

5. МАГНІТНЕ ПОЛЕ В РЕЧОВИНІ

5.1. Питання теми

1. Намагнічення речовини. Величини, що характеризують намагнічення.
2. Феромагнетики, їхня природа та властивості.
3. Енергія магнітного поля.

5.2. Основні визначення та формули

1. Намагніченість (вектор намагнічування) \vec{J} визначається магнітним моментом одиниці об'єму магнетика:

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^N \vec{p}_{mi}, \quad (5.1)$$

де N – число частинок, які містяться у фізично нескінченно малому об'ємі ΔV , \vec{p}_{mi} – магнітний момент i – тої частинки.

2. Вектором напруженості \vec{H} магнітного поля називається лінійна комбінація векторів індукції магнітного поля \vec{B} і \vec{J} :

$$\vec{H} = \vec{B} / \mu_0 - \vec{J}. \quad (5.2)$$

3. Вектори \vec{B} і \vec{H} зв'язані співвідношенням:

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad (5.3)$$

де μ – магнітна проникність середовища (для вакууму $\mu = 1$).

4. Умови на межі розділу двох магнетиків.

$$B_{1n} = B_{2n}, \quad H_{1\tau} = H_{2\tau} \quad (5.4)$$

5. Циркуляція вектора напруженості \vec{H} вздовж замкнутого контуру Γ дорівнює алгебраїчній сумі струмів, які охоплюються цим контуром:

$$\oint_{\Gamma} \vec{H} d\vec{l} = \oint_{\Gamma} H dl \cos(\vec{H} \wedge d\vec{l}) = \oint_{\Gamma} H_{\ell} dl = \sum I, \quad (5.5)$$

де H_{ℓ} проекція вектора \vec{H} на напрямок елемента контуру $d\vec{l}$.

6. Магнітна індукція в середині довгого соленоїда з магнітним осердям

$$B = \mu\mu_0 nI, \quad (5.6)$$

де n – число витків, які приходяться на одиницю довжини соленоїда, I – сила струму у витках, μ – магнітна проникність речовини осердя.

7. Індуктивність довгого соленоїда, об'єм якого V з магнітним осердям

$$L = \mu\mu_0 n^2 V. \quad (5.7)$$

8. Енергія W магнітного поля, яке створене струмом I в соленоїді або тороїді з індуктивністю L , визначається за формулою:

$$W = \frac{1}{2} LI^2. \quad (5.8)$$

9. Об'ємна густина енергії магнітного поля :

$$\omega = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{BH}{2}, \quad (5.9)$$

де B – магнітна індукція, H – напруженість магнітного поля, μ – магнітна проникність середовища.

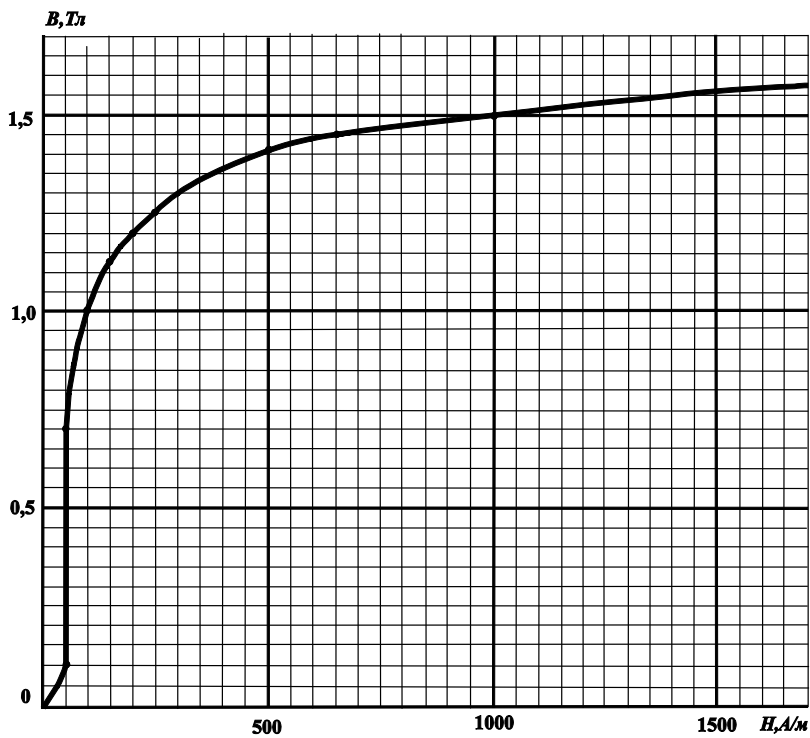


Рис. 5.1. Основна крива намагнічення технічно чистого заліза

5.3. Питання на самопідготовку

1. Які речовини називаються магнетиками?
2. За допомогою яких фізичних величин проводять класифікацію магнетиків?
3. Провести класифікацію магнетиків.
4. Дати визначення вектора намагнічення речовини.
5. Які існують характеристики магнітного поля в речовині?
6. Який існує зв'язок між вектором напруженості і вектором індукції магнітного поля в феромагнетиках?
7. Схематично зобразити залежність індукції магнітного поля від напруженості магнітного поля у феромагнетиках. Пояснити цю залежність.
8. Записати співвідношення між складовими векторів B і H на межі двох магнетиків.
9. Який фізичний зміст магнітної проникності феромагнетика?
10. Чому значення магнітної проникності для різних феромагнетиків не приводяться в довідникових таблицях?
11. Дати визначення коерцитивної сили та залишкової намагніченості для феромагнетика.
12. Які феромагнетики мають назву магніто м'яких та магніто жорстких ?
13. Де в техніці зв'язку застосовують феромагнетики?
14. Вивести формулу для енергії магнітного поля соленоїда.
15. Вивести формулу для густини енергії магнітного поля.

