

УДК 620.179.16:620.179.17

**МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА****Б.М. Горкунов, І.В. Тюпа, О.А. Авраменко, В.В. Скопенко***Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Фрунзе, 21, м. Харків, 61002, тел. (8-057) 707-69-34, e-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua**Наведено розрахункову модель параметричного вихрострумowego перетворювача, засновану на суперпозиції електромагнітного поля витків обмотки перетворювача та індукваного струму в циліндричному об'єкті. Отримані результати розрахунків та експериментальних досліджень підтверджують адекватність запропонованої моделі.**Приведена расчетная модель параметрического вихретокового преобразователя, основанная на суперпозиции электромагнитного поля витков обмотки преобразователя и индуцируемого тока в цилиндрическом объекте. Получены результаты расчетов и экспериментальных исследований подтверждающих адекватность предложенной модели.**The calculation model of parametrical eddy current converter, based on superposition of an electromagnetic field of coils of a winding of the converter and the induced current in cylindrical object is given. The received results of calculations and experimental researches confirm adequacy of the offered model.*

Розвиток сучасних засобів обчислювальної техніки дозволяє істотно автоматизувати й полегшити процес розрахунку та проектування електромагнітних систем. З метою теоретичного аналізу вихідних сигналів вихрострумowych перетворювачів (ВСП) відомі як класичні аналітичні методи, так і розроблені й перевірені на практиці числові методи, засновані на розв'язку диференціальних або інтегральних рівнянь електромагнітного поля. Застосування перерахованих методів при проектуванні ВСП дозволяє успішно знаходити розподіл електромагнітного поля в об'єкті зі складною геометрією й нелінійними властивостями з досить високою точністю, але при значних витратах машинного часу [1,2].

У роботах [3,4] були запропоновані теоретичні розробки та результати моделювання трансформаторного вихрострумowego перетворювача прохідного типу, засновані на суперпозиції електромагнітних полів струмів окремих витків намагнічувальної, вимірювальної обмоток і індукваних струмів в циліндричному металевому зразку. В даній роботі запропоновано метод розрахунку параметричного прохідного ВСП із магнітним і немагнітним зразком, в основу якого покладені аналітичні формули для визначення активних опорів, власних індуктивностей і взаємо-

індуктивностей обмотки ВСП, що представлена у вигляді окремих струмопроводів, а також циліндричного зразка (ЗР), що з урахуванням глибини проникнення можна представити у вигляді кільцевих провідників з короткозамкненими струмами, які протікають в них.

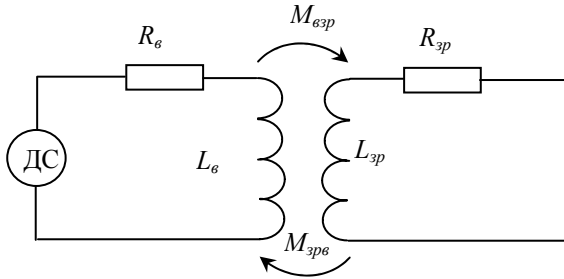
Еквівалентна електрична схема такого параметричного ВСП представлена на рис. 1, на якій вимірювальна обмотка параметричного перетворювача представлена відповідним активним опором  $R_{\text{в}}$  і індуктивністю  $L_{\text{в}}$ , ДС – джерело синусоїдального струму. Досліджуваний циліндричний зразок представлений у вигляді його активного опору  $R_{\text{зр}}$  та індуктивністю  $L_{\text{зр}}$ . Між обмоткою та зразком існує магнітний зв'язок, позначений на схемі взаємоіндуктивностями  $M_{\text{взр}}$  і  $M_{\text{зрв}}$ .

Відповідно до загальноприйнятої теорії, активний опір контуру вимірювальної котушки збільшується на величину  $R_{\text{вн}}$  і відповідно зменшується індуктивність на величину  $L_{\text{вн}}$  [5], тобто:

$$R_{\text{вн}} = \frac{\omega^2 M_{\text{взр}} M_{\text{зрв}} R_{\text{зр}}}{R_{\text{зр}}^2 + (\omega L_{\text{зр}})^2}, \quad (1)$$

$$L_{\text{вн}} = -\frac{\omega^2 M_{\text{взр}} M_{\text{зрв}} \omega L_{\text{зр}}}{R_{\text{зр}}^2 + (\omega L_{\text{зр}})^2}, \quad (2)$$

де  $\omega=2\pi f$  – циклічна частота живлення контуру,  $M_{взр}$  – взаємоіндуктивність між вимірювальною обмоткою і зразком,  $M_{зрв}$  – взаємоіндуктивність між зразком і вимірювальною обмоткою.



