

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9
ДОСЛІДЖЕННЯ КОТУШКИ ІНДУКТИВНОСТІ З
МАГНІТОПРОВОДОМ

Мета роботи – дослідити котушку індуктивності з магнітопроводом, що має повітряний зазор; дослідити вплив магнітопроводу на властивості котушки в колах постійного та змінного струмів; експериментально визначити параметри котушки.

9.1. Основні теоретичні відомості

Котушка індуктивності є основним елементом різних електричних машин та апаратів, пристроїв електроавтоматики, промислової електроніки, обчислювальної техніки та ін.

Якщо по витках W котушки йде електричний струм i , то в оточуючому середовищі утворюється магнітне поле (рис.9.1), яке

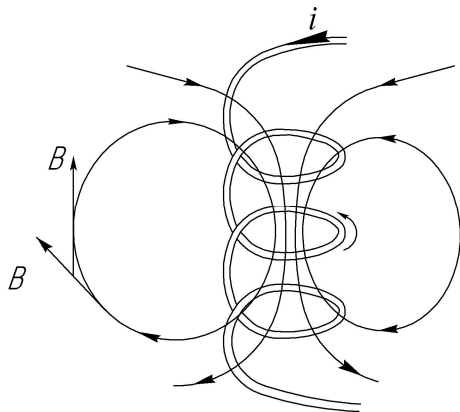


Рис.9.1

характеризується векторами магнітної індукції \vec{B} та напруженістю магнітного поля \vec{H} , магнітним потоком $\Phi = \int_S B ds$ (потік вектора магнітної індукції скрізь деяку поверхню S) та потокозчепленням $\psi = W\Phi$. Добуток кількості витків котушки на струм, що йде котушкою, називається магніторушійною силою $F = Wi$.

Залежність B (Φ або ψ) від струму i за відсутності феромагнітного середовища є лінійною і котушку за цих умов характеризують

параметром, що називається індуктивністю L . Індуктивність представляє собою коефіцієнт пропорційності між потокозчепленням та струмом котушки $\psi = Li$. Слід нагадати, що магнітна індукція B та напруженість магнітного поля H пов'язані співвідношенням $B = \mu_0 H$, де μ_0 - магнітна проникність повітря.

За наявності феромагнітного осердя (магнітопроводу) магнітний потік, що утворюється котушкою, за тих самих умов, значно зростає, оскільки в цьому випадку він утворюється струмом котушки та елементарними струмами феромагнітної речовини. З урахуванням цього, магнітна індукція котушки $B = \mu\mu_0 H \gg \mu_0 H$, де μ - магнітна проникливість феромагнітного осердя значно перевищує магнітну проникливість повітря. Тому в котушках індуктивності застосовують феромагнітні осердя для створення заданого магнітного потоку за меншої намагнічуваної сили і, відповідно, меншого струму.

Застосування осердя дозволяє не тільки багатократно підсилити магнітне поле котушки, але й надати їй нові властивості. Однією з них є та, що котушка стає нелінійним елементом, оскільки крива намагнічування феромагнітного осердя $B = f(H)$ (рис.9.2) має нелінійний характер. Якщо котушка живиться змінним струмом, то внаслідок змінного магнітного потоку феромагнітне осердя циклічно перемагнічується за петлею гістерезису з частотою струму. На циклічне перемагнічування осердя витрачається потужність, що виділяється в ньому у вигляді теплоти. Ці втрати потужності, що називаються втратами на гістерезис, пропорційні площі петлі гістерезису (рис.9.2) і розраховуються за формулою

$$P_{\Gamma} = K_1 f B_m^n G,$$

де K_1 - коефіцієнт, значення якого залежить від матеріалу феромагнітного осердя;

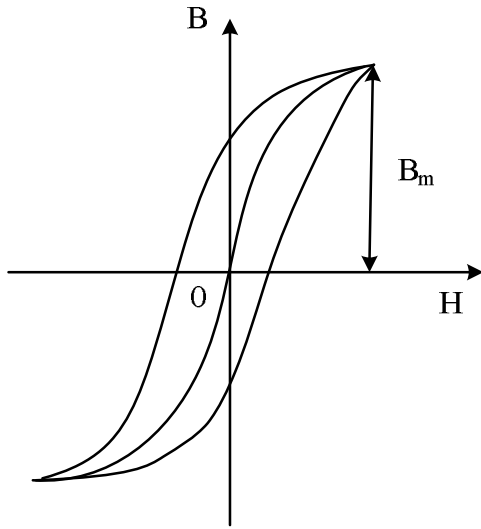


Рис.9.2

f - частота струму;
 B_m - амплітуда магнітної індукції;
 n - показник ступеню ($n=1.6$ коли $B_m < 1$ Тл та $n=2$, коли $B_m > 1$ Тл);
 G - маса осердя.