5.4. Методичні вказівки

1. Розрахунки магнітних полів при наявності магнітних середовищ значно спрощуються із введенням вектора напруженості \vec{H} як характеристики магнітного поля, який визначається через вектори \vec{B} і \vec{J} відповідно (5.2). Особливість вектора \vec{H} в тому, що його циркуляція по замкнутому контуру дорівнює за формулою (5.5) алгебраїчній сумі струмів, що охоплюється цим контуром. Іншими словами, циркуляція вектора \vec{H} не залежить від магнітних властивостей середовища, через яке проходить вибраний контур. Тому співвідношення (5.5) широко застосовується для розрахунку магнітних полів, де за контур інтегрування вибирають одну із замкнутих ліній індукції магнітного поля. Однак сам вектор \vec{H} на відміну від своєї циркуляції, залежить від магнітних властивостей середовища. Наприклад, напруженість магнітного поля як в повітряному проміжку між полюсами електромагніту, так і в середині його залізного осердя залежить не тільки від сили струму в обмотці електромагніта, але і від магнітних властивостей заліза. Тільки у 2-х випадках – коли осердя електромагніта є суцільне кільце (тор) або нескінченно довгий стержень вектор – \vec{H} не залежить від магнітних властивостей середовища, а визначається тільки струмом в обмотці.

2. Щоб розв'язати рівняння, яке отримується в результаті застосування теореми про циркуляцію вектора \vec{H} (5.5) часто буває необхідно знати зв'язок між векторами \vec{H} і \vec{B} (крім того, що виражений формулою (5.2)). Цей зв'язок встановлюється співвідношенням (5.3): $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$. Однак це не значить, що між векторами \vec{H} і \vec{B} існує пропорціональна залежність у феромагнетиках. Магнітна проникність μ феромагнетика сама залежить від магнітного поля всередині речовини і тому є змінною величиною. Таким чином, між векторами \vec{B} і \vec{H} існує нелінійний зв'язок (рис 5.1).

Внаслідок явища магнітного гістерезису крива намагнічування феромагнетика (5.1) не співпадає з кривою їхнього розмагнічування. Тому для знаходження зв'язку між векторами \vec{H} і \vec{B} у феромагнетиках користуються кривими намагнічування (рис 5.1) тільки у тих випадках, коли відомо що стан феромагнетика,

який розглядається в задачі, виник в процесі його намагнічування. При цьому необхідно, щоб на початку процесу намагнічування феромагнетик не мав залишкової намагніченості інакше крива намагнічування не буде співпадати з основною кривою намагнічування, яка приводиться в довідниках (в нас на рис. 5.1).

3. При розгляді тороїдів, осердя яких складається з двох різних частин, виготовлених з речовин з різними магнітними проникностями, конкретно – тороїдів з вакуумними проміжками, необхідно мати на увазі, що нормальна складова індукції магнітного поля при переході з одного середовища в інше не зазнає розриву

$B_{1n} = B_{2n}$. А оскільки тангенціальні складові в цьому випадку дорівнюють нулеві, то магнітна індукція в одному середовищі B_1 дорівнює магнітній індукції в іншому середовищі B_2 .

Якщо в задачах не вказаний конкретний феромагнетик, то для розв'язання задачі необхідно користуватись графіком на рис. 5.1.

5.5. Приклади розв'язування задач

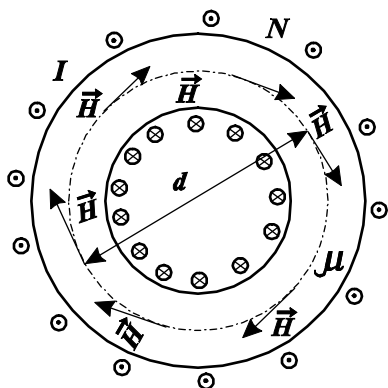


Рис. 5.2

Задача 5.1. Суцільний тороїд із залізним осердям має $N = 400$ витків із тонкого проводу, який намотаний в один шар. Середній діаметр тороїда $d = 25$ см. Визначити напруженість магнітного поля всередині тороїда, магнітну проникність μ заліза, а також намагніченість J при значеннях сили струму в обмотці тороїда $I_1 = 0,5$ А і $I_2 = 2,85$ А.

Розв'язок. Використаємо

теорему про циркуляцію вектора напруженості \vec{H} (5.5) вздовж кола, діаметр якого d (середня лінія тороїда) (рис. 5.2). Так як поле в середині тороїда однорідне, то

$$\oint_{\Gamma} \vec{H} d\vec{l} = H\pi d = \sum I = NI.$$

Звідки знаходимо напруженість поля $H = \frac{NI}{\pi d}$. Нескладні

розрахунки дають для 2-х значень струму: $H_1 = 225$ А/м, $H_2 = 1450$ А/м. Тепер використаємо графік на рис. (5.1) і визначимо індукції магнітного поля для двох напруженостей магнітного поля: $B_1 = 1,25$ Тл, $B_2 = 1,55$ Тл.

