

УДК 620.179.1

ВИЗНАЧЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ МАГНІТНОЇ ПРОНИКНОСТІ ЗА КОМПЛЕКСНИМ ОПОРОМ КОТУШКИ ІНДУКТИВНОСТІ ІЗ ФЕРОМАГНІТНИМ ОСЕРДЯМ

В. Мартинов, Д. Трушаков

*Кіровоградський національний технічний університет
пр. Університетський, 8, 25006, Кіровоград, Україна
Dmitriy-kntu@yandex.ru*

Наведено методику визначення комплексної магнітної проникності феромагнітного матеріалу за результатами вимірювання комплексного опору котушки індуктивності із феромагнітним осердям. Комплексний опір котушки вимірювали за допомогою вимірювача імітанса E7-25.

Ключові слова: комплексна магнітна проникність, тороїдальний та П-подібний магнітопроводи, контрольований феромагнітний зразок, активний та реактивний опори.

Накладний параметричний вихрострумивий перетворювач з П-подібним осердям (ВСП) традиційно застосовують у процесі вихрострумової дефектоскопії виробів із властивостями анізотропії. Цей перетворювач є котушкою індуктивності з феромагнітним осердям П-подібної форми, на яке намотана обмотка з кількістю витків w . Для визначення внесених контрольованою областю активного і реактивного опорів необхідно знати комплексну магнітну проникність.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженню взаємодії ВСП із феромагнітним середовищем присвячено низку праць [1, 2].

Метою досліджень є розробка методики визначення комплексної магнітної проникності (КМП) феромагнітного матеріалу за результатами вимірювань активного та реактивного опорів котушки індуктивності з тороїдальним осердям, що показана на рис. 1.

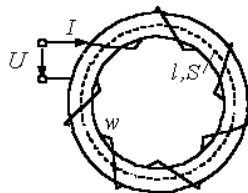


Рис. 1. Котушка індуктивності з тороїдальним осердям.

Математична модель фізичних процесів, що відбуваються у феромагнітному осерді. Магнітний потік, який виникає у феромагнітному осерді котушки (див. рис. 1) визначено зі співвідношення [3]

$$U = 4,44 f w \Phi_m, \quad (1)$$

де U – діюче значення напруги, яку підводять до обмотки; f – робоча частота; Φ_m – амплітудне значення робочого магнітного потоку; w – кількість витків обмотки.

Амплітуда робочого магнітного потоку

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44 f w}. \quad (2)$$

Комплексну потужність, яка поглинається в осерді котушки, виражаємо через магнітні втрати $P_{ФЕР}$:

$$S = P_{ФЕР} + j P_{ФЕР} / \operatorname{tg} \delta. \quad (3)$$

Якщо петлю гістерезису замінити еліпсом тієї ж самої площі, то втрати в матеріалі осердя, згідно з [4]

$$P_{ФЕР} = \omega \mu_r \mu_0 H^2 V \sin \delta, \quad (4)$$

де H – напруженість магнітного поля; μ_r – відносна магнітна проникність матеріалу; μ_0 – стала ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma\text{Н}}{\text{М}}$); $V = Sl$ – об'єм осердя;

l – довжина середньої магнітної лінії осердя; δ – кут магнітних втрат матеріалу осердя.

Як відомо, напруженість магнітного поля [3]

$$H = \frac{B}{\mu_r \mu_0} = \frac{\Phi}{\mu_r \mu_0 S}, \quad (5)$$

де B – магнітна індукція в осерді; S – площа поперечного перерізу осердя.

Підставимо вираз (5) в (4), одержимо

$$P_{ФЕР} = \frac{\omega V \Phi^2 \sin \delta}{\mu_r \mu_0 S^2}. \quad (6)$$

Після підстановки виразу (6) в (3), матимемо

$$S = \frac{\omega V \Phi^2 \sin \delta}{\mu_r \mu_0 S^2} + \frac{j \omega V \Phi^2 \cos \delta}{\mu_r \mu_0 S^2}, \quad (7)$$

або

$$S = \frac{\omega V \Phi^2}{\mu_r \mu_0 S^2} (\sin \delta + j \cos \delta). \quad (8)$$

З іншого боку, комплексна потужність визначена через напругу U і опір феромагнітного осердя таким співвідношенням [3]:

$$\underline{S} = \frac{U^2}{\underline{Z}}, \quad (9)$$

де \underline{Z} – спряжений комплексний опір котушки.

