

Лабораторна робота № 41

ДОСЛІДЖЕННЯ КОТУШКИ З ФЕРОМАГНІТНИМ ОСЕРДЯМ

Мета роботи

Ознайомлення із впливом режиму роботи котушки з феромагнітним осердям на її еквівалентні параметри. Визначення впливу режиму роботи котушки на величину потужності втрат в міді і сталі. Побудова схеми заміщення котушки з феромагнітним осердям та її векторної діаграми.

Підготовка до роботи

Вивчити рекомендовану літературу, ознайомитися з методичними вказівками до роботи, описом лабораторної установки, робочим завданням, підготувати протокол звіту та відповіді на наступні запитання:

1. Чим зумовлений нелінійний зв'язок між струмом і потокозчепленням у котушці з феромагнітним осердям?
2. Як розподіляється потокозчеплення у котушці з феромагнітним осердям?
3. Що таке індуктивність розсіювання і чому вона лінійно пов'язана зі струмом в котушці?
4. Як визначити напругу U_0 на котушці, що намагнічується?
5. У чому полягає сутність явища гістерезису?
6. Що представляють собою вихрові струми?
7. Які види теплових втрат існують у магнітопроводі котушки, від чого і як вони залежать?
8. Що являє собою кут магнітних втрат у котушці і чим він визначається?
9. Як виглядають схеми заміщення котушки з феромагнітним осердям?
10. Які параметри котушки змінюються зі зміною вхідної напруги?
11. Як будується векторна діаграма котушки з феромагнітним осердям?

Опис лабораторної установки

До складу лабораторної установки входять: котушка з феромагнітним осердям з регульованим повітряним проміжком і двома обмотками; два

вольтметри електромагнітної системи; амперметр електромагнітної системи; ватметр електродинамічної системи; набір неферомагнітних пластин; регульований перетворювач величини змінної напруги (лабораторний автотрансформатор АТ).

Порядок виконання роботи

1. Занести у табл. 41.1 паспортні дані котушки: число витків головної w_1 і додаткової w_2 обмоток, площу перетину осердя S .

Таблиця 41.1

w_1	w_2	S (см ²)
145	145	31,0

2. Скласти електричне коло згідно схеми рис. 41.1.

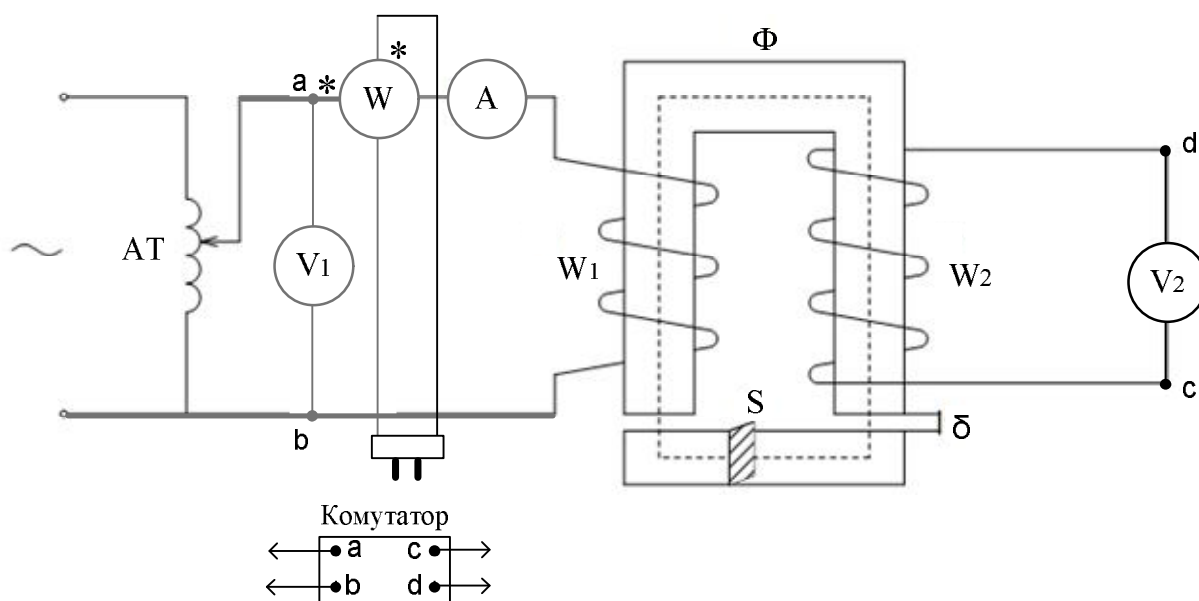


Рис.41.1

3. При незмінній частоті мережі живлення ($f = 50$ Гц) виміряти напругу на головній котушці U_1 , додатковій U_2 , потужності P_1 та P_2 , змінюючи струм у головній котушці в межах 1,0; 1,5...5А при величині повітряного проміжку:

- $\delta=0$;
- $\delta=2$ мм.

Результати вимірів занести до табл. 41.2.

Таблиця 41.2

Вимір					
δ (мм)	U_1 (В)	I (А)	P_1 (Вт)	U_2 (В)	P_2 (Вт)
$\delta=0$		1,0			
		1,5			
		2,0			
		2,5			
		3,0			
		3,5			
		4,0			
		4,5			
		5,0			
$\delta=2$		1.0			
		1.5			
		2.0			
		2.5			
		3.0			
		3.5			
		4.0			
		4.5			
		5.0			

4. При незмінних напрузі U_2 котушки і частоті мережі f виміряти струм I , потужності P_1 та P_2 , напругу U_1 котушки, змінюючи повітряний проміжок від 1 до 5 мм. Значення U_2 відповідає напрузі, для якої при повітряному проміжку 5 мм амперметр покаже струм $I_A = 5$ А.

Результати вимірів занести до табл. 41.3.

Таблиця 41.3

Вимір					
δ (мм)	U_1 (В)	I (А)	P_1 (Вт)	U_2 (В)	P_2 (Вт)
5					
4					
3					
2					
1					

Обробка результатів експерименту

1. За даними дослідів п.3а і 3б обчислити параметри котушки Z , R , X , Z_0 , R_0 , X_0 , X_s , G_0 , B_0 , I_a , I_p , $\cos\varphi$, α ; результати обчислень занести до табл. 41.4. Побудувати залежності $Z=f(U_0)$, $Z_0=f(U_0)$, $R_0=f(U_0)$, $X_0=f(U_0)$, $\cos\varphi=f(U_0)$, $I=f(U_0)$.

2. За отриманими даними п.4 обчислити Z , R , X , Z_0 , R_0 , X_0 , $\cos\varphi$; результати обчислень занести до табл. 41.5. Побудувати залежності $Z=f(\delta)$, $Z_0=f(\delta)$, $R_0=f(\delta)$, $X_0=f(\delta)$, $I=f(\delta)$, $\cos\varphi=f(\delta)$.

Таблиця 41.5

Обчислення									
δ (мм)	Z	R	X	Z_0	R_0	X_0	$\cos\varphi$	R_M	X_S
5									
4									
3									
2									
1									

3. Побудувати схему заміщення і векторні діаграми котушки з феромагнітним осердям для одного з дослідів п.3а та 3б.

4. Зробити і записати у протокол звіту висновки з виконаної роботи.

Методичні вказівки

Котушка з феромагнітним осердям є нелінійним елементом. Це пов'язано з тим, що магнітна проникність (μ) для феромагнетика не є постійною величиною і залежить від значення магнітної індукції в осерді. Нелінійна залежність $B(H)$ задає нелінійну залежність між потокозчепленням Ψ і струмом I , що буде впливати на величину індуктивності котушки з феромагнітним осердям.

На основі другого закону Кірхгофа запишемо:

$$u = Ri + \frac{d\Psi}{dt} = Ri + \frac{d\Psi_s}{dt} + \frac{d\Psi_0}{dt} = Ri + L_s \frac{di}{dt} + w \frac{d\Phi_0}{dt}, \quad (41.1)$$

де: R – активний опір обмотки котушки;

$\Psi = \Psi_s + \Psi_0$ – загальне потокозчеплення, яке складається з основного потокозчеплення Ψ_0 і потокозчеплення розсіювання Ψ_s .

Основне потокозчеплення обумовлене основним магнітним потоком Φ_0 , який замикається по осердю $\Psi_0 = w\Phi_0$, де w – число витків котушки.

