

УДК 620.179.147

О.Ф. Закревський, асп.

ВПЛИВ СКІНЧЕННОСТІ ГАБАРИТІВ ОБ'ЄКТА КОНТРОЛЮ НА ВНЕСЕНИЙ ІМПЕДАНС ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Національний технічний університет України «КПІ»

E-mail: alexzakrevskiy@ukr.net

Зображено аналітичну модель системи «вихроструманий перетворювач – об'єкт контролю», що враховує вплив крайових ефектів. Розглянуто результати математичного дослідження впливу крайових ефектів на точність та чутливість вихроструманий перетворювача в ході вимірювання амплітуди механічних коливань ультразвукового випромінювача. Показано можливість контролю радіуса циліндричних електропровідних об'єктів контролю накладними вихроструманими перетворювачами по їх торцю.

Ключові слова: аналітична модель, вихроструманий перетворювач, крайовий ефект.

Постановка проблеми

У зв'язку із все зростаючими вимогами до якості контролю параметрів ультразвукового випромінювача (УЗВ) виникає потреба в підвищенні якості вимірювання основних параметрів УЗВ, до яких слід віднести амплітуду механічних коливань. Якість первинних перетворювачів пристроїв вимірювання амплітуди механічних коливань УЗВ визначає якість вимірювання амплітуди механічних коливань, яка у випадку вихроструманий перетворювача (ВСП) визначається не тільки електрофізичними параметрами матеріалу та швидкістю коливання торця наконечника УЗВ, але і його габаритами.

Точність та чутливість первинних перетворювачів визначають якість контролю, що спонукає до пошуку нових способів, які дозволять підвищити точність вимірювань.

Мета роботи – виявлення впливу побічних факторів на якість вимірювання основного параметру ВСП, математичне моделювання процесу взаємодії ВСП з об'єктом контролю (ОК) при зміні радіуса ОК.

Методи розрахунку вихроструманий перетворювача

На сучасному етапі розвитку математичного апарату існує два математичних підходів до аналізу та розрахунку ВСП:

- числове моделювання;
- аналітичний метод.

Числовий аналіз, з огляду на рівень розвитку обчислювальної техніки та метода скінчених елементів, дозволяє достатньо точно проводити розрахунок.

Аналітичний метод складний для розрахунку ВСП при точному розв'язку та громіздкий в поєднанні з неточністю у випадку наближених розв'язків.

До переваг аналітичного методу слід віднести можливість аналізу не конкретного розв'язку, а загального, що охоплює спектр можливих варіантів.

Числове моделювання потребує розв'язку спектра однотипних задач та аналізу отриманих розв'язків.

При зміні декількох параметрів може виявитися, що аналітичний метод більш виражений порівняно з числовим.

Суттєвий недолік числового методу – збиткова інформативність, що призводить до ускладнення аналізу отриманих результатів.

Аналітичним методам властива компактність, гнучкість та простота, тому вони більш придатні для виявлення типових тенденцій у поведінці математичної моделі.

Вплив крайових ефектів можна дослідити, розглянувши аналітичний розв'язок рівнянь Максвелла для системи виток зі змінним струмом – сфероїд або сфера.

Пласка поверхня є окремих випадком, коли сфероїд або сфера переходить у плоский нескінченнотонкий диск [1; 2].

Такий підхід не дозволяє врахувати вплив об'ємності диска за відсутності кривизни поверхні. При цьому товщина диска буде обмежена допустимою кривизною поверхні.

Розв'язок, наведений у роботі [3], накладає обмеження на товщину пластини щодо радіуса витка зі струмом, що становить $\leq 0,05$ радіуса витка зі струмом. Тому було розроблено наближену математичну модель, що враховує товщину циліндричної пластини без зазначених обмежень (рис. 1).

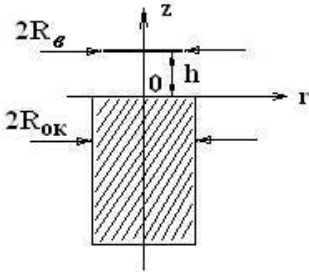


Рис 1. Виток зі струмом над циліндричним ОК

Модель системи «вихрострумний перетворювач – об'єкт контролю»