Із виразу (10) отримаємо

$$\underline{Z}^* = \frac{U^2}{S}, \quad (10)$$

Підставимо в (10) вираз (8), одержимо

$$\underline{Z}^* = \frac{\mu_r \mu_0 S^2 U^2}{\omega V \Phi^2 (\sin \delta + j \cos \delta)}. \quad (11)$$

Комплексний опір котушки

$$\underline{Z} = \frac{\mu_r \mu_0 S^2 U^2 (\sin \delta + j \cos \delta)}{\omega V \Phi^2}. \quad (12)$$

Виділимо в виразі (12) дійсну й уявну частини, одержимо співвідношення для визначення активного і реактивного опорів котушки:

$$R = \frac{\mu_r \mu_0 S^2 U^2 \sin \delta}{\omega V \Phi^2}, \quad (13)$$

$$X = \frac{\mu_r \mu_0 S^2 U^2 \cos \delta}{\omega V \Phi^2}. \quad (14)$$

Підставимо в (14) і (15) вираз для $U = 6,28 f \omega \Phi = \omega \omega \Phi$, а також $V = Sl$, отримаємо вирази для активного R і реактивного X опорів котушки:

$$R = \frac{\mu_r \mu_0 S \omega w^2 \sin \delta}{l}, \quad (15)$$

$$X = \frac{\mu_r \mu_0 S \omega w^2 \cos \delta}{l}. \quad (16)$$

Як відомо, КМП феромагнітного матеріалу [4]

$$\tilde{\mu}_r = \mu_1 - j\mu_2 = \mu_r e^{-j\delta} = \mu_r \cos \delta - j\mu_r \sin \delta. \quad (17)$$

Із виразів (15), (16) через активний і реактивний опори котушки визначимо складові КМП:

$$\mu_1 = \mu_r \cos \delta = \frac{Xl}{\mu_0 S \omega w^2}, \quad (18)$$

$$\mu_2 = \mu_r \sin \delta = \frac{Rl}{\mu_0 S \omega w^2}. \quad (19)$$

Експериментальні дослідження. Вимірювання активного і реактивного опорів виконували за допомогою приладу – вимірювача імітанса Е7-25, блок-схема якого показана на рис. 2 [5].

Вимірювальна частина приладу Е7-25 складається з об'єкта вимірювання Z_x , підсилювача DA1, міри активного опору R_0 і диференціальних підсилювачів DA2, DA3. Підсилювач DA1 підтримує на інвертувальному вході напругу, близьку до нуля (віртуальний нуль).

Під дією напруги генератора через об'єкт вимірювання й опір внутрішньої міри R_0 проходить один і той же струм, створюючи на цих опорах, відповідно, дві напруги U_x і U_0 . Відповідно до закону Ома, відношення цих напруг дорівнюватиме відношенню опорів [5]:

$$Z_X = R_0 \frac{U_X}{U_0}. \quad (20)$$

Напруги U_X і U_0 вимірюють апаратно-програмним векторним вольтметром. Апаратна частина векторного вольтметра складається з комутатора (К), масштабованого підсилювача (МП) й аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Результати вимірювань АЦП надходять у мікроконтролер, який, відповідно до формули (20), обчислює їх. Вони видаються на матричний індикатор, на який також виводиться інформація про розмірність результату вимірювань, робочу частоту тощо.

Оператор керує процесом вимірювань за допомогою клавіатури.

