітне поле діє на заряджені частинки, що рухаються в магнітному полі, і від чого залежить характер їхнього руху, ви дізнаєтесь із цього параграфа.



Як визначити силу Лоренца

Сила Лоренца \vec{F}_L — це сила, з якою магнітне поле діє на рухомі заряджені частинки*.

Для визначення модуля сили Лоренца звернемося до формули для розрахунку сили Ампера — сили, що діє на провідник зі струмом з боку магнітного поля: $F_A = BIl \sin \alpha$.

За означенням сили струму $I = \frac{|q|}{t}$, де q — заряд, що пройшов через поперечний переріз провідника за час t . Через поперечний переріз провідника довжиною l протягом деякого інтервалу часу t проходить N частинок із зарядом q_0 кожна, тобто

* Названа на честь голландського фізика та математика Гендріка Антона Лоренца (1853–1928).

загальний заряд становить $q = q_0 N$. Таким чином, сила Ампера — сила, що діє на N заряджених частинок, — дорівнює:

$$F_A = B I l \sin \alpha = B \cdot \frac{|q_0| N}{t} \cdot l \sin \alpha = B |q_0| N \cdot \frac{l}{t} \cdot \sin \alpha = B |q_0| N v \sin \alpha, \text{ де } v = \frac{l}{t} —$$

середня швидкість руху заряджених частинок. Зрозуміло, що сила, яка діє на одну частинку, буде в N разів меншою. Отже, **модуль сили Лоренца** F_L дорівнює:

$$F_L = B |q_0| v \sin \alpha,$$

де B — магнітна індукція поля, у якому рухається частинка; q_0 — заряд частинки; v — швидкість руху частинки; α — кут між лінією руху частинки та лінією магнітного поля.

Напрямок сили Лоренца визначають за **правилом лівої руки**:

Якщо розташувати ліву руку так, щоб лінії магнітної індукції входили в долоню, а напрямок чотирьох пальців збігався з напрямком швидкості руху позитивно зарядженої частинки (або був напрямлений протилежно напрямку швидкості руху негативно зарядженої частинки), то відігнутий на 90° великий палець укаже напрямок сили Лоренца.

2 Як рухаються заряджені частинки під дією сили Лоренца

Залежно від того, під яким кутом заряджена частинка влітає в магнітне поле і чи є магнітне поле однорідним, траєкторія руху частинки буде різною. Розглянемо можливі випадки руху зарядженої частинки в однорідному магнітному полі.

1. *Швидкість руху частинки напрямлена вздовж ліній магнітної індукції поля* (рис. 20.1, а). У цьому випадку кут α між напрямком вектора \vec{v} швидкості та вектором \vec{B} магнітної індукції дорівнює нулю (або 180°). Оскільки $\sin \alpha = 0$, то $F_L = B |q_0| v \sin \alpha = 0$. Отже, магнітне поле не діє на частинку, і, якщо немає інших сил, вона рухатиметься **рівномірно прямолінійно**.

2. *Швидкість руху частинки напрямлена перпендикулярно до ліній магнітної індукції поля* (рис. 20.1, б). У цьому випадку кут α між напрямком вектора \vec{v} швидкості та вектором \vec{B} магнітної індукції дорівнює 90° , тому

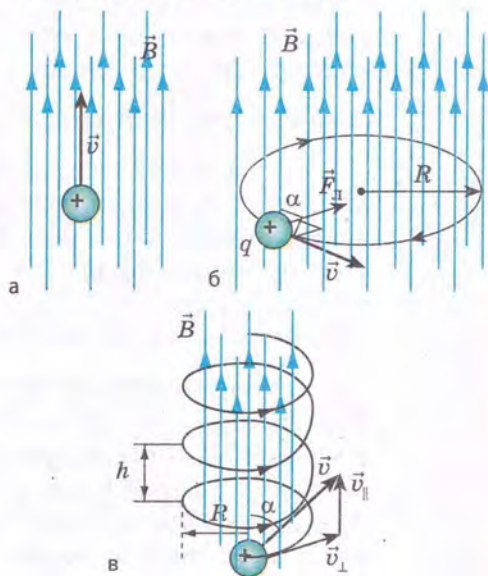


Рис. 20.1. Рух зарядженої частинки в магнітному полі: а — швидкість \vec{v} руху частинки паралельна вектору \vec{B} магнітної індукції поля ($\vec{v} \parallel \vec{B}$) — частинка рухається рівномірно прямолінійно; б — швидкість \vec{v} руху частинки перпендикулярна до вектора \vec{B} магнітної індукції поля ($\vec{v} \perp \vec{B}$) — частинка рухається рівномірно по колу; в — швидкість \vec{v} руху частинки напрямлена під деяким кутом α до вектора \vec{B} магнітної індукції поля — частинка рухається рівномірно по спіралі

