

## **Тема. Магнітні кола.**

**Мета:** ознайомити студентів з поняттям магнітне поле, магнітними властивостями речовин, законами магнітних кіл. Формувати компетентності користуватися науково-популярною літературою та виявлення творчих здібностей при розв'язуванні вправ. Виховати точність і чіткість при відповідях і розв'язуванні завдань.

### **План заняття:**

1. Властивості феромагнітних матеріалів.
2. Магнітні кола і їх класифікація.
3. Основні закони магнітних кіл.

### **Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в Інтернеті**

#### **Основна:**

1. Електротехніка та електроніка. Теоретичні відомості, розрахунки та дослідження за підтримкою комп'ютерних технологій: Навч. посіб. /Щерба А.А., Рябенський В.М., Кучеренко М.Є., Победаш .К.К. та ін. – К.: "Корнійчук", 2007, - 488 с. з іл.

#### **Інформаційні ресурси в Інтернеті**

<http://fizmat.spk.com/pki/ii-semestr/tema-3/38-elektrotekhnika/488-magnitni-kola>

## Текст лекції

### 4.1. Властивості феромагнітних матеріалів

За значенням абсолютної магнітної проникності  $\mu_a$  речовини поділяють на: **діамагнітні** –  $\mu_a < 1$  (полімерні матеріали, срібло, мідь), **парамагнітні** –  $\mu_a > 1$  (платина, алюміній, повітря) і **феромагнітні** –  $\mu_a \gg 1$  (залізо, кобальт, нікель, ферити).

Основним матеріалом, який використовують для виготовлення магнітопроводів сучасного електротехнічного обладнання є напівпровідникові феромагнетики - ферити.

**Ферити** — це тверді розчини оксиду заліза  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  і оксиду одновалентного або двовалентного металу Ni, Zn, Si, Cd, Cu, Pb і ін. Виготовляють ферити спіканням при температурі 1100—1600 К добре перемішаних порошкоподібних компонентів. Особливого значення набули магній-марганцеві ферити з коерцитивною силою 160 000—240 000 А/м, які, зокрема, використовують у запам'ятовуючих пристроях ЕОМ («+В» і «-В» відповідають двійковій системі чисел).

Крім великої магнітної проникності  $\mu_a$ , яка в десятки, а то і сотні тисяч разів може перебільшувати магнітну проникність вакууму  $\mu_0$ , **ферити** мають здатність добре намагнічуватися і, тим самим, **ставати джерелами магнітного поля**. Так наприклад, якщо МРС, яку збуджує котушка зі струмом відносно мала, то при введенні у цю котушку феромагнітного осердя, магнітна проникність якого  $\mu_a$ , МРС підсилюється приблизно в  $\mu = \mu_a/\mu_0$  разів. Крім того, маючи дуже великий питомий електричний опір, ці матеріали обмежують втрати енергії на індукційні струми.

Для розрахунку магнітних кіл складених із феромагнітних матеріалів використовують криві намагнічування – залежності  $B(H)$ . Враховуючи, що для абсолютної більшості цих матеріалів криву намагнічування точно описати аналітично **складно**, то у довідниковій літературі залежності  $B$  від  $H$  звичайно наводять у вигляді таблиць або графіків (рис. 2.4).

Залежність  $B(H)$ , побудовану при безперервному збільшенні  $B$  і  $H$  від нуля, тобто при відсутності у речовини залишкової намагніченості, називають початковою кривою намагнічування (крива 1). З рис. 4.1 видно, що зі збільшенням напруженості магнітного поля, індукція (намагніченість) матеріалу збільшується. Разом з тим, при  $H > H_c$  подальше зростання  $B$  практично не відбувається. Стан матеріалу намагніченого до  $B \geq B_c$  називають **магнітним насиченням** матеріалу.

При періодичному намагнічуванні феромагнетику до стану насичення то в одному, то в іншому напрямках процес відбувається за так званою граничною гістерезисною петлею. При періодичному намагнічуванні до  $B < B_c$  отримують сімейство гістерезисних петель (на рис. не показані) розташованих у межах граничної петлі.

Площа гістерезисної петлі є пропорційною енергії, яка витрачається за один цикл на перемагнічування одиниці об'єму матеріалу. Координати **точок перетину** граничної петлі гістерезису з **віссю ординат**  $B_r$  називають **залишковим намагнічуванням**, а з **віссю абсцис**  $H_r$  - **коерцитивною силою**, якою є напруженість магнітного поля, при якій залишкова намагніченість феромагнетику зменшується до нуля.

Залежно від значення  $H_r$ , тобто **ширини гістерезисної петлі**, феромагнітні матеріали умовно поділяють на магнітом'які ( $H_r < 4$ , кА/м – вузька петля гістерезису) і магнітотверді ( $H_r > 4$ , кА/м – широка гістерезисна петля). Оскільки магнітна проникність магнітом'яких матеріалів (технічне залізо, електротехнічні сталі, залізонікелеві сплави, чавуни) велика, а коерцитивна сила мала, то втрати енергії на їх перемагнічування відносно малі і тому такі матеріали використовують для виготовлення електромагнітних пристроїв, які працюють зі змінною МРС (індукційні котушки, трансформатори тощо).