**Рисунок 1 – Еквівалентна схема параметричного прохідного перетворювача із провідним циліндром**

З урахуванням прийнятої моделі параметричного перетворювача, вимірювальна обмотка представляє собою окремі витки, кожний з яких замкнений на джерело напруги. Аналогічно, об'єкт контролю представляє собою окремі короткозамкнені кільцеві провідники радіуса зразка  $a_{зр}$  і товщиною струмопроводу  $\delta$ , яка пропорційна глибині проникнення електромагнітного поля в зразок.

Активний опір котушки  $R_e$  і зразка  $R_{зр}$  в області низьких частот можна знайти за відомими співвідношеннями:

$$R_e = \sum_{i=1}^{W_e} R_{i_e} = W_e \frac{l_e}{\sigma_e S_e}, \quad (3)$$

$$R_{зр} = \sum_{i=1}^{W_{зр}} R_{i_{зр}} = W_{зр} \frac{l_{зр}}{\sigma_{зр} S_{зр}}, \quad (4)$$

де  $W_e$  і  $W_{зр}$  – кількість витків вимірювальної обмотки перетворювача та зразка відповідно,  $R_{i_e}$  і  $R_{i_{зр}}$  – активні опори окремих витків обмотки та зразка,  $l_e$  і  $l_{зр}$  – довжина окремих витків обмотки та об'єкта контролю,  $\sigma_e$  і  $\sigma_{зр}$  – питома електрична провідність матеріалу обмотки та зразка,  $S_e$  і  $S_{зр}$  – відповідні площі перерізу струмопроводів.

Індуктивності вимірювальної обмотки та зразка можна представити таким чином:

$$L_e = \sum_{i=1}^{W_e} L_{i_e} + \sum_{i=1}^{W_e} M_{i_e}, \quad (5)$$

$$L_{зр} = \sum_{i=1}^{W_{зр}} L_{i_{зр}} + \sum_{i=1}^{W_{зр}} M_{i_{зр}}, \quad (6)$$

де  $L_{i_e}$  і  $L_{i_{зр}}$  – власні індуктивності окремих струмопроводів,  $M_{i_e}$  і  $M_{i_{зр}}$  – власні взаємоіндуктивності окремих витків вимірювальної обмотки та зразка відповідно.

Значення власної взаємоіндуктивності витків вимірювальної обмотки і зразка в подальшому позначимо як  $M_e$  і  $M_{зр}$ .

Власні індуктивності окремих струмопроводів вимірювальної обмотки та зразка в загальному випадку можна знайти за співвідношеннями [6]:

$$L_{i_e} = \mu_0 a_e \left( \ln \frac{16a_e}{d_e} - 2 + \frac{\mu_0 \mu_{r_e} \xi}{\mu_0 4} \right), \quad (7)$$

$$L_{i_{зр}} = \mu_0 a_{зр} \left( \ln \frac{16a_{зр}}{d_{зр}} - 2 + \frac{\mu_0 \mu_{r_{зр}} \xi}{\mu_0 4} \right), \quad (8)$$

де  $a_e$  і  $a_{зр}$  – зовнішні радіуси витка вимірювальної обмотки та зразка,  $d_e$  і  $d_{зр}$  – діаметри струмопроводів вимірювальної обмотки та зразка,  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна константа,  $\mu_{r_e}$  і  $\mu_{r_{зр}}$  – відносна магнітна проникність матеріалу відповідних витків.

Функція  $\xi$  знаходиться за формулою:

$$\xi = \frac{8}{kd} \frac{b_0}{b_1} \sin\left(\beta_0 - \beta_1 - \frac{\pi}{4}\right), \quad (9)$$

де  $k = \sqrt{\mu_0 \mu_r \sigma \omega}$ ,  $d$  – поточний діаметр струмопроводу,  $b_0$  і  $\beta_0$  – модуль і аргумент Бесселевої функції  $I_0(x)$  першого роду нульового порядку,  $b_1$  і  $\beta_1$  – те ж для Бесселевої функції  $I_1(x)$  першого роду першого порядку,  $x = kr\sqrt{-j}$ .