Аналітичний розв'язок системи виток зі струмом над електропровідним нескінченним півпростором (рис. 2) можна подати у вигляді нескінченної суми ряду [4] за умови обмеження скінченного півпростору за координатою r :

$$\begin{cases} A_{\varphi 2} = \frac{\mu_1 \mu_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_n}{q_{n1}} \varphi_2 e^{\dot{q}_{n2} z - q_{n1} h} f(r), \\ -\infty < z < 0; \\ A_{\varphi 1} = \frac{\mu_1 \mu_0}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_n}{q_{n1}} F(z) f(r), \\ 0 < z < \infty; \\ F(z) = \varphi_1 e^{-q_{n1}(h+z)} + e^{-q_{n1}|z-h|}, \\ \varphi_2 = \frac{2\mu_2 q_{n1}}{(\mu_2 q_{n1} + \mu_1 \dot{q}_{n2})}; \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{\mu_2 q_{n1} - \mu_1 \dot{q}_{n2}}{\mu_2 q_{n1} + \mu_1 \dot{q}_{n2}}; \\ f(r) &= \frac{J_1(\lambda_n r)}{\|J_1(\lambda_n r)\|^2}; \\ J_1(\lambda_n \rho R_g) &= 0, \rho > 1, q_{n1} = \lambda_n, \dot{q}_{n2} = \\ &= \sqrt{\lambda_n^2 + j\omega \mu_2 \mu_0 \sigma}; \\ \|J_1(\lambda_n r)\|^2 &= \int_0^{\rho R_g} r J_1^2(\lambda_n r) dr. \end{aligned} \tag{1}$$

де $A_{\varphi 1}, A_{\varphi 2}$ – вектор-потенціали в середовищі 1 та в ОК;

μ_1, μ_2 – відносна магнітна проникність середовища 1 та ОК;

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м};$$

$$K = -I R_g J_1(\lambda_n R);$$

I – струм витка;

r – радіус проводу витка;

J_1 – функція Бесселя 1-го роду 1-го порядку;

h – відстань від витка зі струмом до електропровідного ОК;

R_g – радіус витка;

$$j = \sqrt{-1};$$

ω – кругова частота струму;

σ – питома електропровідність ОК.

Середовище 1 – це середовище, в якому знаходиться виток зі струмом.

Вектор-потенціал можна подати як суму вектор-потенціалу реакції та вектор-потенціалу у вільному просторі [5]:

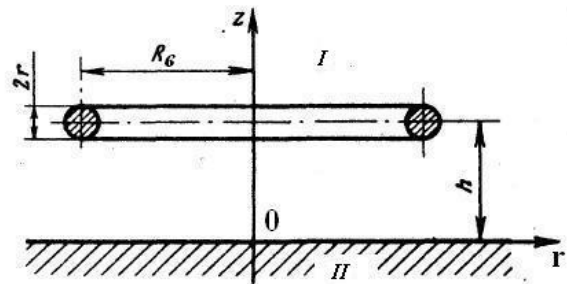


Рис. 2. Виток зі струмом над ОК

$$\begin{cases} A_{\varphi 1} = A_{\varphi 0} + A_{\varphi p 1}, 0 < z < \infty; \\ A_{\varphi 2} = A_{\varphi 0} + A_{\varphi p 2}, -\infty < z < 0, \end{cases}$$

де $A_{\varphi 0}$ – вектор-потенціал у вільному просторі;

$A_{\varphi p 1}$, $A_{\varphi p 2}$ – вектор-потенціал реакції в середовищі 1 та в ОК відповідно.

Замінімо електропровідний ОК, в якому протікають вихрові струми, наведені змінним магнітним полем [6], нескінченнотонкими витками зі струмом, величина якого визначається за формулою

$$I_r(r, z) = -j2\pi r \omega \sigma A_{\varphi 2}(r, z) \quad (2)$$

Величина струму, що наводиться змінним магнітним полем в електропровідному ОК, визначається сумою струмів, що протікають в кожному витку, тобто інтегруванням формули (2) як за координатою z , так і за координатою r .

Система зі скінченними розмірами електропровідного ОК (рис. 1) відрізнятиметься від розглянутої системи скінченною кількістю витків уздовж координати r .

Вихровий струм визначатиме реакцію електропровідного ОК на змінне магнітне поле, що створюється витком зі струмом.

Змінне магнітне поле, як видно з виразу (1), прямо пропорційне струму, що його створює:

$$A_{\varphi} = kI.$$

Згідно з принципом суперпозиції поле в точці визначається сумою полів, створених кожним витком зі струмом окремо, тому відсутність витків зі струмом еквівалентно відніманню поля в точці, що було би створено витками зі струмом, які відсутні, у випадку електропровідного ОК зі скінченними габаритами, від поля, що створено напівнескінченим ОК. Тому поле реакції електропровідного ОК зі скінченними за координатою r габаритами можна подати так:

$$A_{\varphi p p} = k_p A_{\varphi p}, \quad (3)$$

$$k_p = \frac{I_{rk}}{I_r},$$

де I_{rk}, I_r – повний струм, що наводиться в скінченному за координатою r електропровідному ОК та напівнескінченному відповідно.

Наведені припущення не враховують вплив електромагнітного поля на боковій поверхні скінченного за координатою r електропровідного циліндричного ОК. Оскільки магнітне поле неперервне та не може змінюватися стрибком, потрібно узгодити його на боковій циліндричній електропровідній поверхні ОК.