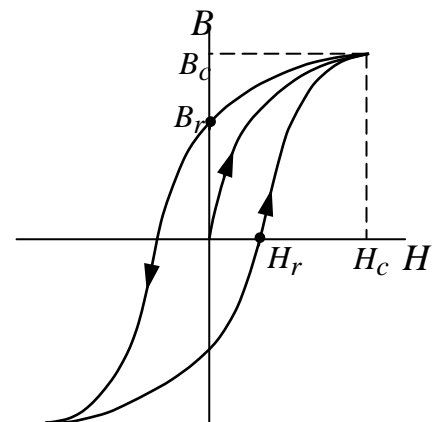


Рис. 4.1. Крива намагнічування феромагнітного матеріалу

**Тверді магнітні матеріали** характеризуються тим, що коерцитивна сила і залишкова індукція  $B$  у них великі. Це, наприклад, вуглецева, вольфрамові, хромові та кобальтова сталі, альніко (24 Co; 14 Ni; 8 Al; 3 Cu; інше - Fe), альні (25 Ni; 12 Al; інше - Fe). Названі магнітні матеріали **мають малий питомий опір, а тому у змінних магнітних полях спричинюють значні втрати енергії на індукційні струми**. Їх використовують для побудови постійних магнітів, які є складовою частиною магнітоелектричних вимірювальних приладів, динаміків тощо.

Слід відмітити, що **під дією магнітного поля феромагнітні матеріали змінюють свої геометричні розміри** (це явище називають **магнітострикцією**), а при стисненні або розтягуванні здатні намагнічуватися. Зі збільшенням температури магнітна проникність феромагнетиків зменшується і для кожного з матеріалів є така критична температура (точка Кюрі) при якій матеріал втрачає свої феромагнітні властивості.

Поряд з цим стає очевидним, що від зміни магнітного поля в просторі індукційний струм виникатиме не тільки в лінійному струмопровідному контурі, а й у самому масивному струмопровідному тілі. Ці **вихрові індукційні струми називають струмами Фуко**.

Завдяки малому електричному опору масивних тіл індукційні струми в них можуть досягати значної густини і у самих тілах буде виділятися значна кількість теплоти. Для зменшення втрат на нагрівання вихровими струмами якоря електричних машин і сердечники трансформаторів виготовляють не з суцільного заліза, а з тонких пластин або тонких дротин, покритих непровідним лаком. Площини пластин або дротини розміщують перпендикулярно до можливих напрямів струмів Фуко. Разом з тим, теплову дію індукційних струмів широко використовують для плавлення металів, нагрівання при поверхневому гартуванні сталевих виробів та ін. Гальмівну силу, що утворюється в зоні дії струмів Фуко використовують в конструкціях магнітних демпферів — заспокоювачів рухомих стрілок у гальванометрах, сейсмографах та інших приладах. ..

#### 4.2. Магнітні кола й їх класифікація

**Магнітним колом** називають сукупність **джерел МРС** і феромагнітних та інших матеріалів і середовищ, по яких замикається магнітний потік.

Джерелом МРС у магнітному колі може бути одна чи кілька котушок, або ж постійний магніт. Шлях, по якому замикаються силові лінії магнітного потоку, або іншими словами магнітопровід, в більшості випадків виконують з феромагнітних матеріалів необхідної конфігурації. Часто магнітопровід електротехнічних пристроїв, окрім феромагнітного матеріалу, включає у себе ділянки виконані з не феромагнітних матеріалів, наприклад повітряні зазори. Феромагнітний матеріал при цьому використовується для направлення і концентрації силових ліній в місці, де безпосередньо використовується енергія магнітного поля, наприклад у повітряний зазор між ротором і статором електричної машини.

**Магнітні кола поділяють на нерозгалужені – однорідні та неоднорідні, і розгалужені – симетричні і несиметричні.**

До **однорідних** відносять кола, в яких напруженість магнітного поля по всій довжині магнітопроводу є величиною сталою (рис. 4.2, а). Таким чином, достатньо змінити переріз (рис. 4.2, б) або ж матеріал (рис. 4.2, в) будь-якої з ділянок однорідного кола і воно вже буде **неоднорідним**.