Як показано в роботах [6,7], знаходження власних взаємоіндуктивностей  $M_e$  і  $M_{зр}$  для вимірювальної обмотки і зразка, а також взаємної індуктивності  $M_{взр}$  і  $M_{зрв}$  у формулах (1) і (2) у випадку немагнітного матеріалу не викликає особливих труднощів. Формули для знаходження даних величин представлені в роботі [6] і справедливі для немагнітних матеріалів.

У випадку феромагнітного матеріалу, ВСП представляє собою досить складну структуру, коефіцієнти  $M_e$  і  $M_{зр}$  будуть істотно залежати від геометрії моделі і магнітних властивостей обмотки і зразка, при цьому значення взаємоіндуктивностей контурів будуть відповідати співвідношенню  $M_{взр} \neq M_{зрв}$ . Для

знаходження даних величин розглянемо магнітний потік, що створюється кожним з витків вимірювальної обмотки, який проходить через поперечний переріз перетворювача і створює у витках перетворювача й об'єкта індуковані струми.

На рис. 2 схематично показані елементарні магнітні потоки, які проходять крізь перетин ВСП, де:  $\Psi_{вим}$  – потік замкнений на тіло вимірювальної обмотки перетворювача;  $\Psi_{пов}$  – потік замкнений на повітряний прошарок між котушкою та зразком;  $\Psi_{зр}$  – потік крізь тіло зразка;  $\Psi_{вн}$  – потік через внутрішній простір об'єкта (для якого прийнято в моделі  $\mu_r=1$ ).

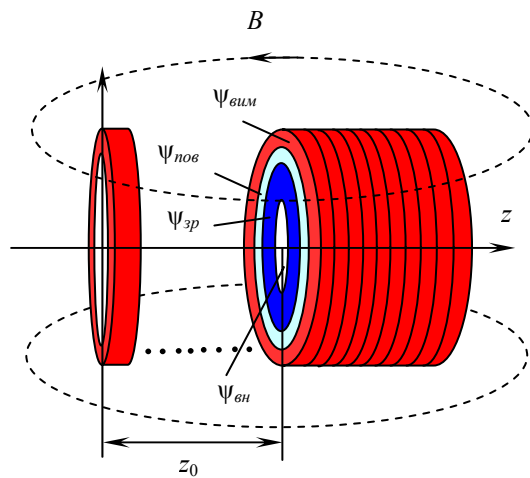


Рисунок 2 – Магнітні потоки в перетині параметричного перетворювача

Дані магнітні потоки можна знайти із таких співвідношень:

$$\Psi_{вим} = 2\pi \int_{a_{e1}}^{a_{e2}} B_z r dr, \quad (10)$$

$$\Psi_{пов} = 2\pi \int_{a_{зр2}}^{a_{e1}} B_z r dr, \quad (11)$$

$$\Psi_{зр} = 2\pi \int_{a_{зр1}}^{a_{зр2}} B_z r dr, \quad (12)$$

$$\Psi_{вн} = 2\pi \int_0^{a_{зр1}} B_z r dr, \quad (13)$$

де  $a_{e2}$ ,  $a_{e1}$  – зовнішній і внутрішній радіуси вимірювальної обмотки;  $a_{зр2}$ ,  $a_{зр1}$  – зовнішній і внутрішній радіуси зразка, тобто

$a_{зр1} = a_{зр2} - \delta$ ;  $r$  – поточний радіус інтегрування.

Величини магнітного потоку, які будуть створювати струми у вимірювальній обмотці  $\Psi_e$  і об'єкті  $\Psi_o$ , можна представити співвідношеннями:

$$\Psi_e = \Psi_{вим} + \Psi_{пов} + \Psi_{зр} + \Psi_{вн}, \quad (14)$$

$$\Psi_o = \Psi_{зр} + \Psi_{вн}. \quad (15)$$

У роботі [3] показано, що магнітний потік крізь тіло кільцевого струмопроводу у загальному вигляді визначається співвідношенням:

$$\Psi_m = 2\pi \left( \frac{a_{зов} \mu_0 \mu_r I}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{a_{зов}}} f(\lambda_{зов}) - \frac{a_{внут} \mu_0 \mu_r I}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{a_{внут}}} f(\lambda_{внут}) \right), \quad (16)$$

де  $a_{зов}$  і  $a_{внут}$  – зовнішній і внутрішній радіуси кільця;  $f(\lambda_{зов})$  і  $f(\lambda_{внут})$  – значення функції відповідних форм-факторів моделі,  $a$  – радіус будь-якого витка, що створює магнітне поле.

