4. Магнітні кола

Магнітним колом називають сукупність джерел магніторушійної сили, феромагнітних та інших елементів, по яких замикається магнітний потік (лінії магнітного поля). Магнітні кола електромагнітних пристроїв складаються з двох основних компонентів: обмотки, струм якої створює магнітне поле *напруженістю* H (*А/м*) та феромагнітного осердя (немагнітних проміжків), вздовж яких замикається *магнітний потік Ф (Вб)*.

Магнітне поле пристроїв з постійною *магніторушійною силою* (м.р.с.) створюють за допомогою постійних магнітів або електромагнітів.

Напрям ліній магнітного поля, що мають вигляд концентричних кіл,

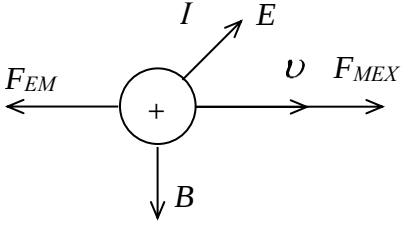


Рис. 6.1

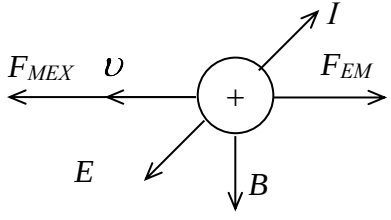


Рис. 6.2

визначають за правилом свердлика.

За *законом електромагнітної індукції* (індукційна дія поля) у провіднику зі струмом, що рухається у електромагнітному полі, індукується е.р.с. $E = Bl\upsilon$, де l - довжина провідника; v – його швидкість руху, B - *індукція магнітного поля* (T). Напрям цієї е.р.с. визначають за *правилом правої руки* (рис.6.1).

За *законом Ампера* (силова дія поля) сила, що діє на провідник зі струмом в магнітному полі змушує його рухатися $F = BlI$, де l - довжина провідника; v – його швидкість руху, I – струм провідника. Напрям цієї сили визначають за *правилом лівої руки* (рис.6.2). Індукована в провіднику е.р.с. E протидіє зміні струму I.

Магнітна індукція B характеризує інтенсивність магнітного поля в точці (диференціальна характеристика поля), а *магнітний потік* Φ – це потік вектора магнітної індукції через певну поверхню S (інтегральна характеристика поля). Якщо лінії магнітного поля (магнітний потік) перпендикулярні поверхні S, то

$$\Phi = BS.$$

Закон повного струму є основним законом магнітних кіл, він встановлює зв'язок між силою струму та магнітним полем, яке створюється цим струмом. Магнітне коло називають однорідним, якщо напруженість магнітного поля (залежить від середовища, в якому виникає магнітне поле, та площі поперечного перерізу магнітопроводу) однакова для всього магнітного кола (по всій довжині магнітопроводу), в іншому випадку коло буде неоднорідним. Крім того магнітні кола можуть бути нерозгалужені та розгалужені.

Прикладом однорідного нерозгалуженого магнітного кола може бути

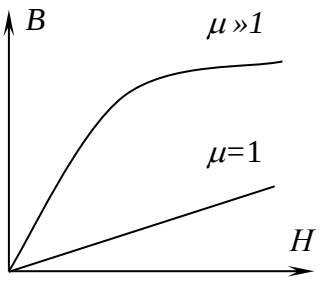


Рис. 6.3

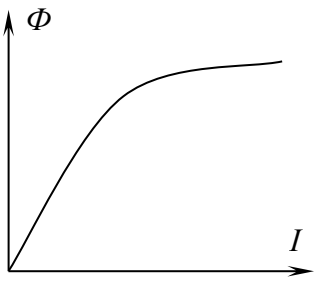


Рис. 6.4

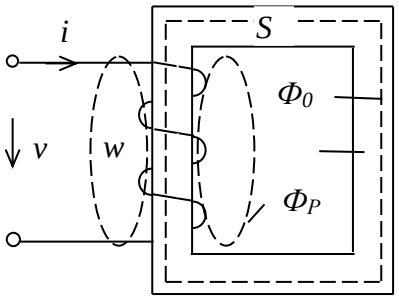


Рис. 6.5

індуктивна котушка з магнітопроводом зображена на рис.6.5, яка складається з феромагнітного осердя (з площею поперечного перерізу S) та обмотки з числом витків w. Прикладена до котушки напруга v зумовлює протікання струму i, який індукує магнітний потік в осерді (осердя в свою чергу завдяки своїм магнітним властивостям) це потік підсилює.

