

УДК 620.179.14

## ІНВАРІАНТНИЙ ПАРАМЕТР ЕФЕКТИВНОСТІ ВИХРОСТРУМОВИХ ДАВАЧІВ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

В. М. УЧАНІН

*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів*

Запропоновано новий коефіцієнт для оцінювання ефективності вихрострумowego давача. Виявлено інваріантні властивості цього коефіцієнта. Зокрема показано, що він залежить тільки від співвідношення розмірів обмоток і не залежить від робочої частоти, розмірів і кількості витків вихрострумowych давачів. Коефіцієнт вихрострумової ефективності можна використовувати в теорії вихрострумowego контролю для порівняльного оцінювання конструктивної ефективності вихрострумowych здавачів та розроблення нових положень нормативних документів з визначення їх характеристик.

**Ключові слова:** *вихрострумовой давач, робоча частота, внесений імпеданс, годограф, інваріантний параметр.*

Практика показує, що чутливість вихрострумowego давача (ВД) залежить від багатьох чинників, серед яких електрофізичні параметри контрольованого матеріалу, робоча частота і конструктивні особливості обмоток. При цьому ефективність ВД і особливості його взаємодії з об'єктом контролю (ОК) визначають на основі аналізу годографів внесеного імпедансу обмотки ВД від різних чинників [1, 2]. Найважливіші параметри, які впливають на ефективність роботи ВД, такі: геометричні параметри обмоток (в першу чергу їх висота і ширина), віддаль від поверхні ОК і параметри феромагнетного осердя.

Поставлено задачу пошуку параметра ВД, якій би визначав за відносно простою процедурою його ефективність незалежно від електрофізичних властивостей матеріалу і робочої частоти. Параметром, який міг би розглядатися як критерій ефективності обмоток ВД, є площа між годографом внесеного електропровідним півпростором імпедансу обмотки і віссю реактивного опору. Такий параметр відображає чутливість обмотки ВД до електропровідного ОК інтегрально в широкому діапазоні робочих частот, але його суттєвий недолік – складна процедура визначення.

**Визначення критеріального параметра для оцінювання ефективності ВД.** Щоб визначити параметр, що міг би слугувати як критерій ефективності ВД, розглянемо найпростішу модель взаємодії ВД з неферомагнетним ОК у вигляді еквівалентної схеми з контуром вихрових струмів з активним  $R_e$  і реактивним  $X_e = \omega L_e$  опорами, який має індуктивний зв'язок з обмоткою ВД, що на віддалі від ОК має активний  $R_0$  і реактивний  $X_0 = \omega L_0$  опори [1, 2]. За взаємодії обмотки ВД з ОК складові імпедансу змінюються так:

$$R_{ref} = \omega^2 M^2 R_e / (R_e^2 + X_e^2) \quad \text{і} \quad X_{ref} = -\omega^2 M^2 X_e / (R_e^2 + X_e^2), \quad (1)$$

де  $\omega$  – кругова частота;  $M = K_c \sqrt{L_0 L_e}$  – коефіцієнт взаємної індуктивності між обмоткою ВД і контуром вихрових струмів;  $K_c$  – коефіцієнт зв'язку, який характеризує індуктивний зв'язок контурів [1, 3] і частину магнетного потоку ВД, зчепленого з контуром вихрових струмів у контрольованому металі.

Зміна активної компоненти внесеного опору  $R_{ref}$  із ростом частоти  $\omega$  або питомої електропровідності (ПЕП)  $\sigma$  ОК має неоднозначний характер. Вона спочатку зростає, досягає свого максимуму і починає зменшуватись до нуля за рахунок впливу реактивного опору контуру вихрових струмів [1].

У контексті поставленої задачі цікавіше розглянути зміни реактивної складової  $X_{ref}$ . Ця складова є від'ємна, що пояснюється зменшенням напруженості електромагнетного поля в зоні обмотки за рахунок зустрічного поля вихрових струмів. З ростом узагальненого параметра  $\beta = r\sqrt{\omega\sigma\mu_0}$  ( $r$  – радіус обмотки;  $\mu_0$  – магнетна стала), який для заданого ВД і немагнетного ОК визначається частотою  $\omega$  і ПЕП  $\sigma$ , вона збільшується і досягає максимального значення  $X_{ref}^m$ , яке (нехтуючи активною складовою  $R_e$  на високих робочих частотах і ПЕП) згідно з виразом (1) дорівнює