Потрібно відмітити, що неоднорідним також є магнітне коло, в якому існує магнітний потік розсіювання  $\Phi_r$ , наприклад внаслідок нерівномірного розподілення витків котушки по довжині магнітопроводу. **Потоком розсіювання називають частину магнітного потоку котушки зі струмом, силові лінії якого відгалужуються від основного потоку  $\Phi$  магні-**

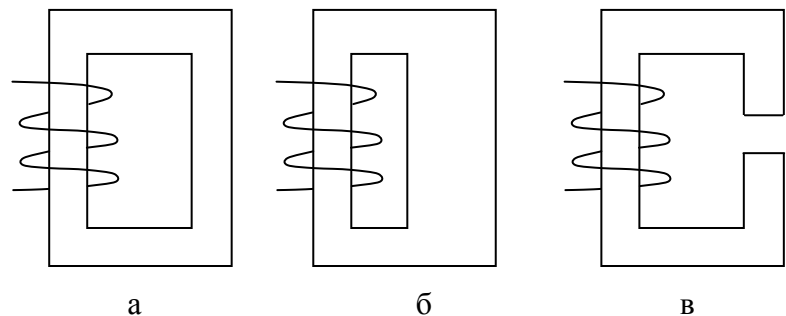


Рис. 4.2. Нерозгалужене магнітне коло: а – однорідне; б, в – неоднорідне

топроводу і замикаються навколо котушки через повітря. Але, оскільки звичайно  $\Phi_p < 0,1\Phi$ , то при виконанні практичних розрахунків магнітних кіл величиною потоку розсіювання часто нехтують і вважають, що на всій довжині магнітопроводу, наприклад кіл показаних на рис. 4.2, діє постійний магнітний потік  $\Phi$ .

**Симетричне** розгалужене коло, по суті являє собою комбінацію двох однакових однорідних (рис. 4.3, а) або ж двох однакових неоднорідних (рис. 4.3, б) нерозгалужених кіл. Відповідно, прикладом **несиметричного** розгалуженого кола буде бути комбінація однорідного і неоднорідного нерозгалужених кіл (рис 4.3, в).

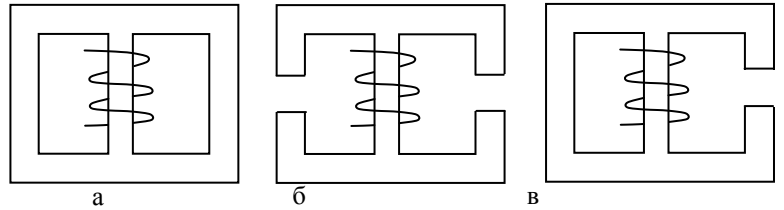


Рис. 4.3. Розгалужене магнітне коло: а, б – симетричне; в – несиметричне

Кола, в яких МРС створюється дією постійного струму, називають колами з постійною МРС, а в яких дією змінного струму – колами зі змінною МРС.

### 2.3. Основні закони магнітних кіл

Подібно до електричного, стан магнітного кола можна визначити трьома основними законами, які за аналогією із електричними колами називають законами Кірхгофа і Ома.

**Перший закон Кірхгофа** – алгебраїчна сума потоків, що збігаються в будь-якому вузлі магнітного кола дорівнює нулю:

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k = 0.$$

**Другий закон Кірхгофа** – алгебраїчна сума магнітних напруг ( $U_m = Hl$ , де  $H$  та  $l$  – напруженість магнітного поля та довжина магнітної лінії цього поля відповідно) у будь-якому замкненому контурі магнітного кола дорівнює алгебраїчній сумі МРС  $F$ , які діють у цьому контурі:

$$\sum_{k=1}^n U_{mk} = \sum_{k=1}^n F_k.$$

Для кола з котушкою, де  $F = IW$ , аналітичний запис другого закону Кірхгофа має вигляд:

$$\sum_{k=1}^n (Hl)_k = \sum_{k=1}^n (IW)_k,$$

Для більшості реальних конструкцій магнітопроводів математичний запис другого закону Кірхгофа співпадає з записом закону повного струму (повний струм включає в себе струми провідності, переносу та електричного зміщення). У загальному випадку **закон повного струму – циркуляція вектора напруженості магнітного поля по замкненому контуру дорівнює повному струму, що пронизує поверхню, обмежену цим контуром**, записують так:

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \sum_{k=1}^n I_k$$

**Закон Ома** встановлює зв'язок між магнітним потоком, який діє на ділянці магнітного кола, і магнітною напругою  $U_m$  на цій ділянці. Так, для ділянки осердя довжиною  $l$ , перерізом  $S$  і магнітною проникністю  $\mu_a$  маємо:

$$U_m = Hl = Bl / \mu_a = \Phi l / (S\mu_a).$$

Звідси, з урахуванням співвідношення  $Hl = IW = F$ , для нерозгалуженого однорідного магнітного кола одержимо:

$$\Phi = IW / [l / (S\mu_a)],$$

де  $l$  та  $S$  – відповідно довжина та переріз магнітопроводу у якому діє МРС.