Потоки розсіювання замикаються частково в повітрі, зв'язок між потокозчепленням розсіювання і струмом можна вважати лінійним і виразити через співвідношення $\Psi_s = L_s i$, де L_s – індуктивність розсіювання.

Якщо до котушки прикласти синусоїдну напругу, то через нелінійну залежність $\Psi(i)$, форма струму в котушці буде відрізнятися від синусоїдної. Однак, часто, у розрахунках таку несинусоїдну криву замінюють еквівалентною синусоїдною. Метод, заснований на такій заміні, називають методом еквівалентних синусоїд. Сенса такого підходу полягає у тому, що він дозволяє застосовувати для аналізу електромагнітних процесів комплексний метод розрахунку і будувати векторні діаграми.

Представимо рівняння (44.1) у комплексній формі:

$$\dot{U} = RI + j\omega L_s \dot{I} + \dot{U}_0. \quad (41.2)$$

В останньому виразі напруга $\dot{U}_0 = j\omega\Phi_0$ обумовлена ЕРС самоіндукції, яка створена основним магнітним потоком в феромагнітному осерді. Діюче значення цієї напруги визначається за формулою:

$$U_0 = 4,44 f w \Phi_{0m} = 4,44 f w s B_{0m}.$$

Враховуючи втрати в сталі, можна запропонувати дві еквівалентні схеми заміщення (рис. 41.2) котушки з феромагнітним осердям: послідовну (а) і паралельну (б).

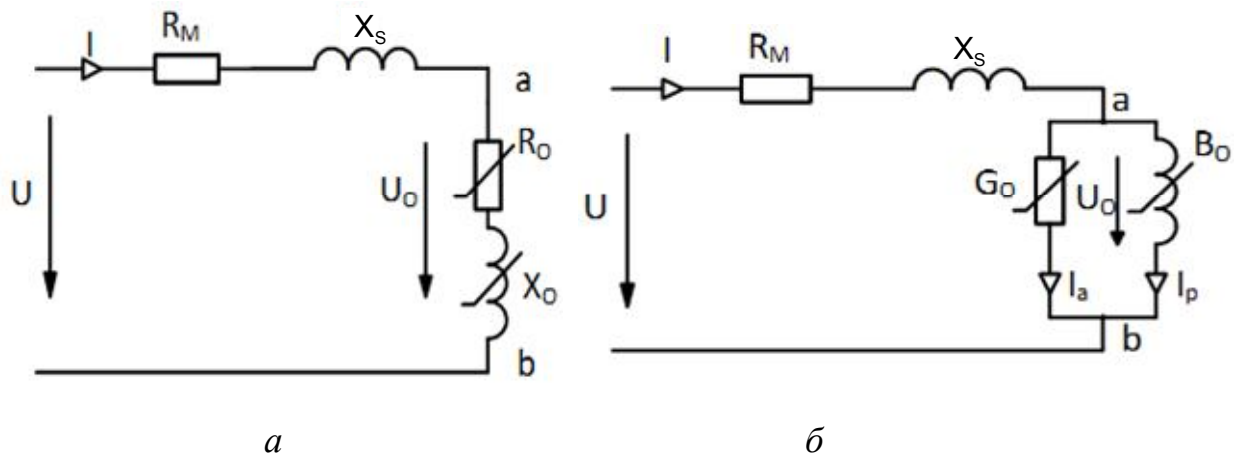


Рис. 41.2

В наведених вище схемах R_M – це активний опір обмотки на низьких частотах, який дорівнює омичному опору, тобто його можна визначити за законом Ома для постійного струму.

Реактивний опір $X_s = \omega L_s$ обумовлений магнітним потоком розсіювання. Активні втрати в осерді (втрати на гістерезис і вихрові струми) враховуються активною нелінійною провідністю G_0 в паралельній схемі, чи активним нелінійним опором R_0 в послідовній схемі заміщення.

Для визначення напруги U_0 , обумовленої основним магнітним потоком в феромагнітному осерді, використовується додаткова обмотка з числом витків w_2 , розміщена на тому ж осерді, що і основна. Вимірявши напругу на затискачах цієї обмотки U_2 і знаючи число витків w_1 і w_2 , можна розрахувати величину напруги

U_0 : $U_0 = \frac{w_1}{w_2} U_2$ та амплітудне значення магнітної індукції

$$B_{0m} = \frac{U_0}{4,44 f w s},$$

де s – площа поперечного перетину феромагнітного осердя котушки.