$$X_{ref}^m = -\omega^2 M^2 / X_e = K_c^2 \omega L_0. \quad (2)$$

Щоб оцінити ефективність обмоток ВД незалежно від абсолютного значення індуктивності, запропоновано використовувати відносний параметр  $\xi$ , який назовемо коефіцієнтом вихрострумової ефективності і визначимо як співвідношення внесеної індуктивності  $L_{ref(\beta \rightarrow \infty)}$  або реактивного опору  $X_{ref(\beta \rightarrow \infty)}$  обмотки ВД під час встановлення його на ОК за виконання умови  $\beta \rightarrow \infty$  до індуктивності  $L_0$  або реактивного опору  $X_0 = \omega L_0$  обмотки ВД у “повітрі”, тобто:

$$\xi = \frac{L_{ref(\beta \rightarrow \infty)}}{L_0} = \frac{L_0 - L_{(\beta \rightarrow \infty)}}{L_0} \quad \text{або} \quad \xi = \frac{X_{ref(\beta \rightarrow \infty)}}{X_0} = \frac{X_0 - X_{(\beta \rightarrow \infty)}}{X_0}. \quad (3)$$

Зауважимо, що згідно з формулами (2) і (3), запропонований параметр  $\xi = K_c^2$ , тобто близький відомому в теорії пов'язаних контурів коефіцієнту зв'язку  $K_c$  [3]. Водночас безпосереднє використання коефіцієнта зв'язку  $K_c$  в теорії вихрострумового контролю незручне. У вихрострумовому контролі традиційно аналізують зміни внесених значень імпедансу ВД залежно від узагальненого параметра  $\beta$ . Звідси, параметр ефективності  $\xi$  – це максимальне (граничне) значення приведенного внесеного реактивного опору або індуктивності обмотки ВД ( $X'_{ref} = X_{ref} / X_0 = L_{ref} / L_0$ ), яке відповідає точці пересічення лінії екстраполяції годографів імпедансу обмотки ВД за збільшення узагальненого параметра ( $\beta \rightarrow \infty$ ) з віссю реактивного опору [1, 2]. Запропонований коефіцієнт  $\xi$  за визначенням не може бути більший за одиницю ( $\xi \leq 1$ ), а більшому коефіцієнту  $\xi$  відповідає краща вихрострумova ефективність ВД. Важлива особливість параметра  $\xi$  – незалежність від робочої частоти контролю, оскільки він визначається за умов, коли вона перестає впливати на реактивний опір.

Щоб підтвердити ефективність параметра  $\xi$ , можна проаналізувати годографи імпедансу накладних ВД, встановлених на ОК з різним зазором, збільшення якого, очевидно, зменшує взаємодію обмотки ВД з матеріалом ОК. Із годографів видно, що зі збільшенням зазору параметр ефективності  $\xi$  зменшується, оскільки годографи пересікають лінію реактивного опору ближче до точки, що відповідає розташуванню ВД у “повітрі” [1, 2].

Зазначимо, що близький за фізичною суттю параметр для оцінки ефективності ВД використовував А. Л. Дорофеев, який досліджував граничний коефіцієнт розсіювання  $\gamma$  [2]. Цей коефіцієнт для немагнетних матеріалів визначався співвідношенням індуктивності  $L_{\sigma=\infty}$  обмотки ВД, розташованого на ОК з нескінченно великою ПЕП  $\sigma$ , до індуктивності  $L_0$  обмотки ВД, що знаходиться на віддалі від ОК (в “повітрі”). Зазначена незалежність коефіцієнта розсіювання  $\gamma$

від робочої частоти контролю. Водночас параметр  $\gamma$  не пов'язаний з відомими в теорії вихрострумовею контролю залежностями внесеного імпедансу обмотки ВД. Крім того, менший параметр  $\gamma$  відповідає кращій взаємодії обмотки ВД з ОК. Тому він не асоціюється з ефективністю ВД і незручний для використання як відповідний коефіцієнт. Не зовсім вдала є назва цього параметра, яка походить із теорії трансформаторів, і мало асоціюється з ефективністю ВД. Можливо тому ці підходи останні 30 років у теорії і практиці вихрострумовею контролю не використовувались і на сьогодні забуті.

Очевидно, що виконати умову  $\beta \rightarrow \infty$  на практиці неможливо і її можна використати тільки під час аналітичних досліджень. З іншого боку відомо, що точки годографів внесеного імпедансу зі збільшенням ПЕП і робочої частоти зближуються і на високих частотах фактично зливаються. Запропонована методика експерименту і чисельних досліджень параметра  $\xi$  передбачає вимірювання або розрахунок індуктивності обмотки ВД, встановленого на мідний зразок, який має найбільшу ПЕП ( $\sigma = 58,0 \text{ MSm/m}$ ) для конструктивних матеріалів. Відносна похибка  $\delta$  визначення коефіцієнта ефективності  $\xi$  від узагальненого параметра  $\beta$  для заданого діаметра обмотки ВД буде зумовлена вибором робочої частоти. Аналіз показав, що для встановлення параметра  $\xi$  з точністю до 1% необхідно, щоб експеримент і розрахунки відповідали умові  $\beta > 28$ .