$F_L = B|q_0|v \sin \alpha = B|q_0|v$, бо $\sin \alpha = 1$. Згідно з правилом лівої руки в будь-якій точці траєкторії частинки сила Лоренца перпендикулярна до швидкості її руху, а отже, частинка рухатиметься *рівномірно по колу*. Відповідно до другого закону Ньютона $F_L = ma_{\text{ц}}$, де m — маса частинки. Тоді $B|q_0|v = \frac{mv^2}{R}$. Звідси знайдемо радіус R траєкторії руху частинки та період T її обертання:

$$B|q_0|v = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow R = \frac{mv}{B|q_0|}; \quad T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi mv}{B|q_0|v} = \frac{2\pi m}{B|q_0|}.$$

Період обертання частинки не залежить від швидкості її руху та радіуса траєкторії.

3. Швидкість руху частинки напрямлена під деяким кутом α до ліній магнітної індукції поля (рис. 20.1, в). У цьому випадку швидкість \vec{v} руху частинки можна розкласти на дві складові: перша складова (\vec{v}_{\parallel}) напрямлена вздовж магнітних ліній поля, і її поле не змінює; друга складова (\vec{v}_{\perp}) перпендикулярна до ліній поля, і сила Лоренца змінює її напрямок, викликаючи рух частинки по колу. Таким чином, траєкторія руху частинки — *спіраль*, крок h (відстань між сусідніми витками) якої визначається складовою \vec{v}_{\parallel} :

$$h = v_{\parallel}T, \text{ а радіус } R \text{ витка спіралі — складовою } \vec{v}_{\perp}: R = \frac{mv_{\perp}}{Bq}.$$

★ Той факт, що період обертання частинки в однорідному магнітному полі не залежить від швидкості її руху та радіуса траєкторії, використовують у *циклотронах* — прискорювачах важких частинок (протонів, йонів). На русі зарядженої частинки в однорідному магнітному полі базується дія *мас-спектрометрів* — пристроїв, за допомогою яких можна вимірювати маси заряджених частинок.★

3 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Під дією електричного поля електрон розганяється у вакуумі зі стану спокою і влітає в однорідне магнітне поле перпендикулярно до ліній магнітної індукції. Яку індукцію має магнітне поле і яку прискорювальну різницю потенціалів пройшов електрон, якщо він описує коло радіусом $6,0 \cdot 10^{-3}$ м за $6,28 \cdot 10^{-9}$ с?

B — ?

$\Delta\phi$ — ?

Дано:

$$q_0 = e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$v_0 = 0$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$R = 6,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$T = 6,28 \cdot 10^{-9} \text{ с}$$

Аналіз фізичної проблеми. У задачі маємо справу з двома рухами: 1) спочатку — прискорений рух електрона в електричному полі; 2) потім — рівномірний рух електрона по колу в магнітному полі.

Пошук математичної моделі, розв'язання

1) Під час руху електрона в електричному полі це поле виконує роботу A , тому кінетична енергія електрона збільшується: $A = \Delta W_k$, де

$$A = q\Delta\phi = e\Delta\phi; \quad \Delta W_k = W_k - W_{k0} = \frac{mv^2}{2}.$$

Таким чином, $e\Delta\phi = \frac{mv^2}{2}$, звідки $\Delta\phi = \frac{mv^2}{2e}$ (1). Швидкість руху електрона визначимо, знаючи період T його обертання та радіус R траєкторії: $T = \frac{2\pi R}{v} \Rightarrow v = \frac{2\pi R}{T}$ (2).

2) У магнітному полі під дією сили Лоренца електрон рухається по колу, отже, згідно з другим законом Ньютона $F_L = ma_{\text{дц}}$.

Оскільки $F_L = B|q_0|v$, а $a_{\text{дц}} = \frac{v^2}{R}$, маємо: $B|q_0|v = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow B|e| = \frac{mv}{R}$,

звідки $B = \frac{mv}{R|e|}$ (3).

