

РОЗДІЛ 7 МАГНІТНІ КОЛА: ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ, ВИЗНАЧЕННЯ, ЗАКОНИ

7.1. Основні поняття і закони магнітних кіл

Основними величинами, що характеризують магнітне поле, є:

– магнітна індукція \vec{B} ($T_l = (B \cdot c)/m^2 = Bб/m^2$) – векторна величина, яка визначається за силовою дією магнітного поля на струм;

– намагніченість магнітного поля \vec{J} – магнітний момент одиниці об'єму речовини (А/м);

– напруженість магнітного поля H (А/м).

Зв'язок між \vec{B} , \vec{H} , \vec{J} :

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \vec{J}) = \mu_0 \cdot \mu \cdot \vec{H} = \mu_a \cdot \vec{H}, \quad (7.1)$$

де μ_0 – стала, що характеризує магнітні властивості вакууму (Гн/м),

μ – відносна магнітна проникність,

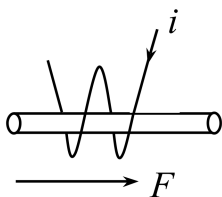
$\mu_a = \mu_0 \cdot \mu$ – абсолютна магнітна проникність (Гн/м).

– магнітний потік Φ ($Bб = B \cdot c$), який є потоком вектора магнітної індукції крізь поверхню: $\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S}$, (7.2)

де dS – елемент поверхні S .

Магнітне коло – сукупність магніторушійних сил (*МРС*), феромагнітних тіл або будь-яких інших тіл або середовищ, за якими замикається магнітний потік.

Магніторушійна сила (далі – *МРС*) викликає магнітний потік у магнітному колі подібно до того, як *ЕРС* викликає струм в електричному колі:



$$F = I \cdot w, \quad (7.3)$$

де w – кількість витків котушки;

I – струм, що протікає по котушці.

Рисунок 7.1 – Визначення напрямку F

МРС є величиною спрямованою. Додатний напрямок *МРС* визначається за таким мнемонічним

правилом – якщо осердя охопити правою рукою, розташувавши пальці за струмом в обмотці, то відігнутий великий палець вкаже на напрямок *МРС* F (рис. 7.1).

Якщо значення вектора магнітної індукції \vec{B} є однаковим для всіх точок поперечного перетину S ділянки магнітного кола з номером k , а сам вектор \vec{B} перпендикулярний до цього перетину, то $\Phi_k = B_k \cdot S_k$.

Закон повного струму – циркуляція вектора напруженості H магнітного поля за замкнутим контуром дорівнює алгебраїчній сумі струмів ($\sum I$), охоп-

$$\oint H dl = \sum I, \quad (7.4)$$

Якщо контур інтегрування охоплює w витків котушки із струмом I , то

$$I \cdot w = F = \oint H dl. \quad (7.5)$$

Контур інтегрування зазвичай на практиці вибирають так, щоб він співпадав з лінією вектора \vec{H} , тоді інтеграл заміняють сумою добутків $H_k \cdot l_k$, (індекс k – номер ділянки, уздовж якої величини H і μ приймаються незмінними). У цьому випадку одержуємо *другий закон Кірхгофа* для магнітного кола: у будь-якому замкнутому магнітному колі алгебраїчна сума *MPC* дорівнює алгебраїчній сумі магнітних падінь на окремих ділянках:

$$F = \sum_{k=1}^n H_k l_k = U_{M1} + U_{M2} + \dots = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots \quad (7.6)$$

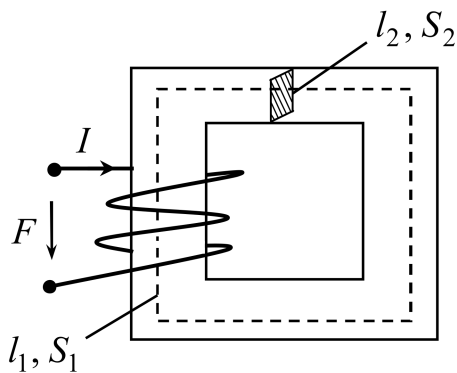


Рисунок 7.2 –
Нерозгалужене
магнітне коло

Розглянемо закон повного струму для нерозгалуженого кола (рис. 7.2):