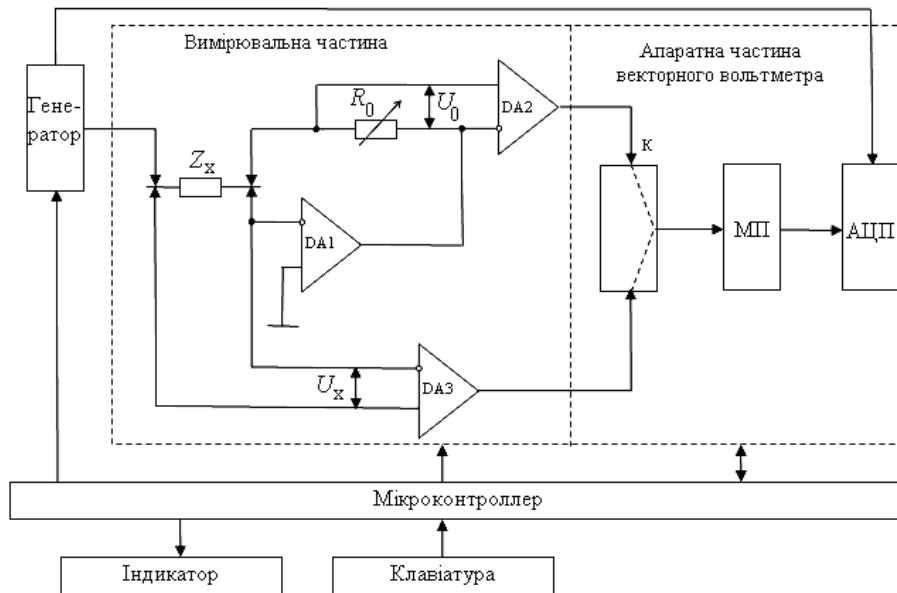


Рис. 2. Блок-схема вимірювача імпедансу E7-25.

Прилад E7-25 вимірює параметри комплексного опору на восьми десяткових межах вимірювань Z (рис. 3). Для переходу з однієї межі вимірювань на іншу змінюють опір внутрішньої міри R_0 у колі зворотного зв'язку DA1 і підсилення масштабованого підсилювача.

На межах вимірювання Z 1, 10, 100 Ом вимірюють у режимі заданого струму, на межах Z 1, 10, 100 кОм, 1 МОм у режимі заданої напруги.

За допомогою інтерфейсу USB 2.0 дані можна передавати від приладу до комп'ютера, а також можна запровадити дистанційне програмування всіх вимірювальних функцій приладу. З'єднання приладу з комп'ютером відбувається за допомогою інтерфейсного кабелю з комплекту приладу.

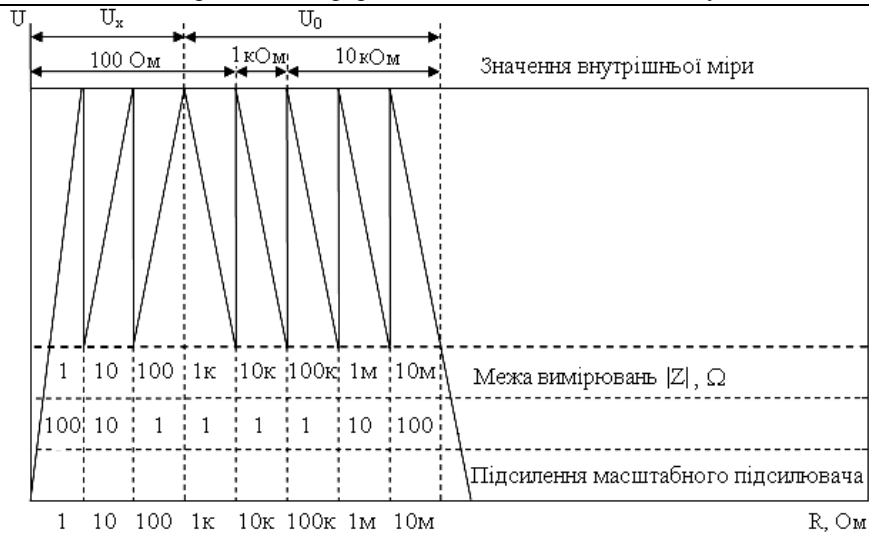


Рис. 3. Межі вимірювання модуля $|Z|$.

Комплексний опір вимірювали для котушки індуктивності з прямокутним (П-подібним) осердям (рис. 4).

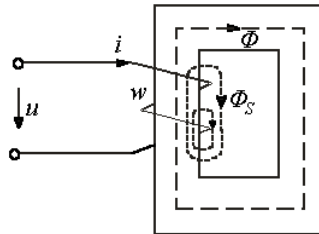


Рис. 4. Котушка індуктивності з прямокутним осердям.