Закон повного струму для однорідного магнітного кола: $Hl = wI$, для неоднорідного (кола з немагнітним, повітряним проміжком): $Hl + H_\delta\delta = wI$, де H напруженість магнітного кола або його частини довжиною l; H_δ- напруженість магнітного поля повітряного проміжку довжиною δ; w - число витків обмотки, and $wI = F$ - магніторушійна сила.

Потокозчепленням називають зв'язок (зчеплення) магнітного потоку з замкнутим колом, через яке він замикається:

$$\Psi = LI = w\Phi.$$

Магнітна проникність μ характеризує властивості середовища, в якому поширюється магнітне поле (протікає магнітний потік) і показує наскільки це середовище здатне підсилювати магнітний потік. В залежності від значення магнітної проникності всі матеріали (речовини) поділяють на діамагнетики, парамагнетики та феромагнетики. Для діамагнетиків та парамагнетиків $\mu_r = 1$ (трохи менша 1 для діамагнетиків і трохи більша 1 для парамагнетиків), тому вони не є магнітними матеріалами. *Феромагнетики* мають велику магнітну проникність $\mu_r >> 1$, тобто здатні підсилювати магнітне поле, тому саме їх використовують у магнітних колах.

Залежність магнітної індукції від напруженості магнітного поля $B(H)$ для діа- та парамагнетиків лінійна (рис.6.3) а для феромагнетиків нелінійна (рис.6.3) і її називають основною кривою намагнічування:

$$B = \mu_0 \mu_r H,$$

де абсолютна магнітна проникність, μ_r, - відносна магнітна проникність середовища відносно вакууму, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ *Гн/м* - магнітна проникність вакууму.

Вираз закону Ома для магнітного кола на рис.6.5 отримуємо із закону повного струму $Hl = wI$:

$$wI = \Phi l/(\mu_0 \mu_r S),$$

де $R_м = l/(\mu_0 \mu_r S)$ - магнітний опір кола,

На рис.6.4 зображена залежність магнітного потоку ($\Phi \equiv B$) від струму ($I \equiv H$) $\Phi(I)$ - вебер амперна характеристика.

Магнітний потік Φ , що індукується струмом котушки (рис.6.5) є геометричною (векторною) сумою основного магнітного потоку Φ_o, що замикається вздовж осердя та магнітного потоку *розсіювання* Φ_P, що розсіюється в повітрі навколо обмотки (втрати магнітного потоку): $\underline{\Phi} = \underline{\Phi}_o + \underline{\Phi}_р$. Магнітна проникність феромагнетика значно більша ніж магнітна проникність повітря, *тому* $\Phi_o >> \Phi_р$, у багатьох випадках потоком розсіювання можна знехтувати. Якщо ж при розрахунках необхідно враховувати потік розсіювання, то таке магнітне коло буде неоднорідним.

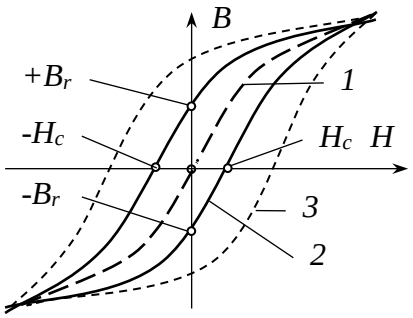


Рис. 6.6

На рис.6.6 зображені залежності $B(H)$ при циклічному перемагнічуванні феромагнітного осердя (в обмотці протікає змінний струм, магнітний потік також змінюється в часі). Крива 1 – це *основна крива намагнічування*, крива 2 - це *петля гістерезису*, по якій перемагнічується феромагнітне осердя протягом періоду змінного струму Рис.6.6). Крива 3 це також петля гістерезису отримана при іншому значенні намагнічуючого струму. Відставання зміни магнітної індукції від зміни напруженості магнітного поля називають гістерезисом: при $H = 0$ є *залишкова магнітна індукція* B_r, а при $B = 0$ затримуюча або *коерцитивна* сила $H = H_C$.

В будь-якому електромагнітному пристрої є втрати (необоротне

перетворення електромагнітної енергії в тепло). Втрати в обмотках називають *електричними*, вони залежать від опору та сили струму: $\Delta P_E = R\,I^2$.

Втрати в магнітопроводі (осерді) називають *магнітними* $\Delta P_{\text{М}}$ - це є втрати внаслідок гістерезису (циклічного перемагнічування осердя) $\Delta P_{\text{г}}$ та внаслідок вихрових струмів $\Delta P_{\text{в}}$: $\Delta P_M = \Delta P_{\text{г}} + \Delta P_{\text{в}}$. Втрати від гістерезису пропорційні площі петлі гістерезису і їх визначають за виразом:

$$\Delta P_{\text{г}} = \gamma_{\text{г}} \sigma f B_m^2,$$

де $\gamma_{\text{г}}$- питомі втрати на гістерезис; σ - маса магнітопроводу; f - частота струму намагнічування; B_m - амплітуда магнітної індукції. Для зменшення втрат на гістерезис осердя виготовляють з магнітом'яких феромагнітних матеріалів, що мають вузьку петлю гістерезису.