$$\sum F = (H_1 l_1 + H_2 l_2) \cdot 2 = I \cdot w. \quad (7.7)$$

Напруженість та індукція на першій ділянці:

$$H_1 = \frac{B_1}{\mu_a}. \quad (7.8)$$

Напруженість і індукція на другій ділянці:

$$H_2 = \frac{B_2}{\mu_a}. \quad (7.9)$$

$$\text{Отже, } F = \Phi \cdot \underbrace{\frac{l_1}{S_1 \cdot \mu_a}}_{R_{M1}} + \Phi \cdot \underbrace{\frac{l_2}{S_2 \cdot \mu_a}}_{R_{M2}}, \quad (7.10)$$

де R_{M1} і R_{M2} – магнітні опори першої та другої ділянок.

$$\text{Отже, } F = \Phi \cdot R_{M1} + \Phi \cdot R_{M2} = U_{M1} + U_{M2}. \quad (7.11)$$

Визначимо з формули (7.11) магнітний потік і отримаємо *закон Ома* для магнітного кола (зв'язок між магнітною напругою та магнітним потоком):

$$\Phi = \frac{F}{R_{M1} + R_{M2}}. \quad (7.12)$$

Перший закон Кірхгофа для магнітного кола: в будь-якому магнітному

$$\text{вузлі алгебраїчна сума магнітних потоків дорівнює нулю: } \sum_{k=1}^n \Phi_k = 0. \quad (7.13)$$

7.2 Розрахунок нерозгалуженого магнітного кола постійного струму

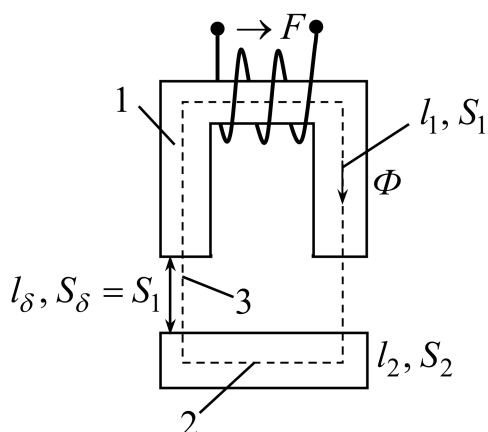


Рисунок 7.3 –
Нерозгалужене
магнітне коло

Для розрахунку мають бути відомими конфігурація і геометричні розміри магнітного кола (рис. 7.3), крива намагнічування феромагнітного матеріалу, а також магнітний потік Φ (або індукція B). На всіх ділянках – той самий магнітний потік Φ .

Розглянемо дві задачі.

1. *Пряма задача* – заданий магнітний потік Φ . Необхідно визначити МРС F .

Розбиваємо магнітне коло на ділянки з постійним перетином і визначаємо довжини за середньою силовою лінією (l_k) і площі

поперечного перетину (S) цих ділянок. Далі знаходимо:

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1}; \quad B_2 = \frac{\Phi}{S_2}; \quad B_\delta = \frac{\Phi}{S_\delta} = \frac{\Phi}{S_1} = B_1. \quad (7.14)$$

За кривими намагнічування знаходимо значення напруженості для ділянок магнітного кола ($B_1 \rightarrow H_1; B_2 \rightarrow H_2$).

Напруженість магнітного поля повітряного зазору:

$$H_\delta = \frac{B_1}{\mu_0} \quad (\mu = 1). \quad (7.15)$$

$$\text{Тоді за другим законом Кірхгофа: } F = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + 2 \cdot H_\delta \cdot l_\delta. \quad (7.16)$$

2. *Зворотна задача* – задані геометричні розміри магнітного кола, криві намагнічування і МРС $F = I \cdot w$. Необхідно визначити магнітний потік та індукцію.

Розглянемо два способи розв'язання.

2.1. Довільно задаємося значенням магнітної індукції в повітряному зазорі B_δ , рівними 0,5; 1,1; 1,2; 1,3 Тл. Для кожного з цих значень підраховуємо значення $\sum H_K \cdot l_K$ (як для прямої задачі):

$$B_\delta = B_1 = \frac{\Phi}{S_1} \Rightarrow \Phi = B_1 \cdot S_1 \Rightarrow B_2 = \frac{\Phi}{S_2}. \quad (7.17)$$

Далі за кривими намагнічування і значенням B_1 і B_2 визначаємо H_1 і H_2 .