Відповідні функції  $f(\lambda_{зов})$  і  $f(\lambda_{внут})$  мають вигляд:

$$f(\lambda_{зов}) = \left( \frac{2}{\lambda_{зов}} - \lambda_{зов} \right) K(\lambda_{зов}) - \frac{2}{\lambda} E(\lambda_{зов}), \quad (17)$$

$$f(\lambda_{внут}) = \left( \frac{2}{\lambda_{внут}} - \lambda_{внут} \right) K(\lambda_{внут}) - \frac{2}{\lambda_{внут}} E(\lambda_{внут}), \quad (18)$$

де  $K$  й  $E$  – повні еліптичні інтеграли першого й другого роду,  $\lambda_{зов}$  і  $\lambda_{внут}$  – геометричні параметри моделі.

Формули для розрахунку параметрів  $\lambda_{зов}$  і  $\lambda_{внут}$  будуть такими:

$$\lambda_{зов} = \sqrt{\frac{4aa_{зов}}{z_0^2 + (a + a_{зов})^2}}, \quad (19)$$

$$\lambda_{внут} = \sqrt{\frac{4aa_{внут}}{z_0^2 + (a + a_{внут})^2}}, \quad (20)$$

де  $z_0$  – відстань між кільцем радіусом  $a$  і відповідним контуром.

Скориставшись формулами для елементарних магнітних потоків, за запропонованою методикою знайдемо співвідношення для  $M_e, M_{zp}, M_{ezp}, M_{zpe}$ .

Значення власної взаємодуктивності  $M_e$  витків вимірювальної обмотки знайдемо так:

$$M_e = \sum \mu_0 (a_e f(\lambda_e) + (\mu_r - 1) \times (\sqrt{a_e a_{zp}} f(\lambda_{zp}) - \sqrt{a_e a_\delta} f(\lambda_\delta))), \quad (19)$$

$$\text{де } \lambda_e = \sqrt{\frac{4a_e a_e}{z_0^2 + (a_e + a_e)^2}}, \quad (20)$$

$$\lambda_{zp} = \sqrt{\frac{4a_e a_{zp}}{z_0^2 + (a_e + a_{zp})^2}}, \quad (21)$$

$$\lambda_\delta = \sqrt{\frac{4a_e a_\delta}{z_0^2 + (a_e + a_\delta)^2}}, \quad (22)$$

де  $a_e$  - зовнішній радіус вимірювальної обмотки;  $a_{zp}$  - зовнішній радіус об'єкта;  $a_\delta$  - внутрішній радіус зразка, причому  $a_0 - a_\delta = \delta$  - глибина проникнення електромагнітного поля в зразок.

Вираз для взаємної індукції  $M_{ezp}$  між кожним витком вимірювальної обмотки і витками об'єкта буде таким:

$$M_{ezp} = \sum \mu_0 (\mu_r \sqrt{a_e a_{zp}} f(\lambda_{zp}) - (\mu_r - 1) \sqrt{a_e a_\delta} f(\lambda_\delta)), \quad (23)$$

$$\text{де } \lambda_{zp} = \sqrt{\frac{4a_e a_{zp}}{z_0^2 + (a_e + a_{zp})^2}}, \quad (24)$$

$$\lambda_\delta = \sqrt{\frac{4a_e a_\delta}{z_0^2 + (a_e + a_\delta)^2}}. \quad (25)$$

Вплив витків об'єкта на кожний виток вимірювальної обмотки визначається так:

$$M_{zpe} = \sum \mu_0 (\sqrt{a_{zp} a_e} f(\lambda_e) + (\mu_r - 1) (a_{zp} f(\lambda_0) - \sqrt{a_{zp} a_\delta} f(\lambda_\delta))), \quad (26)$$

$$\text{де } \lambda_e = \sqrt{\frac{4a_{zp} a_e}{z_0^2 + (a_{zp} + a_e)^2}}, \quad (27)$$

$$\lambda_{zp} = \sqrt{\frac{4a_{zp} a_{zp}}{z_0^2 + (a_{zp} + a_{zp})^2}}, \quad (28)$$

$$\lambda_\delta = \sqrt{\frac{4a_{zp} a_\delta}{z_0^2 + (a_{zp} + a_\delta)^2}}. \quad (29)$$