За аналогією з теорією електричних кіл при розрахунках магнітних кіл використовують понят-

тя магнітний опір  $R_M$ , Гн<sup>-1</sup>, і магнітна провідність  $\lambda = 1/R_M$ , Гн:

$$R_M = l / (\mu_a S),$$

$$\lambda = \mu_a S / l.$$

Тому закон Ома для магнітного кола можна записати так:

$$\Phi = F / R_M = F\lambda.$$

#### 4.4. Розрахунок магнітних кіл з постійною магніторушійною силою

Коли при відомих геометричних розмірах, конфігурації і матеріалі магніторповоду потрібно визначити МРС (струм в котушці), необхідну для утворення у магнітному колі заданого магнітного потоку (магнітної індукції), то прийнято вважати, що вирішується так звана **пряма задача розрахунку магнітних кіл**. Разом з тим, на практиці часто доводиться вирішувати і зворотню задачу – коли при відомих діючій МРС і геометричних розмірах, конфігурації та матеріалі магніторповоду, потрібно визначити магнітний потік кола.

Хоча методики вирішення прямої і зворотної задач розрахунку магнітних кіл відрізняються між собою, але початковий етап у них є спільним.

Спочатку, за заданим кресленням кола (рис. 4.4), керуючись однорідністю та однаковістю поперечного перерізу матеріалу, наявністю або відсутністю обмотки, магнітопровід розбивають на  $k$  окремих ділянок. Потім, для кожної з виділених ділянок визначають довжину її середньої лінії  $l_k$  та площу поперечного перерізу  $S_k$ .

Далі, при вирішенні прямої задачі, для кожної ділянки кола обчислюють магнітну індукцію:

$$B_k = \Phi / S_k$$

і за кривими намагнічування  $B = f(H)$  матеріалів знаходять  $H_k$ . Напруженість магнітного поля у повітряному зазорі з площею поперечного перерізу  $S_\delta$  розраховують, як лінійну задачу за формулою:

$$H_\delta = \Phi / (S_\delta \mu_0) = B_\delta / \mu_0,$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн.

Магніторушійну силу кола і струм обмотки розраховують за формулами, відповідно:

$$F = \sum_{k=1}^n (Hl)_k,$$

$$I = F / W.$$

У зв'язку з тим, що для феромагнітних матеріалів залежність  $B$  від  $H$  є нелінійною функцією, розв'язати зворотню задачу безпосередньо аналітичним шляхом достатньо складно, а у випадках коли магнітопровід складається з кількох різнорідних ділянок стає просто неможливо. Тому для вирішення зворотної задачі часто застосовують графоаналітичний метод, суть якого наступна.

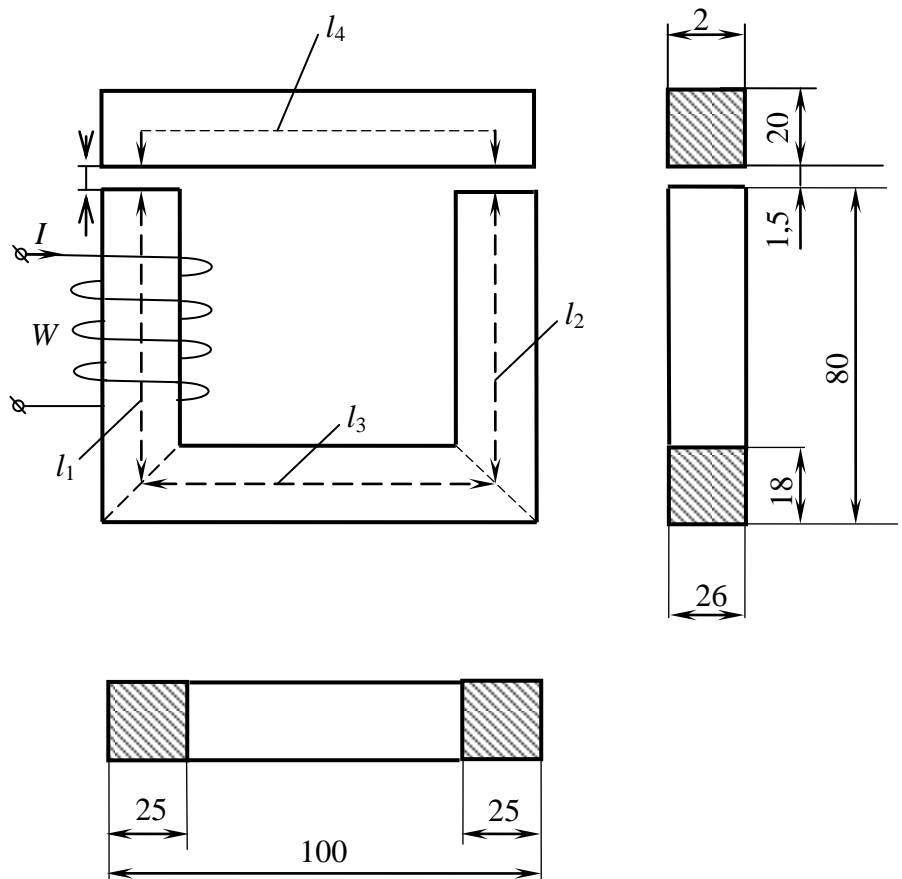


Рис. 4.4. Магнітне коло з постійно магніторушійною си-

Після визначення довжин середніх ліній і площ перерізів ділянок кола для декількох заданих довільно значень  $\Phi$  вирішують пряму задачу (визначають  $F = IW$ ). Далі за результатами обчислень будують вебер-амперну характеристику розрахункового кола, з якої для заданого значення  $F_H = I_H W$  визначають магнітний потік  $\Phi_H$ .