Вихрові струми (струми Фуко) індукуються і замикаються по поверхні осердя, нагрівають та розмагнічують його. Втрати від вихрових струмів визначають за виразом:

$$\Delta P_{\text{в}} = \gamma_{\text{в}} \sigma f^2 B_m^2,$$

де $\gamma_{\text{в}}$- питомі втрати на вихрові струми; σ - маса магнітопроводу; f - частота струму намагнічування; B_m - амплітуда магнітної індукції. Для зменшення втрат на вихрові струми осердя виготовляють шихтованим або феритовими (сталь з домішками кремнію), які мають високу магнітну проникність та великий електричний опір.

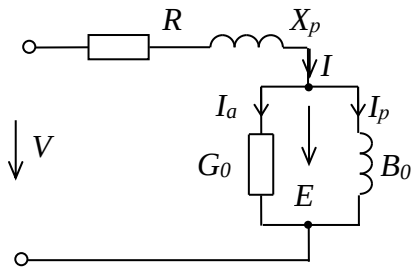


Рис. 6.7

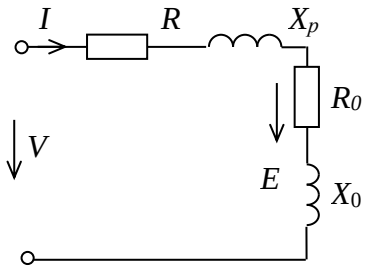


Рис. 6.8

На рис. 6.7 та 6.8 зображені дві еквівалентні *схеми заміщення індуктивної котушки* з осердям, елементи яких відображають всі властивості котушки: R – активний опір обмотки (електричні втрати); реактивний опір розсіювання $X_{\text{р}} = \omega L_{\text{р}}$ зумовлений потоком розсіювання $\Phi_{\text{р}}$; B_0 - реактивна провідність, X_0 – реактивний опір, зумовлені основним магнітним потоком Φ_0; G_0- активна провідність, R_0 – активний опір магнітопроводу (магнітні втрати).

Для схем на рис.6.7. та 6.8 запишемо рівняння за другим законом Кірхгофа: $\underline{V} = -\underline{E} + R\underline{I} + jX_{\text{р}}\underline{I}$; $\underline{V} = -\underline{E} + R_0\underline{I} + jX_0\underline{I}$.

Миттєве та діюче значення електрорушійної сили, що індукується основним магнітним потоком:

$$e = -w\,d\Phi / dt\,, \qquad E = \omega w\,\Phi_m / \sqrt{2} = 4.44\,fw\,\Phi_m\ .$$

Миттєве та діюче комплексне значення електрорушійної сили, що індукується магнітним потоком розсіювання: $e_{\text{р}} = -L_{\text{р}} di/dt$, .

$$\underline{E}_{\text{р}} = -j\omega L_{\text{р}} I = -X_{\text{р}}\underline{I}.$$

Якщо магнітопровід має немагнітний (повітряний) проміжок (неоднорідне магнітне коло) закон Ома для нього також випливатиме із закону повного струму $H\,l + H_{\delta}\delta = wI$:

$$wI = \Phi\left(\frac{l}{\mu_0\mu_r S} + \frac{\delta}{\mu_0 S}\right),$$

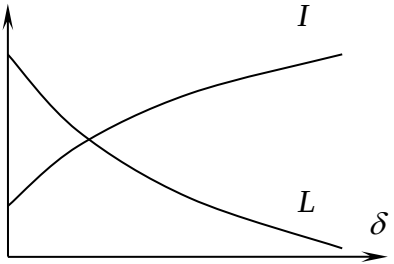


Рис. 6.9

магнітний опір кола $R_{\text{м}} = \left(\frac{l}{\mu_0\mu_r S} + \frac{\delta}{\mu_0 S}\right)$ буде збільшуватися із збільшенням величини цього проміжку. Це мало б спричинити зростання магнітного потоку, проте магнітний потік є незмінним, бо залежить від величини прикладеної напруги. Тому згідно із законом Ома зростатиме струм живлення. Залежності струму I та індуктивності L осердя від величини немагнітного проміжку δ показано на рис.6.9. Тому котушки зі змінним немагнітним проміжком (дроселі) застосовують для регулювання струму.