Оскільки на лабораторній установці $w_1 = w_2$, відповідно $U_0 = U_2$.

Параметри послідовної схеми заміщення котушки визначаються з виразів:

$$Z = U_1 / I; \quad R = P / I^2 \quad \text{чи} \quad R = Z \cos \varphi; \quad X = \sqrt{Z^2 - R^2}; \quad X_s = X - X_0; \quad L_s = X_s / 2\pi f.$$

Коефіцієнт потужності котушки $\cos \varphi = P / U_1 I$.

Для розрахунку параметрів паралельної схеми заміщення котушки використовують наступні розрахункові величини:

$$I_a = P_{cm} / U_0; \quad I_p = \sqrt{I^2 - I_a^2}; \quad \alpha = \arctg(I_a / I_p); \quad G_0 = I_a / U_0; \quad B_0 = I_p / U_0$$

В наведених вище виразах:

Z – повний опір котушки;

R – еквівалентний активний опір котушки;

X – еквівалентний реактивний опір котушки;

$Z_0 = U_0 / I$ – повний нелінійний опір намагнічувального контуру;

$R_0 = P_2 / I^2$ – активний нелінійний опір, обумовлений вихровими струмами і явищем гістерезису;

X_0 – реактивний нелінійний опір, який пов'язаний з процесами в осерді котушки $X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$;

$\varphi_0 = \arccos \frac{P_2}{IU_2}$ – кут зсуву між векторами U_0 та I ;

Φ – кут зсуву між струмом і напругою на вході котушки;

I_a – активна складова струму намагнічування, яка залежить від втрат в сталі осердя;

I_p – реактивна складова струму намагнічування;

G_0 – активна нелінійна провідність, яка враховує втрати в сталі осердя;

B_0 – реактивна провідність, яка відображає основну нелінійну частину індуктивності котушки, пропускаючи струм I_p , що забезпечує створення основного магнітного потоку;

α – кут магнітних втрат або кут зсуву між вектором струму і вектором основного магнітного потоку $\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi_0$.

Пояснюючи характер зміни деяких залежностей, слід пам'ятати, що при зміні напруги мережі живлення U_1 чи величини повітряного проміжку осердя δ , опори R_0 і X_0 котушки не будуть залишатися постійними, а отже, буде змінюватися струм, потужність P , повний опір Z , коефіцієнт потужності.

Так, наприклад, при дослідженні котушки при напрузі U , що змінюється, і незмінній частоті змінного струму f , з відомого співвідношення $U = 4,44 f w \Phi_m$ випливає, що максимальний магнітний потік Φ_m залежить від прикладеної до котушки напруги U . Тому втрати в осерді (втрати в сталі) при постійній частоті залежать від прикладеної напруги. Їх можна виразити так $P_{cm} = P_\delta + P_\sigma$, де P_δ – втрати на вихрові струми, P_σ – втрати на гістерезис.

$$\text{Активний опір кола } R = R_{cm} + R_m = \frac{P_\delta + P_\sigma}{I^2} + R_m = \frac{B_m^2}{I^2} (k_\delta f^2 + k_\sigma f) + R_m.$$

Як бачимо, при постійній частоті характер зміни активного опору зрештою залежить від співвідношення $(B_m / I)^2$, у якому із збільшенням U максимальна індукція B_m росте спочатку швидше, ніж струм, а потім повільніше. Зазначена залежність зміни активного опору від напруги зображена на рис. 41.3.

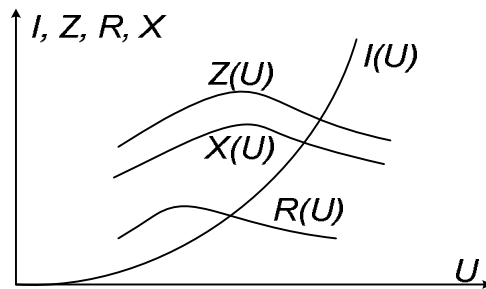


Рис.41.3

Реактивний X і повний опір Z мають характер зміни, подібний до зміни R , і дещо відрізняються лише деяким зсувом максимумів. При побудові графіку залежності $U(I)$ можна переконатися в тому, що він подібний по виду основної кривої намагнічування $B(H)$ (при відсутності повітряного проміжку в осерді).