Отже, враховуючи, що $H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}$, за другим законом Кірхгофа значення МРС для

кожної довільно заданої B_δ : $F = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + 2 \cdot H_\delta \cdot l_\delta$.

Будуємо залежність $\Phi = f(F = \sum H_K l_K)$ та за заданим значенням F знаходимо потік Φ (рис. 7.4). Розрахунок зручно вести за допомогою таблиці.

Таблиця 7.1 – Для розрахунку зворотної задачі

$B_\delta, \text{Тл}$	Значення магнітної індукції				
	0,5	1,1	1,2	1,3	1,4
$B_1 = B_\delta, \text{Тл}$					
$\Phi = B_1 S_1, \text{Вб}$					
$B_2 = \frac{\Phi}{S_2}, \text{Тл}$					
$H_1, \frac{\text{А}}{\text{м}}$					
$H_2, \frac{\text{А}}{\text{м}}$					
$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0}, \frac{\text{А}}{\text{м}}$					
$\sum H_K \cdot l_K, \text{А}$					

2.2. Для того самого магнітного кола (рис. 7.3) складаємо схему заміщення (рисунок 7.5).

За характеристиками $B(H)$, наведеними у довідниках, будемо нелінійні характеристики $\Phi(F)$ для кожної ділянки магнітного кола, тобто помножимо значення абсциси (H) і ординати (B) кривих намагнічування відповідно на довжину (l) і площу поперечного перетину (S) ділянки:
$$\begin{cases} B_1 \cdot S_1 = \Phi_1, & H_1 \cdot l_1 = F_1, \\ B_2 \cdot S_2 = \Phi_2, & H_2 \cdot l_2 = F_2. \end{cases}$$

Потім будемо лінійну характеристику $\Phi(F)$ для повітряного зазору, напруженість магнітного поля якого $H = \frac{B}{\mu_0} \approx 0,8 \cdot 10^{-6} \cdot B$; підсумовуємо за віссю магнітного потоку Φ усі три характеристики і за значенням F знаходимо потік Φ (рис. 7.6).

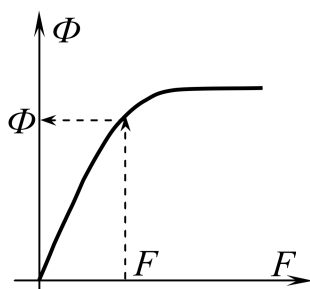


Рисунок 7.4 – Залежність $\Phi(F)$

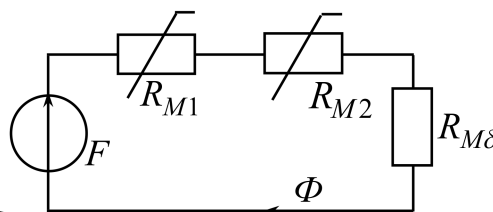


Рисунок 7.5 – Схема заміщення

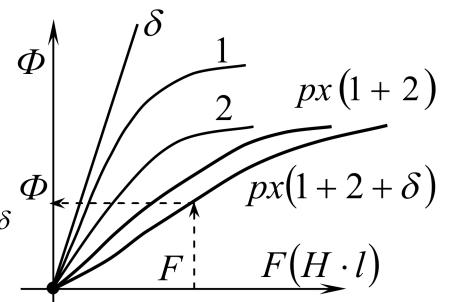


Рисунок 7.6 – Побудова $px(1+2+\delta)$ для схеми заміщення

7.3 Розрахунок розгалуженого магнітного кола постійного струму

У розгалуженому магнітному колі існує декілька магнітних потоків, які додаються і віднімаються на певних ділянках. Для розрахунку таких кіл застосовують усі методи, які розглядалися раніше. Розглянемо пряму і зворотну задачі для магнітного кола на рисунку 7.7.

