

УДК620.179.1

## ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПЛЕКСНОЇ МАГНІТНОЇ ПРОНИКНОСТІ ЗА КОМПЛЕКСНИМ ОПОРОМ НАВОЮ ІНДУКТИВНОСТІ ІЗ ФЕРОМАГНІТНИМ ОСЕРДЯМ

Д. Трушаков<sup>1</sup>, С. Рендзіняк<sup>2</sup>, І. Васильчишин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кіровоградський національний технічний університет,  
пр. Університетський, 8, Кіровоград, 25030 Україна  
[Dmitriy-kntu@yandex.ru](mailto:Dmitriy-kntu@yandex.ru)

<sup>2</sup>Інститут енергетики та систем керування, Національний університет «Львівська  
політехніка», вул. С. Бандери 12, Львів, Україна  
[emd@polynet.lviv.ua](mailto:emd@polynet.lviv.ua)

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 Е7-25.

*Ключові слова:* навії індуктивності з феромагнітним осердям, комплексний імпеданс, магнітна проникність.

Накладний параметричний вихрострумний перетворювач з П-подібним осердям (ВСП) традиційно застосовують у процесі вихрострумової дефектоскопії виробів із властивостями анізотропії. Цей перетворювач є навоєм індуктивності з феромагнітним осердям П-подібної форми з кількістю витків  $w$ . Для визначення внесених контрольованою областю активного і реактивного опорів необхідно знати комплексну магнітну проникність. Дослідженню взаємодії ВСП із феромагнітним середовищем присвячено низку праць [1–3].

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

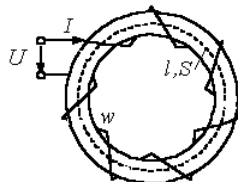


Рис.1. Котушка індуктивності з тороїдальним осердям.

Магнітний потік, який виникає у феромагнітному осерді котушки (див. рис. 1), визначаємо зі співвідношення [3]

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

де  $U$  – діюче значення напруги, яку підводять до обмотки;  $f$  – робоча частота;  $\Phi_m$  – 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, визначимо через магнітні втрати  $P_{fer}$

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

Якщо петлю гістерезису замінити еліпсом тієї ж самої площі, то втрати в матеріалі осердя, як у праці [4],

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

де  $H$  – напруженість магнітного поля;  $\mu_r$  – відносна магнітна проникність матеріалу;  $\mu_0$  – стала величина;  $V = Sl$  – об'єм осердя;  $l$  – довжина середньої магнітної лінії осердя;  $\delta$  – кут магнітних втрат матеріалу осердя.

Відомий вираз напруженості магнітного поля

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

де  $B$  – магнітна індукція в осерді;  $S$  – площа поперечного перерізу осердя, підставимо в (4), тоді

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

Комплексна потужність (3) з отриманим виразом (6) набуває вигляду

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

або

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

З іншого боку,

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

де  $\underline{Z}^*$  – спряжений комплексний опір навою. Звідси

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

Якщо підставити в (10) вираз (8), отримаємо

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

де дійсна й уявна частини визначають активний і реактивний опір навою. Підставимо у вираз (11) діюче значення напруги  $U = 6,28 f \omega \Phi = \omega \Phi$  і  $V = S l$ , одержимо вирази для активного  $R$  і реактивного  $X$  опорів навою

$$R = \frac{\mu_r \mu_0 S \omega w^2 \sin \delta}{l}, \quad X = \frac{\mu_r \mu_0 S \omega w^2 \cos \delta}{l}. \quad (12)$$

Як відомо, комплексну магнітну проникність феромагнітного матеріалу [4] визначають як

$$\tilde{\mu}_r = \mu_1 - j \mu_2 = \mu_r e^{-j\delta} = \mu_r \cos \delta - j \mu_r \sin \delta, \quad (13)$$

де складові комплексної магнітної проникності визначимо з виразів (12) через активний і реактивний опори котушки. Отже,

$$\mu_1 = \mu_r \cos \delta = \frac{X l}{\mu_0 S \omega w^2}, \quad \mu_2 = \mu_r \sin \delta = \frac{R l}{\mu_0 S \omega w^2}. \quad (14)$$

Вимірювачі імітанса вважають найкращими приладами для вимірювання параметрів активного опору, ємності, індуктивності, комплексного опору, комплексної провідності та добротності. Ми під час експериментальних досліджень використовували вимірювач імітанса E7-25 [6]. Вимірювання виконували на частотах 100, 200, 500 Гц та 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 кГц.

Структурна схема вимірювача імітанса E7-25 показана на рис. 2.

Вимірювальна частина приладу E7-25 складається з об'єкта вимірювання  $Z_X$ , підсилювача DA1, міри активного опору  $R_0$  і диференціальних підсилювачів DA2, DA3. Підсилювач DA1 підтримує на своєму інвертувальному вході напругу, близьку до нуля (віртуальний нуль).