За результатами вимірювань визначали складові КМП μ_1 і μ_2 , значення яких наведені в табл. 1.

Таблиця 1

f , Гц	100	200	500	10^3	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	10^4	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	10^5	$2 \cdot 10^5$
μ_1	1482	1353	1224	954	718	445	282	207	141	112	98
μ_2	475	371	464	451	447	324	165	126	88	69	65

Правильність розрахунку можна перевірити, обчислюючи кут магнітних втрат

$\delta = \operatorname{arctg} \frac{\mu_2}{\mu_1}$ і порівнюючи одержаний результат з $\delta_1 = (\pi / 2 - \varphi)$, де φ – кут, визначений за показами приладу. Результати перевірки наведені в табл. 2 (кути виражені в градусах).

Таблиця 2

$f, \text{Гц}$	100	200	500	10^3	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	10^4	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	10^5	$2 \cdot 10^5$
φ	72,2	74,7	69,3	64,7	58,1	53,9	59,7	58,8	58,2	58,4	56,6
δ_1	17,8	15,3	20,7	25,3	31,9	36,1	30,3	31,2	31,8	31,6	33,4
δ	17,8	15,3	20,8	25,3	31,9	36,1	30,3	31,2	31,8	31,6	31,4

Для поліпшення результатів необхідно врахувати параметри обмотки. Для цього треба мати дві однакові котушки з однаковими за розмірами осердями: одне осердя з феромагнітного матеріалу, а інше – картонне.

Отже, одержано формули для обчислення активного і реактивного опорів котушки з феромагнітним осердям, які за вимірними опорами дають змогу визначати складові комплексної магнітної проникності.

1. *Мартинов В.В., Трушаков Д.В.* Спрощена модель для інженерного розрахунку внесених активного та реактивного опорів при взаємодії вихрострумowego перетворювача з контрольованим феромагнітним зразком // Вісн. нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2009. – № 654. – С. 157–162.
2. *Мартинов В., Трушаков Д.* Моделювання фізичних процесів у вихрострумowego перетворювачі при його взаємодії з контрольованим феромагнітним зразком // Теоретична електротехніка. – 2006. – Вип. 59. – С. 97–102.
3. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники. М.: Высш. шк., 1973. – 750 с.
4. *Поливанов К.М.* Ферромагнетики. М.: Гос. энергетическое изд-во, 1957. – 256 с.
5. Измеритель имитанса Е7-25. Руководство по эксплуатации УШЯИ.411218.015РЭ. Минск, ОАО “МНИПИ”.

**DETERMINATION THE PARAMETER OF EDDY-CURRENT TRANSFORMER
WHICH INTERACTING WITH FERROMAGNETIC MATERIAL**

V. Martinov, D. Trushakov

*Kirovograd National Technical University
University Str., 8, 25006 Kirovograd, Ukraine
Dmitriy-kntu@yandex.ru*

The work contains the results of theoretical research of interaction between a laying-in U-type core eddy-current transformer (ECT) and tested ferromagnetic material. There has been developed a mathematical simplified model and received equations for engineering calculation of introduced real resistance and reactance which can used for development eddy-current defectoscopes.

Key words: eddy-current transformer, U-type core, testing ferromagnetic material, real resistance and reactance.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ
ПО КОМПЛЕКСНОМУ СОПРОТИВЛЕНИЮ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ
С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ**

В. Мартынов, Д. Трушаков

*Кировоградский национальный технический университет
просп. Университетский, 8, 25006, Кировоград, Украина
Dmitriy-kntu@yandex.ru*

Приведено методику определения комплексной магнитной проницаемости ферромагнитного материала по результатам измерения комплексного сопротивления катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником. Комплексное сопротивление катушки измеряли с помощью измерителя иммитанса E7-25.

Ключевые слова: комплексная магнитная проницаемость, тороидальный и П-образный магнитопроводы, контролируемый ферромагнитный образец, активное и реактивное сопротивления.

Стаття надійшла до редколегії 12.01.2011
Прийнята до друку 22.02.2011