## 2.5 Особливості магнітних кіл зі змінною магніторушійною силою

Особливості магнітних кіл зі змінною МРС покажемо на прикладі аналізу котушки з замкненим феромагнітним осердям (рис. 4.7) підключеної до джерела синусоїдної напруги  $u = U_m \sin \omega t$ .

З метою спрощення аналізу, ідеалізуємо це коло і будемо вважати, що активний опір  $W$  витків котушки дорівнює нулю, а також, що система не має потоку розсіювання і підведена до котушки напруга, врівноважується тільки ЕРС самоіндукції ( $u = -e_L = Wd\Phi/dt$ ), яка індукована робочим потоком  $\Phi$ .

Відповідно до прийнятих умов можемо записати:

$$-Wd\Phi/dt = U_m \sin \omega t$$

Рішення цього диференційного рівняння відносно  $\Phi$ , при відсутності постійної складової потоку, має вигляд:

$$\Phi = \frac{E\sqrt{2}}{2\pi fW} \cos \omega t = \Phi_m \cos \omega t.$$

Звідси, після заміни  $\pi\sqrt{2} = 4,44$  і відповідних перетворень, одержимо рівняння трансформаторної ЕРС –

$$E = 4,44 fW\Phi_m.$$

З результатів аналізу одержаних вище рішень впливає **перша** особливість електромагнітних процесів в магнітному колі змінного струму – **закон зміни магнітного потоку повністю визначається законом зміни напруги, підведеної до обмотки магнітопроводу і не залежить від параметрів цього магнітопроводу.**

Одержаний прямий зв'язок між ЕРС (підведеною до котушки напругою) і магнітним потоком у осерді не означає, що напруга безпосередньо створює магнітне поле. Поле створює електричний струм, але аналізувати електромагнітні процеси і визначати магнітний потік зручно за величиною напруги, а вже далі визначати силу струму як функцію потоку. Тут же відмітимо, що на часовій (векторній) діаграмі (рис. 4.8)

синусоїди  $u$  та  $e$  (вектори  $\dot{U}$  та  $\dot{E}$ ) зсунуті між собою на  $180^\circ$ , а синусоїда (вектор) магнітного потоку  $\Phi$  – на кут  $\pm 90^\circ$  по відношенню до них.

Отже, ми отримали, що закон зміни магнітного потоку в осерді повторює закон зміни напруги, прикладеної до затискачів обмотки цього осердя. Але, оскільки у феромагнетиків функція  $B(H)$  або  $\Phi(i)$  не є лінійною, то струм у витках обмотки повинен змінюватися за іншим законом ніж  $\Phi$  і отже  $U$ . Звідси впливає **друга** особливість кіл зі змінною МРС – **закон зміни струму в обмотці феромагнітного магнітопроводу не такий, як закон зміни напруги, прикладеної до затискачів цієї обмотки.**

Для нашого випадку, коли до затискачів котушки з осердям прикладена синусоїдна напруга у її витках буде діяти несинусоїдний струм. За таких умов, щоб виконувалось рівняння  $u = Ldi/dt$ , ін-

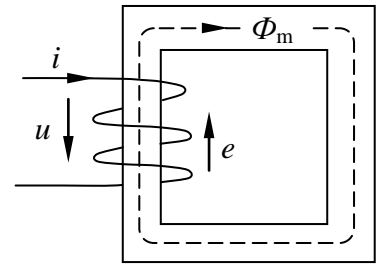


Рис. 4.7. Магнітне коло із змінною магніторушійною силою

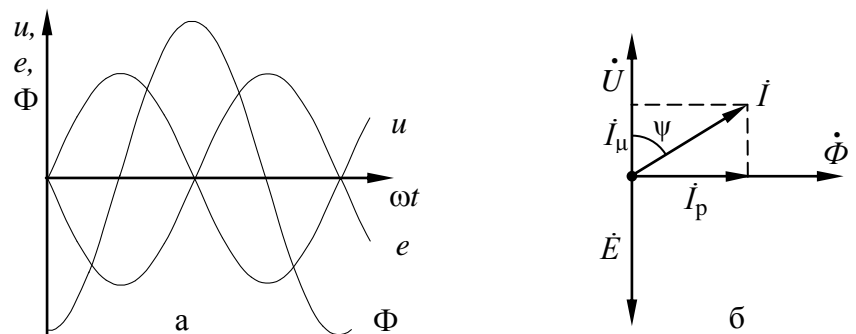


Рис. 4.8. Часова (а) і векторна (б) діаграми ідеальної котушки із стальним осердям

дуктивність  $L$  котушки повинна бути змінною величиною. Звідси випливає **третя** особливість кіл зі змінною МРС – **індуктивність обмотки феромагнітного магнітопроводу є функцією струму цієї обмотки**.