Підставивши формулу (2) у формули (1) і (3), одержимо:

$$B = \frac{2\pi m}{T|e|}; \Delta\phi = \frac{4\pi^2 R^2 m}{2eT^2}.$$

Визначимо значення шуканих величин:

$$[B] = \frac{\text{кг}}{\text{Кл} \cdot \text{с}} = \frac{\text{кг}}{\text{А} \cdot \text{с} \cdot \text{с}} = \frac{\text{кг} \cdot \text{м} / \text{с}^2}{\text{А} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} = \text{Тл};$$

$$\{B\} = \frac{6,28 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{6,28 \cdot 10^{-9} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 5,7 \cdot 10^{-3}, B = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}.$$

$$[\Delta\phi] = \frac{\text{м}^2 \cdot \text{кг}}{\text{Кл} \cdot \text{с}^2} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл}} = \text{В}; \{\Delta\phi\} = -\frac{4 \cdot 3,14^2 \cdot 36 \cdot 10^{-6} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,28^2 \cdot 10^{-18}} \approx -102,$$

$$\Delta\phi \approx -102 \text{ В}.$$

Знак «-» свідчить про те, що електрон рухається в бік зменшення потенціалу, що є цілком реальним.

Відповідь: індукція магнітного поля $B = 5,7 \cdot 10^{-3}$ Тл; електрон пройшов прискорювальну різницю потенціалів $\Delta\phi \approx -102$ В.

Підбиваємо підсумки

Силу, з якою магнітне поле діє на рухому заряджену частинку, називають силою Лоренца. Модуль цієї сили визначається за формулою $F_L = B|q_0|v \sin \alpha$, напрямком — за правилом лівої руки.

Якщо початкова швидкість руху частинки напрямлена паралельно лініям магнітної індукції поля, то частинка рухатиметься рівномірно прямолінійно; якщо перпендикулярно до цих ліній — рівномірно по колу радіусом $R = \frac{mv}{B|q_0|}$; якщо під кутом — то рівномірно по спіралі.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення сили Лоренца.
2. За якою формулою визначають модуль сили Лоренца? Виведіть цю формулу.
3. Як визначити напрямок сили Лоренца, яка діє на позитивно заряджену частинку? на негативно заряджену частинку?
4. Як рухається частинка, якщо її початкова швидкість напрямлена паралельно лініям магнітної індукції? перпендикулярно до ліній магнітної індукції? під кутом до ліній магнітної індукції?
5. Виведіть формули для визначення радіуса траєкторії руху та періоду обертання частинки, якщо швидкість її руху перпендикулярна до вектора магнітної індукції поля.



Вправа № 18

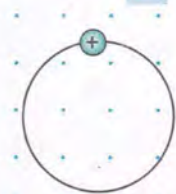


Рис. 1

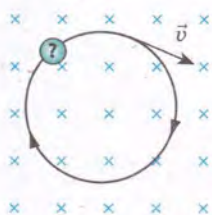
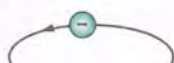


Рис. 2



1. Визначте: напрямок руху частинки (рис. 1); знак заряду частинки (рис. 2); напрямок магнітного поля, в якому рухається частинка (рис. 3).
2. Чому дві однойменно заряджені нерухомі частинки завжди відштовхуються, а рухомі можуть як відштовхуватися, так і притягуватися?
3. Існують різні види генераторів постійного струму. Робота одного з таких генераторів (МГД-генератора) базується на принципі поділу потоку плазми на два різнойменно заряджені потоки. Як ви гадаєте, як за допомогою магнітного поля можна одержати такий поділ?
4. Протон рухається в магнітному полі у вакуумі зі швидкістю $3 \cdot 10^6$ м/с перпендикулярно до ліній магнітної індукції поля. Визначте силу, яка діє на протон, і радіус його орбіти. Магнітна індукція поля дорівнює 5,6 мТл і є постійною.
5. Електрон, почавши рух зі стану спокою і пройшовши різницю потенціалів 220 В, потрапляє в однорідне магнітне поле індукцією 5,0 мТл і рухається по круговій орбіті радіусом 1,0 см. Визначте масу електрона.
- ★ 6. Електрон влітає в однорідне магнітне поле під кутом 60° до ліній магнітної індукції і починає рухатися з періодом обертання 60 мкс по спіралі діаметром 10,0 см. Визначте швидкість руху електрона, магнітну індукцію поля та крок спіралі.