За формулою (5.3) знаходимо магнітні проникності ($\mu = B/\mu_0 H$):

$$\mu_1 = 3900, \quad \mu_2 = 850,$$

а за формулою (5.2) намагніченість ($J = B/\mu_0 - H$)

$$J_1 = 9,9 \cdot 10^5 \text{ А/м}, \quad J_2 = 1,23 \cdot 10^6 \text{ А/м}.$$

Висновок: Аналіз отриманих розрахунків дозволяє встановити, що сила струму I пропорційна тільки напруженість магнітного поля всередині феромагнетика (заліза), тоді як інші величини (індукція B , магнітна проникність μ , намагніченість J) є нелінійні функції H , а значить і нелінійні функції сили струму I .

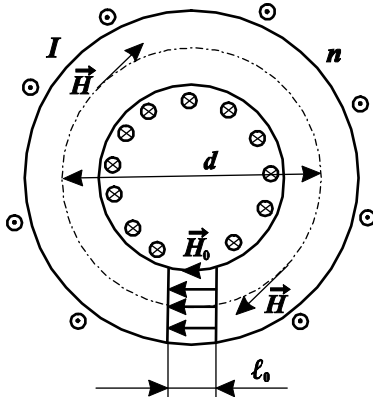


Рис. 5.3

5.3) можемо записати :

$$H \pi d + H_0 l_0 = \pi d n I, \quad (1)$$

де H – напруженість магнітного поля в осерді, H_0 – напруженість магнітного поля в зазорі. Так як відносна магнітна проникність повітря $\mu = 1$, то за формулою (5.3)

$$H_0 = B_0 / \mu_0 = 10^7 / (4 \pi) \text{ А/м} .$$

Магнітні індукції в повітряному проміжку і в осерді однакові (розсіювання поля в зазорі нехтуємо, а згідно (5.4) $B_{1n} = B_{2n}$). Тоді із графіка на рис (5.1) знаходимо, що для $B = B_0 = 1 \text{ Тл}$ $H = 100 \text{ А/м}$. Таким чином визначимо напруженість поля в осерді. Із формули (1) знаходимо , що

$$I = \frac{H}{n} + \frac{B_0 l_0}{\mu_0 \pi d n} \cong 2,63 \text{ А} .$$

Задача 5.2. Обмотка тороїда, який має залізне осердя із повітряним проміжком $l_0 = 3 \text{ мм}$, містить $n = 1000$ витків на метр довжини. Середній діаметр тороїда $d = 30 \text{ см}$ При якій силі струму I в обмотці тороїда індукція B_0 в проміжку буде дорівнювати 1 Тл . Розрахувати силу струму I в обмотці, при якій намагніченість осердя досягне насичення.

Розв'язок. Розсіюванням магнітного поля в зазорі будемо нехтувати. Згідно (5.4), (5.5) і (рис.

Якщо осердя намагнічене до насичення, то згідно рис. 5.1 $B = 1,55$ Тл, а $H = 1400$ А/м. Тоді сила струму в обмотці повинна бути :

$$I = \frac{1400}{1000} + \frac{1,55 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \pi \cdot 0,3 \cdot 1000} = 5,33 \text{ А} .$$

Коли повітряний проміжок відсутній ($l_0 = 0$), то насичення намагнічення осердя можна досягти при значно меншій силі струму, а саме

$$I = \frac{H}{n} = \frac{1400}{1000} = 1,4 \text{ А} .$$

Висновки. Як бачимо із вище приведених розрахунків величина сили струму в обмотках тороїда, при якій має місце насичення намагнічення осердя, суттєво залежить від наявності повітряного проміжку в осерді. Тому на практиці поверхню тороїдального осердя роблять гладкою.

Задача 5.3. Компас розташований над провідником, по якому протікає постійний струм, на відстані $R = 100$ см від осі проводу. Знайти силу струму, при якій стрілка компаса підніметься над своїм шпеньком. Залишкова індукція стрілки дорівнює індукції насичення сталі $B_0 = 1,35$ Тл. Густина сталі $\rho = 7800$ кг/м³

Розв'язок. На магнітну стрілку в неоднорідному магнітному полі буде діяти сила $F = p_m \frac{\partial B}{\partial x} \cos \alpha$, де p_m – магнітний момент стрілки, $\frac{\partial B}{\partial x}$ – градієнт поля, α – кут між векторами \vec{p}_m і \vec{B} . Для нашого випадку (рис. 5.4) $\alpha = \pi$ і сила \vec{F} направлена в сторону зменшення поля. Для довгого прямого провідника зі струмом:

$$B(x) = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} \quad \text{і} \quad \frac{\partial B}{\partial x} = -\frac{\mu_0 I}{2\pi x^2},$$

де x – відстань від осі провідника до вибраної точки простору. В нашому випадку $x = R$. Зовнішнє магнітне поле відсутнє, тобто $H = 0$, і за формулою (5.2) намагніченість стрілки компаса $J = B_0/\mu_0$. За визначенням (5.1)

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{p}_{mi}}{\Delta V} = \frac{\vec{p}_{mi}\Delta V}{\Delta V} = \vec{p}_{mi},$$

де p_{mi} – магнітний момент одиниці об'єму стрілки. Якщо вважати що стрілка намагнічена однорідно, то

$$p_m = V_c p_{mi} = V_c J = \frac{B_0 V_c}{\mu_0},$$

де $V_c = m/\rho$ – об'єм стрілки, m – маса стрілки. Стрілка підніметься над своїм шпеньком, якщо магнітна сила $F \geq mg$, тобто