1. *Пряма задача* – заданий магнітний потік на одній із ділянок кола, припустимо Φ_3 (ділянка з перетином S_3). Необхідно визначити F, Φ_1, Φ_2 . За допомогою формули

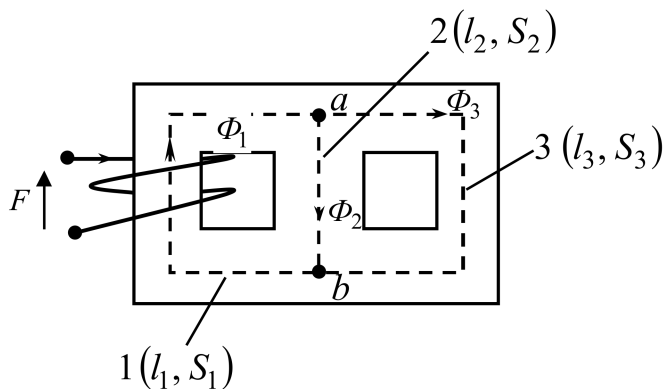


Рисунок 7.7 – Розгалужене магнітне коло

$B_3 = \frac{\Phi_3}{S_3}$ за кривою намагнічування

визначаємо значення напруженості на третій ділянці H_3 . Тоді магнітна напруга між точками «а» і «в»:

$U_{mab} = H_3 \cdot l_3 = H_2 \cdot l_2$. Далі визначаємо за кривою намагнічування напруженість на другій ділянці: $H_2 = \frac{U_{mab}}{l_2}$, а отже, і значення

індукції B_2 і магнітного потоку на цій ділянці: $\Phi_2 = B_2 \cdot S_2$.

Потік на першій ділянці за першим законом Кірхгофа – $\Phi_1 = \Phi_2 + \Phi_3$. Для визначення МРС F достатньо розглянути будь-який замкнутий контур, в який входить перша ділянка. Якщо $B_1 = \frac{\Phi_1}{S_1}$, то за кривою намагнічування визначаємо

мо H_1 , а після за другим законом Кірхгофа – значення МРС: $F = H_1 \cdot l_1 + U_{mab}$.

2. Розглянемо *зворотну задачу*, коли задано значення F і необхідно /визначити Φ . Розглянемо два способи розв'язання.

2.1. Довільно задаємося значеннями Φ_3 на ділянці кола і знаходимо відповідні значення F за методикою прямої задачі (7 – 8 значень). За отриманими даними будуюмо графік $\Phi(F)$ та за заданим значенням F знаходимо значення Φ .

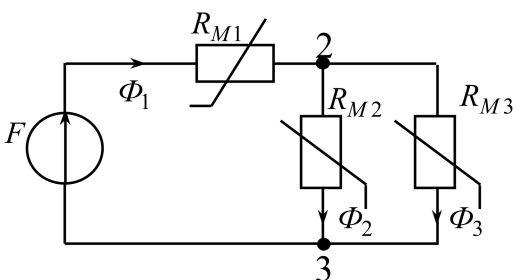


Рисунок 7.8 – Схема заміщення

2.2. Складаємо схему заміщення (рис. 7.8). Для цієї схеми будуюмо результуючу характеристику, а саме:

– спочатку переходимо від характеристик $B(H)$ для окремих ділянок магнітного кола до характеристик $\Phi(F)$;

– складаємо нелінійні характеристики ділянок «2» і «3» за віссю F і отримуємо результуючу характеристику для паралельних віток ($\Phi_{23}(F_{23})$);

– остаточно за віссю Φ додаємо характеристику $\Phi_1(F_1)$ до результуючої характеристики $\Phi_{23}(F_{ab})$ та отримуємо характеристику $\Phi(F)$. Отримана характеристика дає змогу за заданим значенням F знаходити значення потоку Φ .

Примітка. індекси потоків Φ та MPC F означають номери ділянок із відповідним магнітним опором.

Контрольні питання до розділу

1. Наведіть основні поняття магнітних кіл (B , F , H , Φ) та охарактеризуйте зв'язок між ними.
2. Наведіть основні закони магнітних кіл: закони повного струму, закони Ома та Кірхгофа.
3. Наведіть формальну аналогію між магнітними й електричними колами.
4. Поясніть порядок розрахунку нерозгалуженого магнітного кола при постійному струмі: пряма задача.
5. Поясніть порядок розрахунку нерозгалуженого магнітного кола при постійному струмі: зворотна задача.
6. Поясніть порядок розрахунку розгалуженого магнітного кола при постійному струмі: пряма задача.
7. Поясніть порядок розрахунку розгалуженого магнітного кола при постійному струмі: зворотна задача.