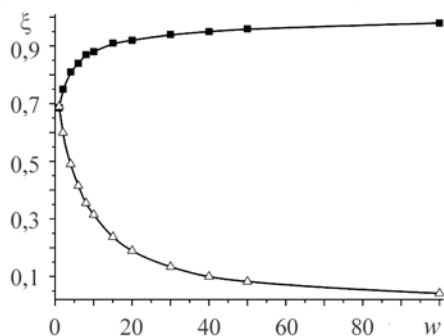
**Аналіз впливу довжини і ширини обмотки на ефективність ВД.** Для аналізу впливу довжини і ширини обмотки ВД розглянемо дві гіпотетичні групи ВД, які є двома протилежними варіантами укладання одношарових обмоток. Перша група – це циліндричні ВД, які складаються із витків однакового діаметра, розташованих один над другим. Збільшення кількості витків тут призводить до збільшення довжини обмотки за сталого діаметра. Друга група ВД – спіральні, які складаються із витків різного діаметра, що прилягають один до другого. В цьому випадку зі зростанням кількості витків висота обмотки залишається сталою і рівною діаметру дроту, а збільшується зовнішній і середній діаметри обмотки ВД.

В обох випадках перший виток виконаний проводом діаметром  $0,1 \text{ mm}$  з середнім радіусом  $1,0 \text{ mm}$ . У циліндричних ВД довжина обмотки в міліметрах залежить від кількості витків  $w$  і дорівнює  $l = d_w w = 0,1w$  ( $d_w$  – діаметр проводу). Зовнішній діаметр спіральних ВД залежить від кількості витків, згідно з виразом  $D_{ext} = 1,05 + d_w w = 1,05 + 0,1w$ . Визначали параметр  $\xi$  за розрахунком реактивного опору обмоток ВД на віддалі від зразка і на мідному зразку з нульовим зазором на робочій частоті  $10,0 \text{ MHz}$ , що відповідає  $\beta \approx 67$ . Розраховували методом об'ємних інтегральних рівнянь [4] за допомогою програми VIC-3D.

Отримані результати (див. рисунок) показують протилежний вплив довжини і ширини обмотки на ефективність ВД. Зі збільшенням кількості витків і ширини спіральної обмотки коефіцієнт вихрострумової ефективності  $\xi$  зростає від  $0,69$  для одновиткової обмотки до  $0,98$  для  $w = 100$ . При цьому останнє значення близьке до максимально можливого. Збільшення кількості витків і довжини циліндричних ВД призводить до суттєвого (більше ніж у 10 разів) зменшення коефіцієнта ефективності  $\xi$  обмотки ВД від  $0,69$  до  $0,042$ . Зазначимо, що ефект зменшення чутливості ВД із збільшенням довжини обмотки відомий із практики і досліджувався, зокрема, в праці [5].

Подані результати пояснюють більшу чутливість ВД до довгих тріщин зі спіральними обмотками порівняно з циліндричними ВД, що відзначалось в праці [6]. Зазначимо, що збільшення кількості витків спіральних обмоток одночасно призводить до підвищення їх індуктивності, а це, в свою чергу, спричиняє збільшення внесеної ОК індуктивності. Таким чином, зростання чутливості спіральних ВД зі збільшенням кількості витків досягається за рахунок двох чинників:

покращення коефіцієнта  $\xi$ , який обумовлює індуктивний зв'язок обмотки ВД з ОК, і загального збільшення індуктивності обмотки. Слід додати, що при цьому погіршується локальність контролю, що обмежує можливість використання спіральних ВД для виявлення коротких тріщин. Тим не менше, спіральні ВД (іноді гнучкі) мають обмежене застосування для контролю об'єкта складної форми [6].



Порівняння залежностей коефіцієнта вихрострумової ефективності  $\xi$  від кількості витків для спіральних (■) і циліндричних (Δ) ВД.

Comparison of the dependences of eddy current efficiency coefficient  $\xi$  on a number of turns for spiral (■) and cylindrical (Δ) eddy current probes.