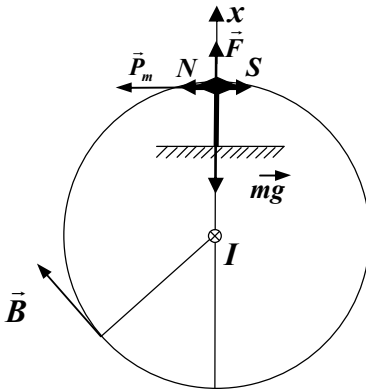


Рис. 5.4

$$\frac{B_0 m}{\mu_0 \rho} \cdot \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2} \geq mg.$$

Звідки знаходимо, що

$$I \geq \frac{2\pi R^2 g \rho}{B_0} = \frac{2\pi \cdot 10^{-2} \cdot 10 \cdot 7800}{1,35} = 3630 \text{ А}.$$

Висновки. Сила струму 3630 А є дуже велика і тому в реальних умовах здійснити експеримент, який описаний в задачі, неможливо. Проте будемо знати, що струми, які нас оточують в повсякденному житті не зможуть підняти стрілку над шпеньком, хоч на покази компаса впливають.

Задача 5.4. На стержень з немагнітного матеріалу, довжина якого 50 см, намотаний в один шар провід так, що на кожен сантиметр довжини стержня припадає 20 витків. Визначити енергію магнітного поля всередині соленоїда, якщо сила струму в обмотці дорівнює 0,5 А. Площа перерізу стержня дорівнює 2 см^2 .

Розв'язок. Намотаний на стержень провід представляє собою соленоїд із немагнітним осердям. Тому енергію магнітного поля можна визначити за формулою (5.8). Індуктивність такого соленоїда $L = \mu_0 n^2 V$, де μ_0 – магнітна стала вакууму, $n = 20/0,01 = 2000$ витків/м – густина намотки (кількість витків на одиницю довжини соленоїда), $V = 2 \cdot 50 = 100 \text{ см}^3 = 10^{-4} \text{ м}^3$ – об'єм соленоїда.

Тоді енергія магнітного поля соленоїда:

$$W = \frac{1}{2} \mu_0 n^2 V I^2 = 62,8 \text{ мкДж}.$$

Задача 5.5. Обмоткою соленоїда із залізним осердям протікає струм, сила якого 2 А. Визначити об'ємну густину енергії магнітного поля в осердді, якщо число витків на кожен сантиметр довжини соленоїда дорівнює 7,25.

Розв'язок. Об'ємна густина енергії магнітного поля визначається за формулою (5.9), а саме

$$\omega = \frac{BH}{2},$$

де напруженість поля $H = nI$, n – густина намотки, I – сила струму в обмотці. Підставивши значення n та I , знайдемо, що:

$$H = 1450 \text{ А/м}.$$

Магнітну індукцію B визначаємо за графіком (рис. 5.1). Звідки знаходимо, що $B = 1,55 \text{ Тл}$. Тоді

$$\omega = \frac{1,55 \cdot 1450}{2} = 1124 \text{ Дж/м}^3.$$

Задача 5.6. Із чистого заліза виготовлене осердя для тонкої тороїдальної котушки, яка має довжину по периметру $l = 30$ см. В осерді зроблений поперечний переріз, ширина якого $d = 3$ мм. Знайти відношення магнітної енергії, яка запасасться в зазорі, до магнітної енергії котушки з осердям в режимі магнітного насичення заліза.

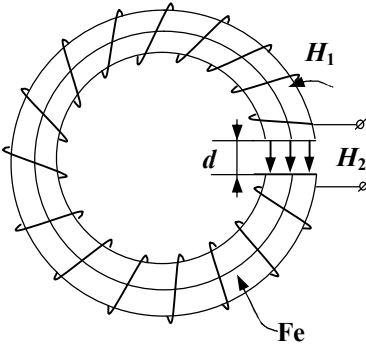


Рис. 5.5

Розв'язок. Енергія, яка запасасться в осерді дорівнює:

$$W_1 = \omega_1 SL, \text{ де } \omega_1 = \frac{B_1 H_1}{2}$$

– об'ємна густина магнітної енергії осердя, S – площа поперечного перерізу осердя, B_1 і H_1 – індукція і напруженість магнітного поля в осерді в режимі насичення. Аналогічно енергія, яка запасасться в зазорі, дорівнює

$$W_2 = \omega_2 Sd, \text{ де } \omega_2 = \frac{B_2 H_2}{2} \text{ – густина енергії магнітного поля в}$$

зазорі. Згідно (5.4) $B_2 = B_1$. Тоді $H_2 = B_1 / \mu_0$ і $\omega_2 = B_1^2 / 2\mu_0$.

Тепер знаходимо, що

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{\omega_2 d}{\omega_1 l} = \frac{B_1 d}{\mu_0 H_1 l}.$$

Згідно рисунка 5.1. для чистого заліза лінійна ділянка залежності $B(H)$ починається при $H_1 = 1400$ А/м, а $B_1 = 1,55$ Тл. Тоді

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{1,55 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1400 \cdot 0,3} = 8,8.$$

Висновки. Об'єм осердя в $\frac{l}{d} = \frac{30}{0,3} = 100$ раз більший, ніж

об'єм зазору. Проте, енергія магнітного поля, яка запасється в зазорі, в 8,8 раз більша магнітної енергії, яка запасється в осерді. Це пояснюється тим, що напруженість магнітного поля в зазорі H_2 в $B_1/(\mu_0 H_1) = \mu = 881$ раз більша напруженості магнітного поля H_1 в осерді.