Для несинусоїдної кривої  $i = f(t)$  можна визначити діюче значення струму і розглядати його як діюче значення деякого еквівалентного синусоїдного струму. Але синусоїда цього еквівалентного струму повинна буде відставати від синусоїди напруги вже не на  $90^\circ$ , а на менший кут  $\psi$ .

Знаючи кут  $\psi$ , діюче значення струму  $I$  можна розкласти на активну  $I_r$  і реактивну (намагнічуючу)  $I_\mu$  складові:

$$I_r = I \cos \psi,$$

$$I_\mu = I \sin \psi.$$

Оскільки еквівалентний струм обмотки магнітопроводу не співпадає за фазою з прикладеною напругою, то, відповідно, у цьому магнітопроводі є втрати енергії. Таким чином, на відміну від магнітопроводу з постійною МРС де втрат немає, у магнітопроводі зі змінною МРС є **магнітні втрати енергії** – це **четверта особливість** кіл зі змінною МРС.

У загальному випадку, втрати потужності у магнітних колах зі змінною МРС складаються з втрат на нагрівання обмотки (електричні або втрати у міді):

$$P_M = I^2 r,$$

і втрат на нагрівання феромагнітного осердя (магнітні, або втрати у сталі)  $P_c$ . Втрати в осерді, у свою чергу складаються з втрат від вихрових струмів  $P_v$  (струмів Фуко) і втрат на гістерезис  $P_\Gamma$ :

$$P_c = P_v + P_\Gamma.$$

Вихровими називають струми, які індукуються у масиві провідника при перетині його магнітними силовими лініями. Таку назву ці струми отримали тому, що вони замикаються у провіднику по кривих, які нагадують вихор. Згідно з правилом Ленца магнітне поле вихрових струмів завжди діє розмагнічуюче по відношенню до магнітного поля, яке їх індукує. Отже наявність вихрових струмів погіршує енергетичні показники осердя. Внаслідок так званого магнітного поверхневого ефекту глибинні шари осердя охоплюються більшими вихровими струмами, ніж поверхневі і, отже, у глибинних шарах, розмагнічуюча дія вихрових струмів сильніша, ніж у поверхневих. Враховуючи це, для зменшення втрат від вихрових струмів, магнітопроводи сучасних пристроїв набирають з електроізолюваних пластин електротехнічної сталі. Для зменшення опору магнітопроводу ці пластини розташовують обов'язково паралельно напрямку дії магнітного потоку.

Оскільки поверхневий магнітний ефект підсилюється зі збільшенням частоти струму в обмотці, то для різних частот струму існують свої оптимальні матеріал і товщина пластини. Так, для ви-

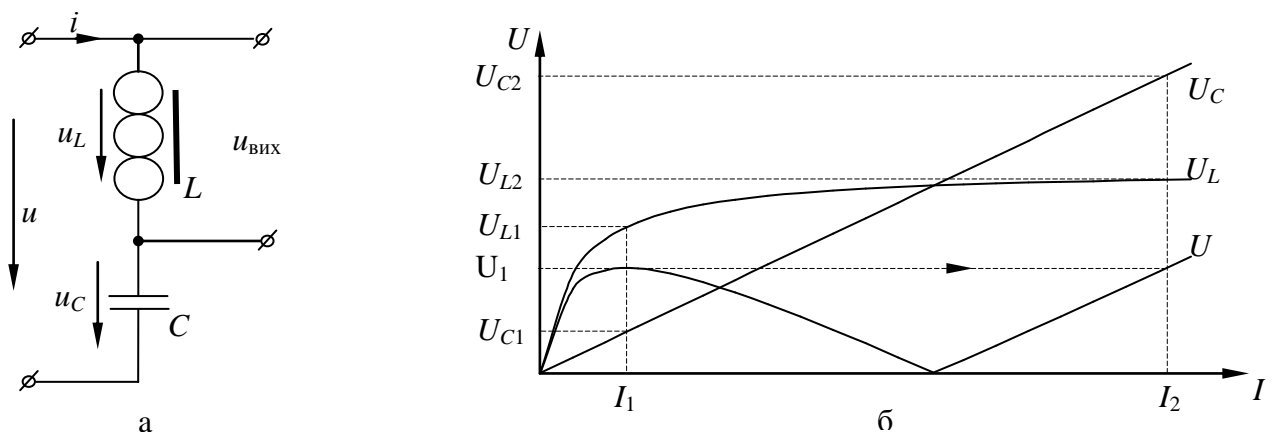


Рис. 4.9. До розгляду явища ферорезонансу: а – схема кола; б – вольт-амперна характеристика елементів та всього кола