**Дослідження інваріантних властивостей запропонованого коефіцієнта вихрострумової ефективності  $\xi$ .** Визначимо коефіцієнт вихрострумової ефективності  $\xi$  для обмотки довжиною  $l_0 = 2$  mm з внутрішнім  $r_{int} = 1,0$  mm і зовнішнім  $r_{ext} = 3,0$  mm радіусами обмотки. Січення обмотки  $2 \times 2$  mm щільно заповнювалось різною кількістю витків (табл. 1) за рахунок зміни діаметра проводу і кількості витків обмотки. Розраховували параметри ВД і  $\xi$  для обмоток однакового січення з різною кількістю витків за його розміщення у вільному просторі і на поверхні півпростору з  $\sigma = 58$  MSm/m на робочій частоті 10,0 MHz (табл. 1). При цьому ВД з великою кількістю витків гіпотетичні, оскільки їх не можна використати на практиці. Причиною цього є їх великий реактивний опір на високих частотах, що обмежує чутливість. Тим не менше, параметри таких обмоток також розраховані для підкреслення загального характеру зроблених висновків.

Аналіз результатів показує, що ВД з однаковими геометричними параметрами обмоток, незважаючи на значну різницю за кількістю витків, індуктивністю, реактивним опором і внесеним реактивним опором, мають однакові (до 5 знака) коефіцієнти вихрострумової ефективності  $\xi$ . Таким чином, цей коефіцієнт характеризується інваріантними властивостями відносно кількості витків обмотки ВД за умови збереження її геометричних параметрів.

**Таблиця 1. Результати розрахунку параметрів ВД і  $\xi$  для обмоток з однаковою геометрією і різною кількістю витків**

№ ВД	Кількість витків	$L_0$ , $\mu\text{H}$	$X_0$	$X_{Cu}$	$\xi$
			Ohm		
1	4	0,02396	1,505	0,9503	0,368771
2	16	0,383	24,089	15,2055	0,368773
3	64	6,139	385,42	243,288	0,368772
4	400	239,6	15055,5	9503,43	0,368771
5	1600	3833,8	240887	152055	0,368773
6	6400	$6,34 \cdot 10^4$	$3,854 \cdot 10^6$	$2,432 \cdot 10^6$	0,368772

Збільшимо всі геометричні параметри обмотки в 2 рази, тобто розрахуємо обмотку з внутрішнім  $r_{int} = 2,0$  і зовнішнім  $r_{ext} = 6,0$  mm радіусами і довжиною  $l_c = 4,0$  mm (табл. 2, № 2\*). Розрахунок проведемо для обмотки, що складається із 16 витків, як і ВД № 2 в табл. 1, на робочій частоті 10,0 MHz і 2,5 MHz. Обчислювали ВД № 2\* на робочій частоті 2,5 MHz для збереження умов за параметром  $\beta$ .

**Таблиця 2. Результати розрахунку коефіцієнта вихрострумової ефективності  $\xi$  для ВД з однаковим співвідношенням геометричних розмірів і кількістю витків**

№ ВД	$r_{int}, r_{ext}, l_c$ , mm	Частота, MHz	$X_0$	$X_{Cu}$	$\xi$
			Ohm		
№ 2	1,0; 3,0; 2,0	10,0	24,089	15,2055	0,368773
№ 2*	2,0; 6,0; 4,0	10,0	48,18	30,256	0,37199
№ 2*	2,0; 6,0; 4,0	2,5	12,04	7,6027	0,368783

Результати показують, що коефіцієнт вихрострумової ефективності  $\xi$  розрахований на робочій частоті 10 MHz для ВД № 2 і № 2\* має близькі, але різні значення, що можна пояснити зростанням параметра  $\beta$  в  $\sqrt{2}$  рази за збільшення в 2 рази всіх геометричних параметрів обмотки. Забезпечення рівних умов за параметром  $\beta$  шляхом зменшення в 2 рази робочої частоти зближує отримані значення коефіцієнта  $\xi$  для ВД № 2 і № 2\*, які співпадають до 4 знака. Таким чином, параметр  $\xi$  характеризується інваріантними властивостями відносно розмірів обмотки ВД за умови збереження співвідношення лінійних розмірів (відношення висоти і ширини обмотки до її діаметра).

### ВИСНОВКИ

Запропоновано новий коефіцієнт  $\xi$  для оцінювання ефективності обмоток вихрострумових давачів, який залежить від геометричної форми обмоток. Показано його інваріантні властивості, оскільки він не залежить від розмірів і кількості витків обмоток вихрострумових давачів. Коефіцієнт вихрострумової ефективності  $\xi$  можна використовувати в теорії вихрострумового контролю як дієвий засіб для порівняльного оцінювання ефективності вихрострумових давачів та розроблення нормативних документів з визначення їх характеристик.