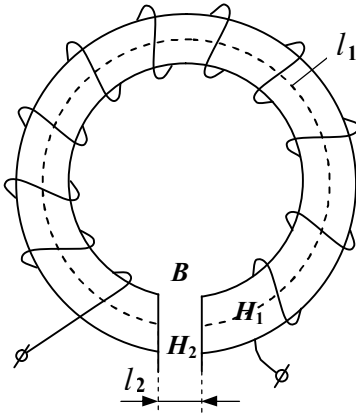


Рис. 5.6

Задача 5.7. Тороїд із залізним немагнічним осердям, має по середній лінії довжину $l_1 = 1$ м і повітряний проріз шириною $l_2 = 3$ мм. Обмоткою тороїда пропустили постійний струм, в результаті чого осердя намагнітилось. Після виключення струму в обмотці індукція магнітного поля в зазорі стала

$B = 4,2$ мТл. Визначити

залишкову намагніченість осердя, напруженість магнітного поля в залізі, густину енергії магнітного поля в осерді і в зазорі.

Розв'язок. За теоремою про циркуляцію вектора напруженості магнітного поля (5.5) можемо записати для випадку $I = 0$:

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 = 0,$$

де H_1 – напруженість в осерді, H_2 – напруженість в зазорі. В зазорі $H_2 = B/\mu_0$, тому

$$H_1 = -H_2 \frac{l_2}{l_1} = -\frac{B l_2}{\mu_0 l_1} = -10 \text{ А/м.}$$

Знак « \leftarrow » показує, що вектори \vec{H}_1 і \vec{B} в зазорі намагніченого заліза при відсутності струму в обмотці мають протилежні напрямки.

Із співвідношення (5.2) визначимо залишкову намагніченість заліза:

$$\vec{J} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H}_1,$$

але, врахувавши протилежну направленість \vec{B} і \vec{H}_1 , запишемо в скалярній формі:

$$J = \frac{B}{\mu_0} + H_1 = \frac{4,2 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7}} + 10 = 3352 \text{ А/м.}$$

Густина енергії в осерді буде

$$\omega_1 = \frac{B|H_1|}{2} = \frac{4,2 \cdot 10^{-3} \cdot 10}{2} = 21 \text{ мДж/м}^3,$$

а в зазорі –

$$\omega_2 = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{(4,2 \cdot 10^{-3})^2}{2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 7019 \text{ мДж/м}^3.$$

Задача 5.8. Залізне кільце має квадратний переріз, площа якого $S = 500 \text{ мм}^2$, і середній діаметр якого $d = 30 \text{ см}$. На кільце намотана обмотка із $N = 800$ витків. Обмоткою протікає струм $I = 3 \text{ А}$. В кільці є поперечний проріз, ширина якого $\epsilon = 2 \text{ мм}$. Нехтуючи розсіюванням магнітного поля на краях прорізі, знайти:

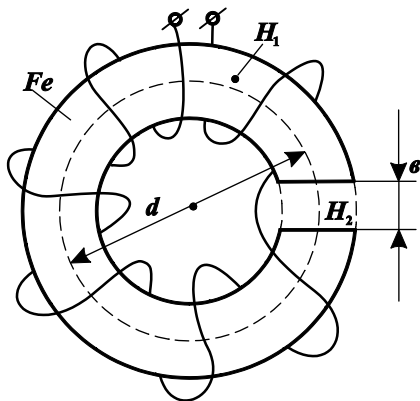


Рис. 5.7

- а) магнітну проникність μ заліза при цих умовах,
- б) потік магнітної індукції Φ через поперечний переріз кільця,
- в) індуктивність кільця,
- г) енергію W_1 , яка зосереджена в залізі, енергію W_2 в повітряному зазорі і повну енергію поля W .

Розв'язок. За законом повного струму (5.5) запишемо, що:

$$H_1(\pi d - b) + H_2 b = NI, \quad (1)$$

де H_1 – напруженість магнітного поля в залізі, H_2 – в зазорі. Згідно умові задачі і (5.4) $H_{1\tau} = H_{2\tau} = 0$, а $B_{1n} = B_{2n}$ то можемо записати, що для зазору згідно (5.3) $H_2 = B/\mu_0$, де B індукція магнітного поля в зазорі і залізі. Тому (1) із урахуванням конкретних значень фізичних величин запишеться так:

$$0,94H_1 + 1591,5 \text{ В} = 2400. \quad (2)$$

Рівність (2) виконується для конкретних значень H_1 і B , які задовільняють залежності $B(H)$, приведені на рис. 5.1. Підбором чисел знаходимо, що рівність (2) і залежність на рис. 5.1 виконується при:

$$H_1 = 340 \text{ А/м}, \quad B = 1,31 \text{ Тл}.$$

Визначивши напруженість і індукцію магнітного поля в залізі знаходимо:

- а) магнітна проникність

$$\mu = B/(\mu_0 H_1) = 3066;$$

- б) потік магнітної індукції через переріз кільця

$$\Phi = BS = 1,31 \cdot 500 \cdot 10^{-6} \text{ Вб} = 655 \text{ мкВб};$$

- в) індуктивність котушки визначимо із співвідношення, що повний магнітний потік через витки котушки $N\Phi = LI$, де L – індуктивність. Тоді

$$L = N\Phi/I = \frac{800 \cdot 655 \cdot 10^{-6}}{3} = 0,175 \text{ Гн};$$

г) енергію в залізі визначимо, як

$$W_1 = \omega_1 V_1,$$

де $\omega_1 = B H_1 / 2$ – густина енергії поля в залізі, $V_1 = \pi dS$ – об'єм заліза. Тоді

$$W_1 = \pi B H_1 dS / 2 = \pi \frac{1,31 \cdot 340 \cdot 0,3 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{2} \text{ Дж} = 0,105 \text{ Дж}.$$