готовлення магнітопроводів обмоток, де діють струми промислової частоти 50 Гц, використовують листову електротехнічну сталь товщиною 0,35–0,5 мм. В якості електроізоляції листів при цьому застосовують окалину, спеціальні електротехнічні лаки чи епоксидні компаунди. При більших частотах струму товщина листів може бути зменшена до 0,005 мм. Для частот у десятки МГц

осердя пристроїв виготовляють з магнітодіелектриків і феритів.

#### 4.6. Резонансні явища в магнітних колах

На відміну від кіл синусоїдного струму з постійними  $L$  і  $C$  елементами та  $f$ , де резонансні явища (струму або напруги) можуть бути досягнуті шляхом зміни величини одного з елементів, у колах, в які ввімкнені лінійна ємність і котушка з феромагнітним осердям, явище резонансу додатково може бути досягнуто шляхом зміни або струму, або напруги кола. Наприклад, ферорезонанс напруги у колі (рис. 4.9, а) з послідовним з'єднанням лінійного конденсатора ( $C = const$ ) і котушки з феромагнітним осердям ( $L \neq const$ ) має місце при перетинанні вольт-амперних характеристик (ВАХ) цих елементів – коли  $U_C = U_L$ . Для пояснення процесів, які відбуваються у такому колі скористуємося рис. 4.9, б, де наведені ВАХ елементів  $U_C = f(I)$ ,  $U_L = f(I)$  та всього кола  $U = f(I)$ .

При мінімальному збільшенні напруги джерела понад  $U_1$ , струм кола стрибкоподібно змінюється від  $I_1$  до  $I_2$ . Одночасно з цим стрибкоподібно змінюється напруга на ємнісному елементі – від  $U_{C1}$  до  $U_{C2}$ , і несуттєво, від  $U_{L1}$  до  $U_{L2}$ , на індуктивному. Подальше збільшення напруги джерела  $U > U_1$  (після стрибка струму) супроводжується пропорційним збільшенням  $U_C$  та вкрай незначним збільшенням  $U_L$ . Якщо ідеалізувати коло і вважати, що втрати енергії у його складових відсутні, то при зменшенні напруги джерела розглянуті процеси будуть відбуватися у зворотному напрямку. Таким чином, при значних коливаннях напруги живлення кола спад напруги на котушці із насиченим магнітопроводом залишається практично сталою. Ця обставина використовується в ферорезонансних стабілізаторах, де напруга на затискачах котушки є стабілізованою вихідною напругою  $u_{вих}$  пристрою. Явище, коли несуттєва зміна активного опору або напруги живлення кола супроводжується стрибкоподібною зміною струму, отримало назву тригерного ефекту. Воно широко використовується у ферорезонансних реле захисту електрообладнання від перенапруги.

#### 4.7. Електричні дроселі

Силевий електричний дросель являє собою котушку з феромагнітним осердям, яка має нелінійну індуктивність. Шляхом послідовного вмикання (рис. 4.10) з навантаженням  $Z_H$ , їх використовують для регулювання струму або напруги у колах змінного струму.

На відміну від з регульовальних реостатів, які мають великий активний опір і, практично, не мають реактивного опору, дроселі, навпаки, мають великий реактивний опір і відносно малий активний. Оскільки втрати енергії у пристрої визначаються величиною його активного опору (закон Джоуля-Ленца), то при застосуванні дроселів пристрої конструктивно значно менші ніж при застосуванні реостатів.

На практиці широко використовують дроселі з замкнутим феромагнітним осердям (рис. 4.11, а), з осердям, яке має регульований, або не регульований повітряний зазор  $\delta$  (рис. 4.11, б), а також дроселі з додатковим підмагнічуванням постійним струмом – так звані дроселі насичення (рис. 4.11, в).

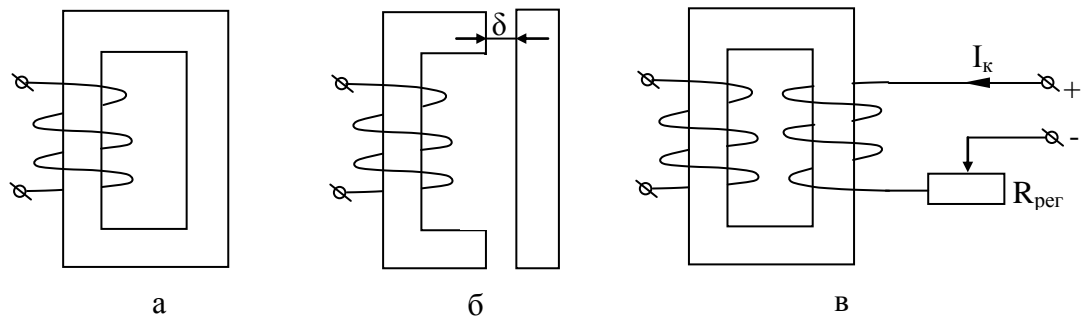


Рис. 4.11. Електричні дроселі: а – із замкненим осердям; б – з регульованим повітряним зазором; в – з підмагнічуванням