Змінний магнітний потік наводить в осерді вихрові струми, які також призводять до втрати потужності, що

розраховується по формулі:

$$P_B = K_2 f^2 B_m^2 \gamma G,$$

де K_2 - коефіцієнт, значення якого залежить від матеріалу та конструкції феромагнітного осердя; γ - питома провідність матеріалу осердя. Наявність втрат потужності на гістерезис та вихрові струми, які разом називають втратами в сталі ($P_C = P_G + P_B$), - особливість котушки з феромагнітним осердям в колах змінного струму. Для зменшення втрат потужності на гістерезис осердя котушки виготовляють з феромагнітних матеріалів, які мають вузьку петлю гістерезису. Зменшення втрат потужності на вихрові струми досягається шляхом застосування для осердя матеріалів з великим питомим опором. В цьому випадку магнітопровід збирають з окремих ізольованих один від одного листів електротехнічної сталі, що призводить до зменшення наведених в кожній пластині вихрових струмів і, відповідно, до зменшення втрат потужності.

Втрати потужності в активному опорі R провідників котушки називають втратами в міді P_M , оскільки котушки виготовляють переважно з мідного проводу.

Проаналізуємо електромагнітні процеси у котушці при підключенні її до джерела синусоїдної напруги (рис. 9.3).

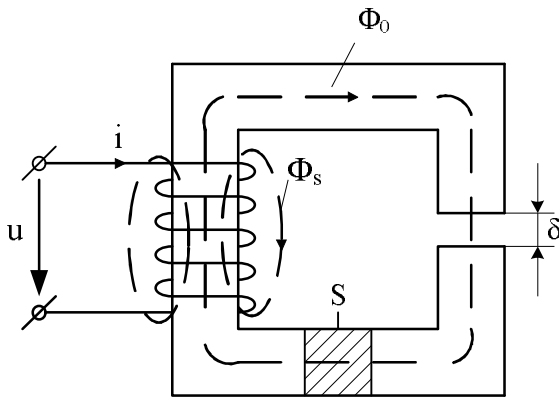


Рис.9.3

Синусоїдна напруга u створює у котушці змінний струм i , що призводить до появи змінної магніторушійної сили (МРС) $F = Wi$, яка у свою чергу, збуджує магнітний потік Φ . Більша частина потоку Φ замикається по феромагнітному осердю, оскільки його магнітна проникність $\mu = (10^4 - 10^5)\mu_0$. Цю частину магнітного потоку називають основним або робочим потоком та позначають Φ_0 . Менша частина потоку Φ (приблизно 3-5%) замикається навколо витків котушки по повітря і називається магнітним потоком розсіювання Φ_σ . Зчіплюючись з витками котушки, магнітні потоки Φ_0 та Φ_σ утворюють відповідно робоче потокозчеплення $\psi_0 = W\Phi_0$ та потокозчеплення розсіювання $\psi_\sigma = W\Phi_\sigma$.

Згідно з законом електромагнітної індукції магнітні потоки Φ_0 та Φ_σ індукують у котушці ЕРС самоіндукції:

$$e_0 = -\frac{d\psi_0}{dt} \quad \text{та} \quad e_\sigma = -\frac{d\psi_\sigma}{dt}.$$

Дію ψ_0 та ψ_σ розглядають окремо по такій причині.

Потокозчеплення $\psi_0 = W\Phi_0$ нелінійно зв'язано зі струмом i , тому $L_0 = -\frac{d\psi_0}{di} \neq const$. Потокозчеплення $\psi_\sigma = W\Phi_\sigma$ пропорційне струму $\psi_\sigma = L_\sigma i$, оскільки магнітний опір повітря, по якому замикаються лінії Φ_σ , можна вважати незмінним, і відповідно $L_\sigma = const$.