Під дією напруги генератора через об'єкт вимірювання і 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 [6]:

$$Z_X = R_0 \frac{U_X}{U_0}. \quad (15)$$

Вимірювання напруг  $U_X$  і  $U_0$  проводиться апаратно-програмним векторним вольтметром. Апаратна частина векторного вольтметра складається із комутатора (К), масштабного підсилювача (МУ) і аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

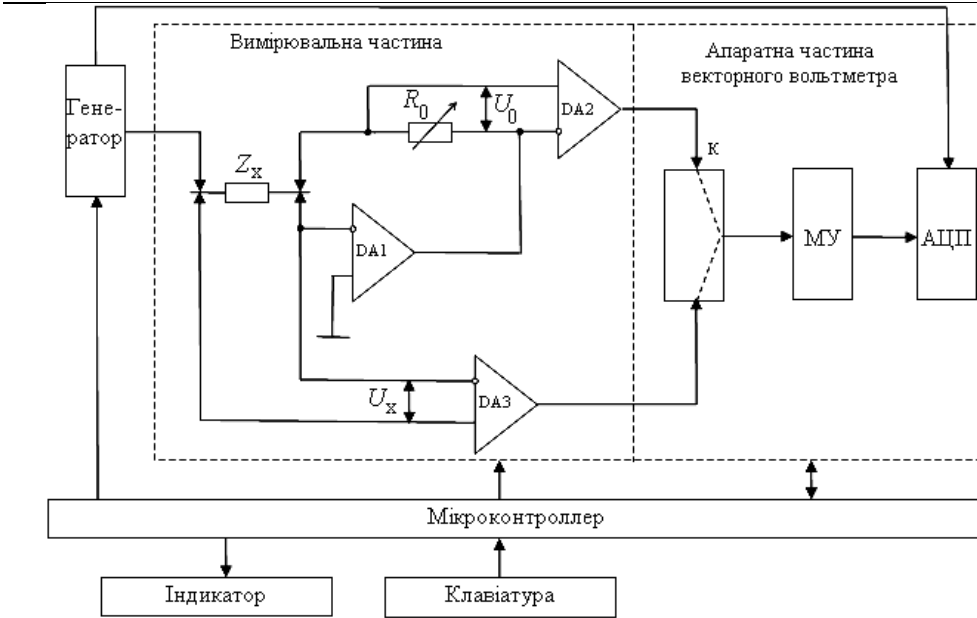


Рис.2. Блок-схема вимірювача імпеданса E7-25.

Результати вимірювань АЦП надходять у мікроконтролер, який, відповідно до формули (15), обчислює результати вимірювань. Результати вимірювань видаються на матричний індикатор, на який також виводиться інформація про розмірність результату вимірювань, робочу частоту тощо.

За допомогою інтерфейсу USB дані передавалися від приладу до комп'ютера, також відбувалось дистанційне програмування всіх вимірювальних функцій приладу.

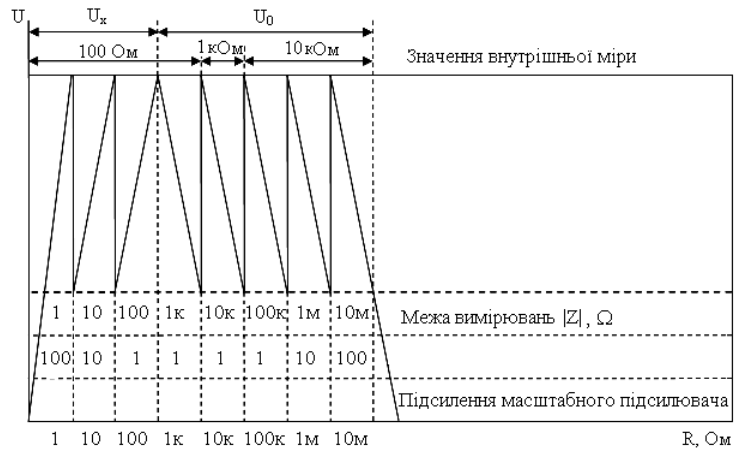


Рис. 3. Межі вимірювання модуля  $|Z|$ .

Прилад Е7-25 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 змінюють підсилення масштабного підсилювача.

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

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

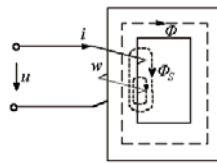


Рис. 4. Котушка індуктивності з прямокутним осердям.