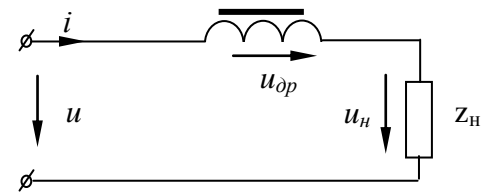


Рис. 4.10. Схема вмикання дроселя



Дроселі з замкнутим сталевим (у більшості випадків) осердям мають практично сталий повний опір. Їх використовують, наприклад, у електроосвітлювальних установках для зменшення напруги живлення газорозрядних ламп.

В дроселях, де осердя має повітряний зазор, магнітне коло складається з двох ділянок, які суттєво відрізняються між собою за величиною опорів – сталевий осердя і повітряного зазору. Магнітний опір  $i$ , відповідно, індуктивність котушки дроселя такої конструкції в основному визначаються товщиною повітряного зазору. Якісний вигляд залежності повного електричного опору  $Z_{др}$  пристрою від товщини  $\delta$  повітряного зазору показаний на рис. 4.12, а.

При незмінній напрузі джерела зі збільшенням товщини повітряного зазору дроселя струм  $I$  у колі і напруга на навантаженні збільшуються, а напруга  $U_{др}$  на котушці дроселя зменшується. Залежність  $U_{др}(I)$  називають ВАХ дроселя. Як впливає із рис. 4.12, б збільшення товщини повітряного зазору  $\delta = 0, \delta_1 < \delta_2$  сприяє спрямленню ВАХ пристрою. Дроселі з регульованим повітряним зазором використовують для зміни струму навантаження, наприклад, струму зварювання у зварювальних апаратах. Основним недоліком цих пристроїв є складність будови вузла регулювання товщини повітряного зазору.

Дросель насичення являє собою котушку із замкнутим осердям, виготовленим з магнітом'якої сталі. Ступінь насичення осердя  $i$ , отже, індуктивність котушки пристрою, тут регулюють величиною постійного струму у додатковій обмотці (обмотці керування) за допомогою реостату  $R_{рег}$ . Зі збільшенням струму керування  $I_k$  повний опір  $Z_{др}$  пристрою зменшується, а зі зменшенням, відповідно, збільшується (рис. 4. 13). Дроселі такої конструкції використовують у ферорезонансних стабілізаторах напруги, безконтактних реле і т. ін.

## 2.8. Питання для самоперевірки за розділом „Магнітні кола”

1. Що називають магнітним полем?
2. Якими величинами визначають силову дію магнітного поля?
3. Від чого залежить сила, яка діє на провідник зі струмом розташований у магнітному полі?
4. Які матеріали називають феромагнетиками?
5. Що називають магнітним колом?
6. Яке магнітне коло називають однорідним (неоднорідним)?
7. Для чого і де використовують електричні дроселі?

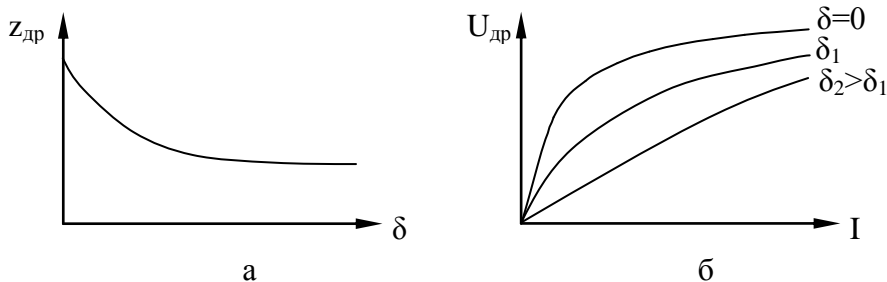


Рис. 4.12. Залежності повного електричного опору дроселя від товщини повітряного зазору (а) та вольт-амперні характеристики дроселя (б).

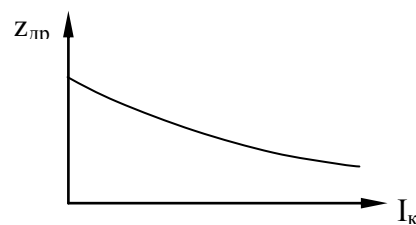


Рис. 4.13. Залежність повного електричного опору дроселя насичення від струму керування