За другим законом Кірхгофа рівняння електричної рівноваги для котушки з феромагнітним осердям записується таким чином

$$u = -e_0 + Ri + L_\sigma \frac{di}{dt}. \quad (9.1)$$

Властивість котушки з феромагнітним осердям, як нелінійного елемента, проявляється в тому, що прикладена до котушки синусоїдна напруга викликає несинусоїдний струм. З метою спрощення розрахунків та уявлення про фізичні процеси в котушці, дійсний несинусоїдальний струм замінюють еквівалентним синусоїдальним. Це дозволяє записати рівняння електричної рівноваги в комплексній формі, побудувати векторну діаграму, скласти схему заміщення котушки та визначити її еквівалентні параметри.

Запишемо рівняння електричної рівноваги котушки з феромагнітним осердям (9.1) в комплексній формі:

$$\dot{U} = -\dot{E}_0 + \dot{I}(R + jX_\sigma). \quad (9.2)$$

Векторну діаграму, що відповідає рівнянню (9.2) показано на рис.9.4, а еквівалентну схему заміщення – на рис.9.5.

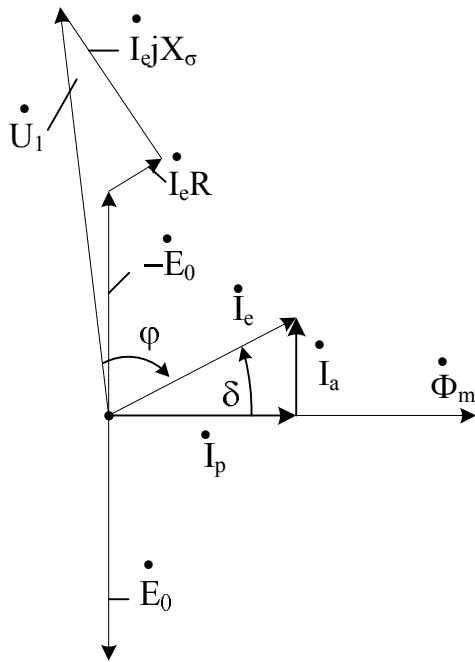


Рис.9.4

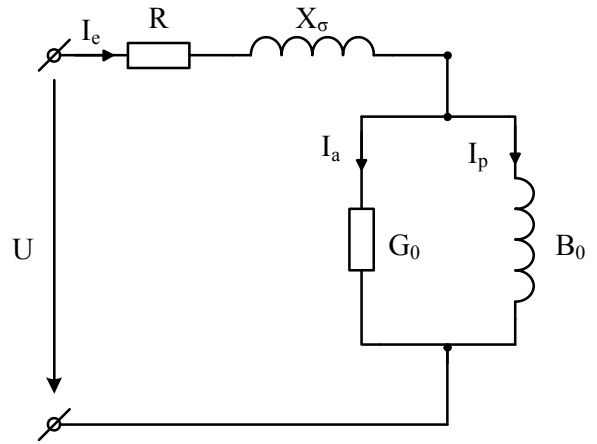


Рис.9.5

На малюнках: R - активний опір, яким враховують втрати потужності в провідниках (втрати в міді); $X_{\sigma} = \omega L_{\sigma}$ - індуктивний опір, яким враховують потік розсіювання; G_0 - активна провідність, що враховує втрати потужності на гістерезис та вихрові струми; B_0 - реактивна провідність, що враховує основний магнітний потік.

На векторній діаграмі кут δ – кут між вектором струму I_e та вектором основного магнітного потоку Φ_m , який називають кутом магнітних втрат або кутом магнітного запізнення.

Для визначення параметрів схеми заміщення реальної котушки її підключають до джерела синусоїдної напруги (рис.9.6).

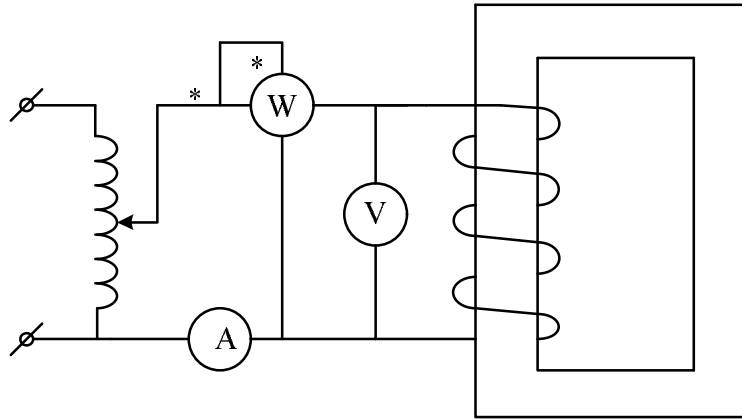


Рис.9.6

Використовуючи покази приладів, за відомими формулами розраховують:

$$Z_e = \frac{U}{I}, \quad R_e = Z_e \cos \varphi_e, \quad X_e = Z_e \sin \varphi_e$$

$$\varphi_e = \arccos \frac{P}{UI}. \quad (9.3)$$

Активний опір R_e враховує сумарні втрати у котушці — втрати в обмотці R та в осерді R_0 :

$$R_e = R + R_0.$$

Для визначення активного опору обмотки R , коло (рис. 9.6) під'єднують до джерела постійної напруги. При цьому магнітний потік у осерді $\Phi_0 = const$, відповідно $e_0 = -\frac{d\Phi_0}{dt} = 0$ і вихрові струми в осерді не наводяться. Втрати на гістерезис також дорівнюють нулю, бо осердя не перемагнічується. За показами вольтметра та амперметра у колі постійного струму визначають активний опір обмотки $R = \frac{U}{I}$, після чого можна

обчислити значення R_0 , яким враховують втрати потужності в осерді
 $R_0 = R_e - R$.

Індуктивним опором X_e враховують опір основному магнітному потоку X_0 і опір потоку розсіювання X_σ , тобто $X_e = X_0 + X_\sigma$. Розділити X_e на X_0 і X_σ дуже важко. На практиці для спрощення розрахунків використовують співвідношення $\frac{X_\sigma}{R} = k$, де $k = 1, 2, \dots, 10$. Менші значення k відносять до котушок малої потужності, більші — до потужних. Обравши значення k , отримують значення індуктивного опору розсіювання $X_\sigma = kR$. Тоді

$$X_0 = X_e - X_\sigma = X_e - kR.$$

Параметри контуру намагнічування паралельної схеми заміщення котушки (рис. 9.5) знаходять за відомими формулами:

$$G_0 = \frac{R_0}{R_0^2 + X_0^2}; \quad B_0 = \frac{X_0}{R_0^2 + X_0^2}.$$

Слід відзначити, що параметри еквівалентної схеми заміщення залежать не тільки від даних обмотки котушки та властивостей осердя, але й від частоти напруги.

Як елемент електричного кола котушка з феромагнітним осердем має нелінійну вольт-амперну характеристику $U = f(I)$, яка за формою повторює криву намагнічування $B = f(H)$. Це пояснюється наступним. В рівнянні (9.2) діюче значення ЕРС $E_0 = 4.44 f W S B_m$ (f - частота прикладеної напруги, W - кількість витків, S - площа поперечного перерізу осердя, B_m - амплітудне значення магнітної індукції), а складові $R I_e$ та $X_\sigma I_e$ відносно невеликі, тому діюче значення прикладеної напруги

$$U = E_0 = 4.44 f W S B_m, \text{ тобто } U \sim B.$$

Діюче значення струму в котушці, визначається на підставі закону повного струму

$$I = \frac{Hl}{W} \sim H,$$

де H - напруженість магнітного поля осердя, l - довжина середньої лінії осердя.

В даній лабораторній роботі досліджуються характер вольт-амперної характеристики котушки з феромагнітним осердям, повітряний зазор якого регулюється, а також залежності повного, активного та реактивного опорів від величини прикладеної напруги. Такі котушки використовуються в колах змінного струму в якості елементів, опір яких регулюється. Повний опір котушки залежить від реактивного, який в свою чергу залежить від