*РЕЗЮМЕ.* Предложен новый коэффициент для оценки эффективности вихретоковых датчиков. Выявлено инвариантные свойства этого коэффициента. В частности показано, что он зависит только от соотношения размеров обмоток и не зависит от рабочей частоты, размеров и количества витков вихретоковых датчиков. Коэффициент вихретоковой эффективности может быть использован в теории вихретокового контроля для сравнительной оценки конструктивной эффективности вихретоковых датчиков и разработки нормативных документов по определению их характеристик.

*SUMMARY.* A new coefficient for eddy current probe efficiency estimation is proposed. The invariant features of the proposed eddy current efficiency coefficient are found. In particular it was shown that that proposed coefficient depends on the geometrical sizes of the eddy current probe coils only and does not depend on the coil sizes and quantity of windings. The coefficient can be applied in eddy current method theory for comparative estimation of eddy current probes structural efficiency and for development of normative documents for eddy current probe parameters evaluation.

*Автор висловлює подяку професору університету Отто-фон-Геріке (Магдебург) Герхарду Моку за можливість проведення розрахунків.*

1. Libby H. L. Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods. – New-York: Wiley – Interscience, 1971. – 365 p.
2. Дорофеев А. Л., Казамапов Ю. Г. Электромагнитная дефектоскопия. – М.: Машиностроение, 1980. – 232 с.
3. Нейман Л. Р., Демирчян К. С. Теоретические основы электротехники. В 2-х т. – Л.: Энергия, 1981. – Т. 1. – 522 с.
4. Dunbar W. S. The Volume Integral Method of Eddy Current Modelling // J. Nondestructive Evaluation. – 1985. – 5, № 1. – P. 9–14.
5. Гончаров Б. В., Янишина И. В. Вопросы теории накладных преобразователей с обмотками произвольной длины // Дефектоскопия. – 1986. – № 10. – С. 51–52.
6. Ditchburn R. J., Burke S. K., and Posada M. Eddy-Current Nondestructive Inspection with Thin Spiral Coils: Long Crack in Steel // J. of Nondestructive Evaluation. – 2003. – 22, № 2. – P. 63–77.

Одержано 20.01.2012

# ДО УВАГИ АВТОРІВ

Повідомляємо, що ДП "Українське агентство з авторських та суміжних прав" змінило адресу перебування.

Нова адреса: 01030 м. Київ, вул. Б.Хмельницького, 41а, офіс 1; 2; 3.

Нові телефони: (044) 234-22-38 приймальня  
(044) 234-06-79 відділ обліку авторів  
(044) 235-62-28 бухгалтерія

Факс: (044) 288-29-90

Нагадуємо авторам про необхідність своєчасно подавати заяви на отримання авторської винагороди (факс: (044) 288-29-90).

Зразок "ДОВІДКА-ЗАЯВА АВТОРА" додаємо.

## ДОВІДКА-ЗАЯВА АВТОРА

1. Прізвище, ім'я, по батькові \_\_\_\_\_  
(українською мовою)

П.І.Б. \_\_\_\_\_  
(російською мовою)

2. Серія, номер паспорта, де, коли та ким виданий \_\_\_\_\_

3. Ідентифікаційний код \_\_\_\_\_

4. Домашня адреса (обов'язково вказати поштовий індекс та район міста) \_\_\_\_\_

5. Телефон: службовий \_\_\_\_\_ домашній \_\_\_\_\_

6. Мої статті опубліковані в журналі \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ у \_\_\_\_ році

№ \_\_\_\_\_ стор. \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_ стор. \_\_\_\_\_

№ \_\_\_\_\_ стор. \_\_\_\_\_ № \_\_\_\_\_ стор. \_\_\_\_\_

7. Належну мені суму гонорару прошу виплатити (з нижче наведених вибрати потрібний варіант):

I. в доларах США через Укрексімбанк:

м. \_\_\_\_\_ вул. \_\_\_\_\_

№ розрахункового рахунку \_\_\_\_\_

II. в гривнях за курсом НБУ на день виплати через:

а) банк: (ззначити назву банку) \_\_\_\_\_

ЄДРПОУ \_\_\_\_\_, МФО \_\_\_\_\_, р/р банку \_\_\_\_\_

особистий рахунок в банку \_\_\_\_\_

б) ощадний банк: місто \_\_\_\_\_, код ощад. банку \_\_\_\_\_

ЄДРПОУ \_\_\_\_\_, МФО \_\_\_\_\_ р/р ощад. банку \_\_\_\_\_

р/р автора \_\_\_\_\_

в) пошту: \_\_\_\_\_

г) касу ДП «УААСП»: \_\_\_\_\_

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ року \_\_\_\_\_

(дата заповнення)

(підпис автора)