Енергію в зазорі знайдемо так:

$$W_2 = \omega_2 V_2,$$

де $\omega_2 = B^2 / 2 \mu_0$ – густина енергії поля в зазорі, $V_2 = bS$ – об'єм зазору. Тоді

$$W_2 = B^2 bS / (2 \mu_0) = 1,31^2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-4} / (2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}) \text{ Дж} = 0,683 \text{ Дж}.$$

Повну енергію поля знайдемо як

$$W = W_1 + W_2 = 0,788 \text{ Дж},$$

або за формулою (5.8)

$$W = LI^2 / 2 = 1,575 / 2 = 0,788 \text{ Дж}.$$

5.6. Задачі

5.9. Як зміняться характеристики магнітного поля нескінченно довгого соленоїда при заповненні його об'єму однорідним ізотропним магнетиком з проникністю μ ?

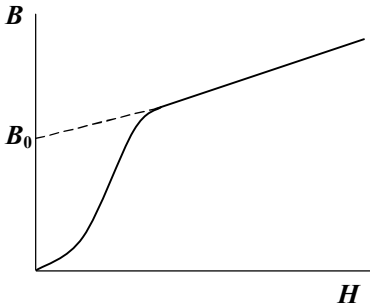


Рис. 5.8

5.10. Крива намагнічування заліза асимптотично наближається до прямої рис. 5.8.

Що означає величина B_0 ?

Визначити величину B_0 із реальної кривої намагнічування заліза, приведеної на рис. 5.1.

Яка намагніченість заліза при насиченні?

5.11. Як визначити за допомогою рис. 5.1 значення B і H які відповідають максимальному значенню відносної проникності μ ?

Визначити це значення μ .

5.12. На рис. 5.1 зображена експеримально отримана основна крива намагнічення технічно чистого заліза. Користуючись цим графіком, побудувати залежність магнітної проникності μ від напруженості магнітного поля H .

5.13. На постійний магніт, що має форму циліндра, довжина якого $\ell = 15$ см, намотали $N = 300$ витків тонкого проводу. При пропусканні по ньому струму $I = 3$ А поле поза магнітом щезло. Знайти коерцитивну силу H_c матеріалу, із якого виготовлений магніт.

5.14. Залізне осердя знаходиться в однорідному магнітному полі, напруженість якого 250 А/м. Визначити індукцію магнітного поля в осерді та магнітну проникність заліза.

5.15. Замкнутий соленоїд (тороїд) із залізним осердям має 10 витків на кожен сантиметр довжини. У витках протікає струм, сила якого $1,5$ А. Визначити значення магнітного потоку в осерді, якщо його поперечний переріз дорівнює 4 см².

5.16. Соленоїд намотаний на залізне кільце з перерізом $S = 5 \text{ см}^2$. При силі струму у витках $I = 1 \text{ А}$, магнітний потік через переріз кільця $\Phi = 0,5 \text{ мВб}$. Визначити кількість витків соленоїда, які приходяться на відрізок довжиною 1 см середньої лінії кільця.

5.17. Довжина осердя тороїда дорівнює 1 м , ширина поперечного повітряного розрізу в осерді – 4 мм . Площа поперечного перерізу осердя дорівнює 25 см^2 . Знайти, якою повинна бути кількість Ампер – витків обмотки тороїда, щоб магнітний потік через переріз осердя дорівнював $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$. При цих умовах магнітна проникність матеріалу осердя дорівнює 800 .

5.18. Визначити магнітну індукцію в залізному осерді тороїда завдовжки 30 см , якщо число Ампер – витків обмотки тороїда дорівнює 150 . Знайти магнітну проникність матеріалу осердя при цих умовах.

5.19. Замкнуте залізне осердя завдовжки 50 см має обмотку в 500 витків. По обмотці тече струм, сила якого 1 А . Який струм необхідно пропустити через обмотку, щоб при відсутності осердя індукція стала такою як була?

5.20. Скільки Ампер – витків необхідно для отримання індукції $B=1,4 \text{ Тл}$ в електромагніті із залізним осердям довжиною $\ell = 90 \text{ см}$ і повітряним поперечним прорізком $\ell_0 = 5 \text{ мм}$. Розсіюванням магнітного потоку в повітряному прорізі знехтувати.

5.21. Два однакових залізних кільця, середній діаметр яких $d = 10 \text{ см}$, мають обмотки по $N = 100$ витків кожна. В одному кільці є поперечний проріз, шириною $d_1 = 1 \text{ мм}$. Обмоткою суцільного кільця протікає струм $I_1 = 2 \text{ А}$. Який струм I_2 необхідно пропустити обмоткою другого кільця, щоб в ньому створити таку ж індукцію?

5.22. Залізне осердя тороїда, довжина якого по середній лінії дорівнює 1 м , має вакуумну поперечну проріз, ширина якої 4 мм . Обмотка має 8 витків на 1 см . При якій силі струму в обмотці індукція в прорізі буде дорівнювати 1 Тл ?

5.23. Обмотка тороїда, який має залізне осердя з вузьким поперечним вакуумним проміжком, має 1000 витків. По обмотці тече струм, сила якого 1 А . При якій довжині вакуумного проміжку

індукція магнітного поля в ньому буде дорівнювати 1,25 Тл? Довжина середньої лінії дорівнює 1 м.