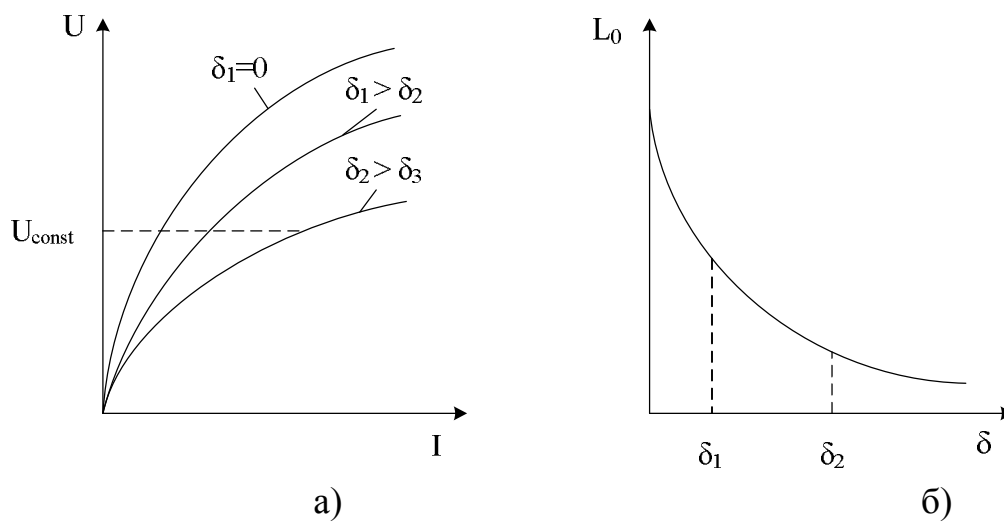


Рис.9.7

величини повітряного зазору. На рис.9.7,а подано сімейство вольт-амперних характеристик котушки в залежності від величини повітряного зазору.

Якщо прикладена напруга незмінна $U = const$, то магнітний потік також повинен бути незмінним за рахунок зміни магніторушійної сили або струму в котушці ($F = IW, W = const$). Збільшення повітряного зазору призводить до зменшення повного опору котушки (вольт-амперна характеристик зміщується вправо) внаслідок зменшення її реактивного опору в результаті зменшення індуктивності L_0 , що обумовлено основним магнітним потоком Φ_0 ($\psi_0 = \Phi_0 W = L_0 i$, див. рис.9.7,б).

9.2. Порядок виконання роботи

1. Виконати зовнішній огляд котушки, ознайомитися з конструкцією магнітопровода. Записати технічні дані котушки.

2. Ознайомитись з апаратурою і вимірювальними приладами. Установити їхню відповідність виконуваній роботі і записати паспортні дані в табл. 9.1.

Таблиця 9.1

№ з/п	Найменування приладів і апаратів, інвентарний номер	Позначення на схемі	Вимірювальний механізм або тип	Клас точності	Межа вимірювання або номінальні параметри	Ціна поділки	Примітка
1							
2							
3							
4							
5							
6							

3. Зібрати електричне коло для дослідження котушки з феромагнітним осердям у відповідності до монтажної схеми (рис. 9.8). Регульовані джерела постійної та змінної напруги (0...220 В) встановити в

нульове положення, повернувши відповідну ручку проти годинникової стрілки в крайнє положення.

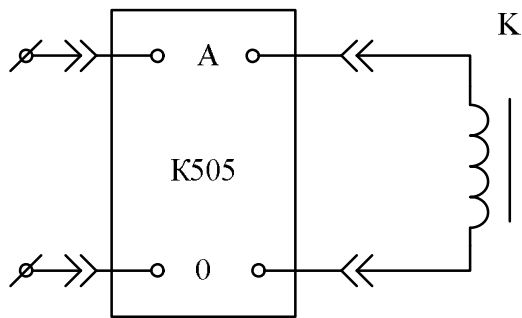


Рис.9.8

4. Котушку індуктивності підключити до регульованого джерела постійної напруги та зняти вольт-амперні характеристики котушки для трьох значень повітряного зазору феромагнітного осердя. Напругу змінювати від нуля до такого значення, коли струм в

котушці буде номінальним з таким розрахунком, щоб отримати шість вимірів. Результати записати в таблицю 9.2.

Перед встановленням повітряного зазору необхідно розмагнічувати феромагнітне осердя. Для цього котушку слід підключити до регульованого джерела синусоїдної напруги, значення якого плавно змінювати від нуля до номінального декілька разів.

Таблиця 9.2

№ з/п	Повітряний зазор, мм	Вимірювані величини	Номери вимірів					
			1	2	3	4	5	6
1	0	U, В						
		I, А						
2		U, В						
		I, А						
3		U, В						
		I, А						

5. Котушку індуктивності підключити до регульованого джерела синусоїдної напруги та зняти вольт-амперні характеристики котушки для трьох значень повітряного зазору феромагнітного осердя . Напругу змінювати від нуля до такого значення, коли струм в котушці буде номінальним з таким розрахунком, щоб отримати шість вимірів. Результати записати в таблицю 9.3.