І нарешті взаємодуктивність  $M_{zp}$  в об'єкті контролю можна знайти таким чином:

$$M_{zp} = \sum \mu_0 (\mu_r a_{zp} f(\lambda_{zp}) - (\mu_r - 1) \sqrt{a_{zp} a_\delta} f(\lambda_\delta)), \quad (30)$$

$$\text{де } \lambda_{zp} = \sqrt{\frac{4a_{zp} a_{zp}}{z_0^2 + (a_{zp} + a_{zp})^2}}, \quad (31)$$

$$\lambda_\delta = \sqrt{\frac{4a_{zp} a_\delta}{z_0^2 + (a_{zp} + a_\delta)^2}}. \quad (32)$$

Для підтвердження адекватності запропонованої моделі були проведені розрахункові та експериментальні дослідження роботи параметричного ВСП із використанням прецизійного моста змінного струму Tesla BM-401E з робочою частотою  $f=800$  Гц. Вихідні дані для розрахунку: кількість витків вимірювальної обмотки  $W_e=375$ ; діаметр перетворювача  $D_n=13,4$  мм; довжина перетворювача  $l_n=88,5$  мм; циліндричні зразки (магнітні та немагнітні) довжиною 200 мм і діаметром 10 мм. Розрахункові значення активного опору та індуктивності вимірювальної обмотки без зразка:  $R_0=8,82$  Ом;  $L_0=0,262$  мГн. Результати вимірювань:  $R_0=8,69$  Ом;  $L_0=0,265$  мГн. Результати розрахунків і експериментальних досліджень зведені в табл. 1.

## ВИСНОВОК

На підставі розробленої моделі ВСП із об'єктом контролю та отриманих експериментальних даних можна зробити висновок про те, що вказана вище модель адекватно описує фізичні процеси, що відбуваються в поверхневих шарах магнітних і немагнітних металевих циліндричних виробів.

Таблиця 1 - Результати експериментальних і розрахункових досліджень

Параметри зразка	Розрахунок		Результати вимірювання		Відносна розбіжність показів	
	$R_p$ , Ом	$L_p$ , мГн	$R_B$ , Ом	$L_B$ , мГн	$\gamma_R$ , %	$\gamma_L$ , %
$\sigma=3,59$ МСм/м, $\mu_r=1$	8,89	0,259	8,76	0,264	1,48	-1,89
$\sigma=1,29$ МСм/м, $\mu_r=1,33$	8,86	0,308	8,74	0,274	1,37	12,41
$\sigma=16,8$ МСм/м, $\mu_r=1$	9,03	0,234	8,92	0,249	1,23	-6,02
$\sigma=49,7$ МСм/м, $\mu_r=1,07$	9,02	0,211	8,98	0,196	0,45	7,65
$\sigma=14,6$ МСм/м, $\mu_r=1$	9,03	0,237	8,91	0,252	1,35	-5,95
$\sigma=1,5$ МСм/м, $\mu_r=32,1$	19,85	2,41	17,59	2,74	12,85	-12,04
$\sigma=1,48$ МСм/м, $\mu_r=31,5$	19,57	2,39	17,4	2,74	12,47	-12,77

### Література

1. Sadiku, Matthew N.O. Numerical techniques in electromagnetics. – New York: CRC Press, 2001. – 750 p.

2. Курбатов П.А., Аринчин С.А. Численный расчет электромагнитных полей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 168 с.

3. Горкунов Б.М., Тюпа И.В., Тищенко А.А. Модель вихретокового преобразователя проходного типа с токопроводящим цилиндрическим образцом. // Технічна електродинаміка, тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність", ч.5, 2007. – Київ. – С. 45-48.

4. Горкунов Б.М., Тюпа С.Ю., Тюпа И.В., Скопенко В.В. Физическое моделирование вихретокового преобразователя проходного типа / 17th National scientific symposium

"Metrology and metrology assurance 2007", September 10-14, 2007. – Sozopol, Bulgaria. – P.121-125.

5. Шумиловский Н.Н., Ярмольчук Г.Г., Грабовецкий В.П. Физические и физико-химические методы контроля состава и свойств веществ. Метод вихревых токов // под общ. ред. Н.Н. Шумиловского. – М.-Л., изд-во «Энергия», 1966. – 176 с.

6. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 368 с.

7. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: В 2-х т. / Учебник для вузов. Т.2. –Л.: Энергоиздат, 1981. – 415 с.

Поступила в редакцію 17.11.2008р.