5.24. Довжина залізного тороїда по середній лінії дорівнює 1,2 м, площа перерізу 20 см^2 . Обмоткою тороїда тече струм, який створює у вузькому поперечному вакуумному проміжку магнітний потік 2 мВб. Ширина проміжку дорівнює 3 мм. Якою повинна бути ширина проміжку, щоб магнітний потік в ньому при тій же силі струму збільшився на 0,5 мВб?

5.25. Котушка із залізним осердям має площу поперечного перерізу 20 см^2 та число витків, що дорівнює 500. Індуктивність котушки з осердям дорівнює 0,28 Гн при силі струму в обмотці 5 А. Знайти магнітну проникність осердя при цих умовах.

5.26. На залізне осердя, що має форму тороїда з квадратним перерізом (сторона квадрата $a = 4 \text{ см}$) і діаметром $D = 40 \text{ см}$ намотано рівномірно в один шар провід. Число витків $N = 500$. Проводом пропускають струм $I = 1 \text{ А}$. Визначити потік вектора індукції магнітного поля через переріз осердя.

5.27. Якщо тороїд попередньої задачі розрізати в одному місці так, щоб утворився повітряний поперечний зазор товщиною $d = 1 \text{ мм}$, то яким стане потік вектора індукції магнітного поля через переріз осердя, якщо знехтувати розсіюванням силових ліній?

5.28. Залізне осердя має розміри, які вказані в попередніх двох задачах. Якщо повітряний зазор дорівнює $d_1 = 1 \text{ мм}$, то при деякій силі струму в обмотці потік індукції осердя $\Phi_1 = 30 \text{ мкВб}$. Коли повітряний зазор збільшити до $d_2 = 2 \text{ мм}$, то при тій же силі струму значення потоку індукції стане $\Phi_2 = 25 \text{ мкВб}$. Нехтуючи в обох випадках розсіюванням силових ліній індукції, визначити магнітну проникність μ заліза.

5.29. В осерді тонкої тороїдальної котушки, середня довжина якої $\ell=100$ см, є поперечний повітряний зазор шириною $b=1$ мм. При виключеному струмі в обмотці котушки індукція магнітного поля в зазорі $B = 0,04$ Тл. Визначити напруженість, індукцію і намагніченість осердя.

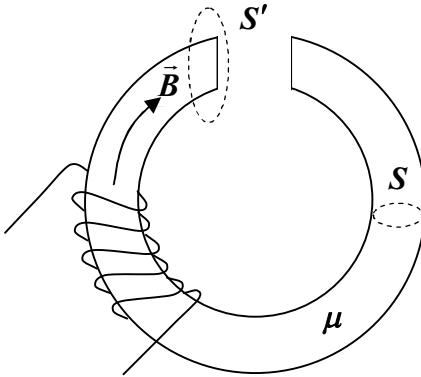


Рис. 5.9

5.30. Залізне осердя, яке зображене на рис. 5.9, має обмотку, якою протікає постійний струм. В результаті в осерді виникає поле з індукцією $B = 1,25$ Тл. Площа поперечного перерізу осердя $S = 100$ мм². Один із кінців осердя входить в середину уявної, замкнутої поверхні S' . Знайти для поверхні S' потік Φ_B вектора B і потік Φ_H вектора H .

5.31. На залізному осерді у вигляді тороїда із середнім діаметром $d = 0,5$ м є обмотка із $N = 1000$ витків. В осерді зроблений поперечний проріз, ширина якого $b = 1$ мм. При струмі $I = 0,85$ А в обмотці котушки індукція магнітного поля в зазорі $B = 0,75$ Тл. Нехтуючи розсіюванням магнітного потоку на краях прорізу, знайти магнітну проникність заліза при цих умовах.

5.32. Тонке залізне кільце із середнім діаметром $d = 50$ см несе на собі обмотку із $N = 800$ витків зі струмом $I = 3$ А. В кільці є поперечна прорізь ширина якої $b = 2$ мм. Нехтуючи розсіюванням магнітного потоку на краях зазору, знайти за допомогою графіка на рис.5.1 магнітну проникність заліза при цих умовах.

5.33 Є соленоїд із залізним осердям завдовжки 50 см, площею поперечного перерізу 10 см² та загальною кількістю витків 1000. Знайти індуктивність цього соленоїда, якщо обмоткою соленоїда тече струм: 1) $I_1 = 0,1$ А; 2) $I_2 = 0,5$ А.

5.34. Визначити об'ємну густину енергію магнітного поля у залізному осерді, якщо індукцію магнітного поля в ньому 1 Тл.

5.35. Індукція магнітного поля тороїда із залізним осердям зросла від $B_1 = 1$ Тл до $B_2 = 1,5$ Тл. Визначити як змінилась при цьому об'ємна густина енергію магнітного поля.

5.36. На залізне кільце намотано в один шар 2000 витків. Чому дорівнює енергія магнітного поля тороїда, якщо при силі струму 2,5 А у витках магнітний потік через переріз кільця дорівнює $6 \cdot 10^{-4}$ Вб.

5.37 Залізне осердя, яке має форму тороїда з квадратним перерізом, несе на собі обмотку з 500 витків. Внутрішній радіус тороїда 0,2 м, зовнішній – 0,25 м. Визначити енергію, яка зосереджена в осерді, якщо по обмотці протікає струм 1,84 А.

5.38 На залізний тороїд намотано 500 витків. Знайти енергію магнітного поля, якщо при струмі 2 А магнітний потік через площу витка дорівнює 1 мВб.