Таблиця 9.3

№ з/п	Повітряний зазор, мм	Величини для вимірів та обчислень	Номери вимірів					
			1	2	3	4	5	6
1	0	U, В						
		I, А						
		P, Вт						
		Z, Ом						
		R, Ом						
		X, Ом						
2		U, В						
		I, А						
		P, Вт						
		Z, Ом						
		R, Ом						
		X, Ом						
3		U, В						
		I, А						
		P, Вт						
		Z, Ом						
		R, Ом						
		X, Ом						

6. Включити в коло котушки додатковий резистор R_d (рис.9.9) і отримати на екрані осцилографа зображення струму котушки. Замалювати осцилограми струму котушки без зазору в магнітопроводі для трьох значень напруги на її затискачах: $U < U_{ном}$, $U = U_{ном}$, $U > U_{ном}$.

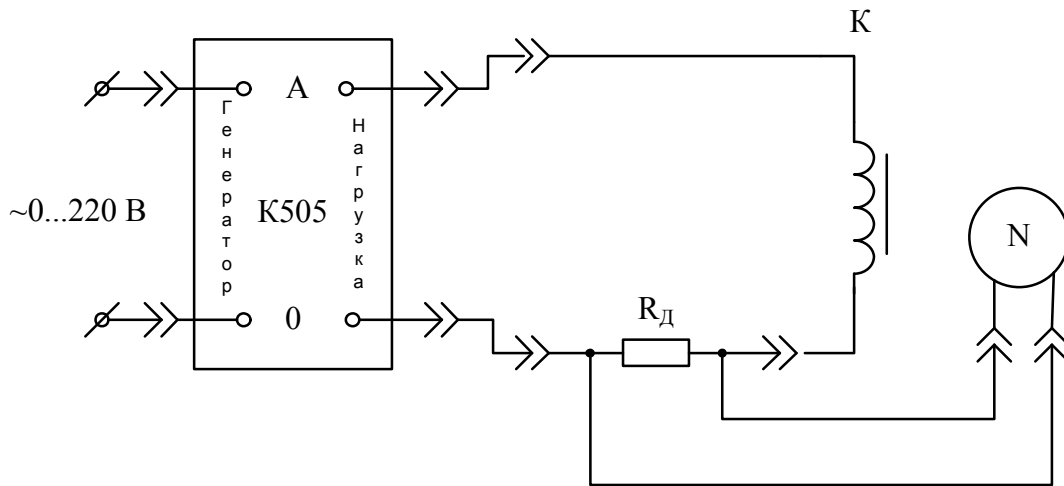


Рис.9.9

7. За результатами вимірювань пп. 4 та 5 побудувати вольт-амперні характеристики $U = f(I)$ котушки при різних повітряних зазорах в магнітопроводі.

8. За результатами розрахунків табл. 9.3 побудувати графіки залежностей $Z = f(U)$, $r = f(U)$, $X = f(U)$ в одній системі координат та $Z = f(\delta)$, $r = f(\delta)$, $X = f(\delta)$, $I = f(\delta)$ в іншій системі координат.

9. Зобразити еквівалентну схему заміщення котушки та по заданим викладачем значенням повітряного зазору в осерді та напруги за затискачах розрахувати її параметри.

10. Записати основні висновки за результатами роботи.

9.3.Контрольні запитання

1. Призначення феромагнітного осердя у котушках індуктивності.
2. Пояснити структуру втрат потужності котушки з магнітопроводом при приєднанні її до джерела постійного та змінного струму.

3. Поясніть причину викривлення синусоїдної форми струму при приєднанні до джерела синусоїдної напруги котушки з магнітопроводом.
4. Запишіть рівняння електричної рівноваги та побудуйте векторну діаграму котушки з магнітопроводом.
5. Зобразіть по пам'яті еквівалентну схему заміщення котушки з магнітопроводом та поясніть фізичний зміст її параметрів.
6. Як зменшити втрати активної потужності у котушці з магнітопроводом?
7. Поясніть характер залежностей повного, активного та реактивного опорів від прикладеної напруги та величини повітряного зазору в магнітопроводі.
8. Приведіть формули для визначення параметрів еквівалентної схеми заміщення котушки з магнітопроводом.