За результатами вимірювань визначали складові комплексної магнітної проникності  $\mu_1$  і  $\mu_2$ , значення яких наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Складові комплексної магнітної проникності

$f, \text{Гц}$	100	200	500	$10^3$	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$
$\mu_1$	1482	1353	1224	954	718	445
$\mu_2$	475	371	464	451	447	324
$f, \text{Гц}$	$10^4$	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$10^5$	$2 \cdot 10^5$	–
$\mu_1$	282	207	141	112	98	–
$\mu_2$	165	126	88	69	65	–

Правильність розрахунку можна перевірити, обчислюючи тангенс кута магнітних втрат  $\delta = \arctg \frac{\mu_2}{\mu_1}$  і порівнюючи одержаний результат з  $\delta_1 = (\pi/2 - \phi)$ , де  $\phi$  – кут, визначений за показами приладу. Результати перевірки наведені в табл. 2 (значення кутів – у градусах).

Таблиця 2

Результати перевірки вимірювань складових комплексної магнітної проникності

$f, \text{Гц}$	100	200	500	$10^3$	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$
$\phi$	72,2	74,7	69,3	64,7	58,1	53,9
$\delta_1$	17,8	15,3	20,7	25,3	31,9	36,1
$\delta$	17,8	15,3	20,8	25,3	31,9	36,1
$f, \text{Гц}$	$10^4$	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$10^5$	$2 \cdot 10^5$	–
$\phi$	59,7	58,8	58,2	58,4	56,6	–
$\delta_1$	30,3	31,2	31,8	31,6	33,4	–
$\delta$	30,3	31,2	31,8	31,6	31,4	–

Для поліпшення точності отриманих результатів необхідно врахувати параметри обмотки, порівнявши два однакові навої з однаковими за розмірами осердями: одне осердя з феромагнітного матеріалу, а інше – картонне.

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

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Smirnov B. G.* Basic Equations of Physical Processes Arising in Eddy-Current Transformer with U-type Rod if Interacted with a Ferromagnetic Material / B. G. Smirnov, D. V. Trushakov // Proceedings of the XIII International Symposium on Theoretical Electrical Engineering. – Lviv : Lviv Polytechnic National University, 2005. – P. 299–303.
2. *Martinov V.* Simulation of Physical Processes in Eddy-Current Transformer During its Interection with the Tested Ferromagnetic specimen / Vitaliy V. Martinov, Dmitro V. Trushakov // Przegląd elektrotechniczny konferencje (VIII<sup>th</sup> International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering"). – Poland : Wilkasy. – 2007. – R. 5. – NR 2. – P. 208–210.
3. *Martinov V.* Modeling Interrelation of a Rod-type Eddy-Current Transformer with a Tested Ferromagnetic specimen / Vitaliy Martinov, Dmitro Trushakov // Przegląd elektrotechniczny. – 2009. – R. 85. – NR 4. – P. 100–103.
4. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М. : Высшая школа, 1973. – 559 с.
5. *Поливанов К. М.* Ферромагнетики / К. М. Поливанов. – М. : Государственное энергетическое изд-во, 1957. – 148 с.
6. Измеритель иммитанса Е7-25. Руководство по эксплуатации. – Республика Беларусь, Минск, ОАО «МНИПИ». – 38 с.

Стаття: надійшла до редакції 06.05.2014,  
доопрацьована 11.05.2014,  
прийнята до друку 14.05.2014.

**DETERMINING OF COMPLEX MAGNETIC PERMEABILITY  
OF THE FERROMAGNETIC MATERIAL BY COMPLEX IMPEDANCE  
OF INDUCTANCE COIL WITH FERROMAGNETIC CORE**

**D. Trushakov<sup>1</sup>, S. Rendzinyak<sup>2</sup>, I. Vasylchyshyn<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Kirovograd National Technical University,  
Prospect Universitetsky 8, Kirovograd, Ukraine*  
[Dmitriy-kntu@yandex.ru](mailto:Dmitriy-kntu@yandex.ru)

<sup>2</sup> *Institute for Energy and Control Systems, Lviv Polytechnic National University, Bandera  
street 12, Lviv Ukraine*  
[emd@polynet.lviv.ua](mailto:emd@polynet.lviv.ua)

In the work there has been presented the method of determining of complex magnetic permeability of ferromagnetic material by the results of measuring complex impedance of inductance coil with ferromagnetic core. The complex impedance of the inductance coil was measured with immitance measuring device "E7-25".

*Key words:* inductance coil with ferromagnetic core, complex impedance, magnetic permeability.

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

**Д. Трушаков<sup>1</sup>, С. Рендзіняк<sup>2</sup>, І. Васильчишин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Кировоградский национальный технический университет,  
пр. Университетский, 8, Кировоград, 25030 Украина*  
[Dmitriy-kntu@yandex.ru](mailto:Dmitriy-kntu@yandex.ru)

<sup>2</sup> *Институт энергетики и систем управления, Национальный университет «Львовская  
политехника», ул. С. Бандеры 12, Львов, Украина*  
[emd@polynet.lviv.ua](mailto:emd@polynet.lviv.ua)

Описано 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:* катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником, комплексный импеданс, магнитная проницаемость.