5.39. Тонке кільце з магнетика має середній діаметр $d = 30$ см. У кільці зроблений поперечний проріз завширшки 2 мм. Коли по обмотці протікає струм, магнітна проникність магнетика $\mu = 1400$. Нехтуючи розсіюванням магнітного поля на краях прорізу, знайти відношення магнітної енергії прорізу до магнітної енергії магнетика.

5.40 Обмоткою тороїдальної котушки з немагнічним залізним осердям пропустили струм, сила якого 0,3 А. Витки дроту з діаметром 0,4 мм з дуже тонкою ізоляцією щільно прилягають один до одного. Визначити індуктивність тороїдальної котушки при даних умовах, а також енергію магнітного поля в осерді, якщо площа його перерізу 4 см^2 , а діаметр середньої лінії осердя 30 см.

5.41. Є постійний магніт у вигляді кільця з прорізом завширшки 4мм. Середній діаметр кільця дорівнює 20 см, його переріз має форму кола, діаметр якого малий в порівнянні з діаметром кільця. Індукція магнітного поля в прорізі дорівнює 10^{-2} Тл. При таких розмірах кільця поле в прорізі можна вважати однорідним.

Визначити: 1) модуль напруженості магнітного поля в кільці. 2) густину енергії магнітного поля в кільці.

5.42. Густина енергії магнітного поля в вакуумі безпосередньо біля поверхні магнетика з магнітною проникністю $\mu = 4 \epsilon \omega_1$. Яка густина енергії в магнетик, якщо вектор магнітної індукції \vec{B} в вакуумі: а) перпендикулярний поверхні магнетика; б) практично паралельний поверхні магнетика?

5.43. В скільки раз густини енергії магнітного поля біля кінця довгого соленоїда менша густини енергії в центрі соленоїда?

5.44. Число витків котушки зменшили у два рази, але зберегли її геометричні розміри і струм в котушці. Як при цьому змінюється: а) енергія магнітного поля котушки; б) середня густина енергії магнітного поля всередині котушки?

5.45. Котушка, індуктивність якої $L = 2$ мкГн і опір $R_0 = 1$ Ом, ввімкнена до джерела постійного струму з е.р.с. $\mathcal{E} = 3$ В. Паралельно до котушки ввімкнений опір $R = 2$ Ом. Після того як струм в котушці досягає сталого значення, джерело струму відключається. Знайти кількість тепла Q , яке виділиться на опорі R після розімкнення кола. Опором джерела струму і з'єднувальних проводів знехтувати.

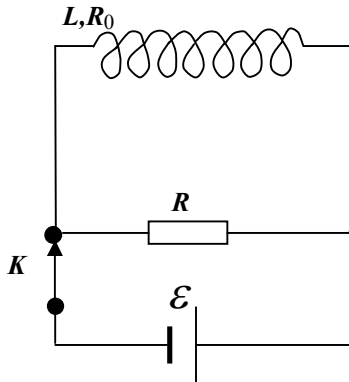


Рис. 5.10

5.7. Відповіді

- 5.9. B збільшиться в μ раз. H не зміниться.
- 5.10. $B_0 = 1,45$ Тл; $I_0 = 1,15 \cdot 10^6$ А/м.
- 5.11. $\mu = 9950$ відн.од.
- 5.13. $H_c = NI / \ell = 6000$ А/м.
- 5.14. 1,25 Тл, 3979 від. од.
- 5.15. 0,64 мВб.
- 5.16. 1 виток/см.
- 5.17. 2340 Ампер·витків.
- 5.18. 1,4 Тл; 2230 відн. од.
- 5.19. 1194 А.
- 5.20. $NI = 6000$ А·витків.
- 5.21. $I_2 = 13,5$ А.
- 5.22. 4,25 А.
- 5.23. 0,75 мм.
- 5.24. 2,22 мм.
- 5.25. 2345 відн. од.
- 5.26. 2,18 мВб.
- 5.27. 0,87 мВб.

- 5.28. $\mu = \pi D(\Phi_1 - \Phi_2)/(d_2 \Phi_2 - d_1 \Phi_1) + 1 = 314.$
- 5.29. $B_{\text{осер.}} = -B = -0,04 \text{ Тл}, H_{\text{осер.}} = 31,8 \text{ А/м},$
 $J = -3,19 \cdot 10^4 \text{ А/м.}$
- 5.30. $\Phi_B = 0, \Phi_H = (B/\mu_0 - H)S = 99,45 \text{ А/м},$
де $H = 250 \text{ А/м.}$
- 5.31. $\mu = \pi dB/(\mu_0 NI - bB) = 3700.$
- 5.32. $\mu = 3840.$
- 5.33. $12 \text{ Гн}; 3 \text{ Гн.}$
- 5.34. $50 \text{ Дж/м}^2.$
- 5.35. Збільшилась у 15 раз.
- 5.36. $1,5 \text{ Дж.}$
- 5.37. $1,66 \text{ Дж.}$
- 5.38. $0,5 \text{ Дж.}$
- 5.39. 3.
- 5.40. $4,63 \text{ Гн}; 0,21 \text{ Дж.}$
- 5.41. $51 \text{ А/м}, 255 \text{ мДж/м}^3.$
- 5.42. а) $\omega_2 = \omega_1/4;$ б) $\omega_2 = 4\omega_1.$
- 5.43. В 4 рази.
- 5.44. а) і б) зменшиться в 4 рази.
- 5.45. $Q = \frac{RL\mathcal{E}^2}{2R_0^2(R + R_0)} = 6 \text{ мкДж.}$