При зміні повітряного проміжку в осерді і незмінній величині вхідної напруги U_0 , на підставі залежності $U_0 = 4,44 f w \Phi_{0m}$ отримаємо, що при зміні величини зазору максимальна індукція не буде змінюватися, не змінюється й магнітна проникність сталі μ . При цьому магнітний опір кола котушки дорівнює:

$$R_{\text{магн}} = \frac{l}{\mu S} + \frac{\delta}{\mu_0 S}.$$

Як бачимо зі збільшенням зазору магнітний опір росте, а індуктивність

$$L = \frac{w\Phi}{i} = \frac{w}{i} \frac{iw}{R_{\text{магн}}} = \frac{w^2}{R_{\text{магн}}} \quad - \quad \text{зменшується. Залежність } L(\delta) \text{ близька до}$$

гіперболічної. Оскільки активний опір R_0 котушки значно менший повного Z_0 , тому залежність $Z_0(\delta)$ можна вважати подібною залежності $L(\delta)$.

Характер залежності $\cos \phi = f(\delta)$ виявляється при розгляді виразу

$$\cos \phi = \frac{P_{cm}}{UI} + \frac{P_m}{UI} = \frac{P_{cm}U}{U^2I} + \frac{P_mI}{UI^2} = G_0Z + \frac{R_m}{Z}.$$

Перший доданок зі збільшенням δ зменшується, а другий збільшується. Спочатку, коли Z_0 ще досить велике, переважає перший доданок і зі збільшенням δ $\cos \phi$ зменшується. Надалі переважає другий доданок і $\cos \phi$ збільшується.

Залежності $Z_0(\delta)$ й $\cos \phi(\delta)$ показані на рис. 41.4.

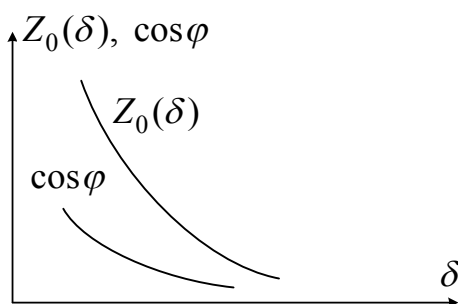


Рис.41.4

Векторна діаграма для паралельної схеми заміщення зображена на рис. 41.5. Побудова починається з вектора основного магнітного потоку Φ_{0m} . Потім під кутом α в бік випередження проводиться вектор струму I , який в свою чергу розкладається на активну і реактивну I_p складові. Напряга U_0 випереджає магнітний потік на кут $\pi/2$. Далі, відповідно рівняння (41.2) будемо падіння напруги на активному опорі обмотки (співпадає зі струмом за напрямком) та спад напруги на індуктивності розсіювання (випереджає струм на кут $\pi/2$). Напряга на затискачах котушки є векторною сумою трьох вказаних напруг.

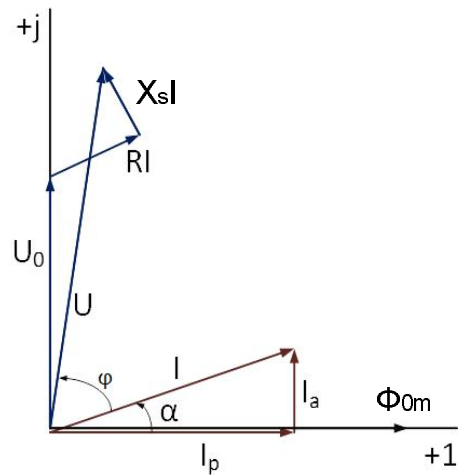


Рис. 41.5.

Питання для самостійної роботи

1. Зняти осцилограму $i(t)$ котушки.
2. Зробити гармонійний аналіз кривої $i(t)$.

Література

1. В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб, І.А. Курило та ін. Теоретичні основи електротехніки. Т2. Підручник. –Київ, НТУУ «КПІ». 2008. – 224 с.
2. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники, Т2. Учебник. - Л.: Энергоиздат, 1981. - 536 с.
3. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей: Учебник. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 528 с.