Виходячи з того, що поле прийнято квазі-стаціонарним, різниця вектор-потенціалів на боковій поверхні ОК між полем у вільному просторі та полем в електропровідному циліндричному ОК створить додатковий вихровий струм в електропровідному циліндричному ОК, поле якого компенсує стрибок поля на межі циліндричного електропровідного ОК.

Розглянемо нескінченнодовгий електропровідний циліндричний ОК в магнітному полі, значення якого на боковій поверхні залежить від радіуса електропровідного циліндричного ОК і координати z та визначається формулою

$$H_0(R_{ок}, z) = \frac{1}{\mu_r \mu_0 r} \frac{\partial(r \Delta A_{\varphi}(r, z))}{\partial r} \Big|_{r=R_{ок}},$$

$$\Delta A_{\varphi}(r, z) = A_{\varphi p 2}(r, z),$$

де $R_{ок}$ – радіус циліндричного ОК.

Густина вихрових струмів у циліндричному ОК визначається рівнянням [1]:

$$J_{\delta}(r, z) = -j\omega \mu_2 \mu_0 \sigma H_0(R_{ок}, z) \frac{l_1(kr)}{kl_0(kR_{ок})}, \quad (4)$$

$$k = \sqrt{-j\omega \mu_2 \mu_0 \sigma}.$$

де $l_0(kr)$, $l_1(kr)$ – модифіковані функції Бесселя 1-го роду 0-го та 1-го порядку відповідно.

Поле реакції електропровідного ОК зі скінченними за координатою r габаритами можна визначити коефіцієнт k_p у формулі (3):

$$k_p = \frac{I_{rk} + I_{r\sigma}}{I_r},$$

де

$$I_{r\sigma} = 2\pi \int_{-\infty}^0 dz \int_0^{R_{ok}} r J_{\sigma}(r, z) dr.$$

Розглянуту математичну модель «ВСП-ОК» можна застосовувати для теоретичних досліджень взаємодії накладного параметричного ВСП з електропровідним ОК.

Моделювання

Для визначення впливу геометричного параметру на якість вимірювання амплітуди механічних коливань УЗВ було проведено теоретичне дослідження залежності індуктивності параметричного ВСП від радіального розміру ОК.

Результат моделювання залежності приведенної індуктивності витка у вільному просторі витка над електропровідним ОК від приведенного радіуса витка радіального розміру електропровідного ОК для матеріалів, що використовуються при виготовленні УЗВ, параметри яких наведено в таблиці, для витків радіусом 1 та 2 мм показано на рис. 3.

Криві на рис. 3, 4, позначені «-», «*», «o», відносяться до матеріалів 1, 2, 3 при радіусі витка зі струмом 1 мм (див. таблицю).

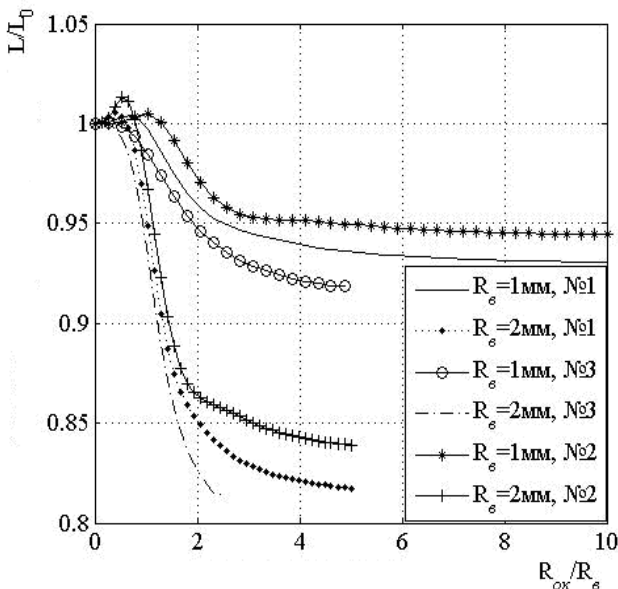


Рис. 3. Залежність приведенної індуктивності від приведенного радіуса ОК

Параметри електропровідних матеріалів наконечників УЗВ

Номер матеріалу	Матеріал ОК	μ_r	σ , МСм/м
1	Титан	≈ 1	1,85
2	Титановий сплав ВТ-3-1	≈ 1	0,735
3	Дюралюміній Д16Т	≈ 1	17,54

Криві, позначені «•», «+» та «-•», відносяться до матеріалів 1, 2, 3 при радіусі витка зі струмом 2 мм.

Зі зменшенням радіального розміру електропровідного ОК величина індуктивності витка збільшується, прямуючи до значення індуктивності витка у вільному просторі.

При зменшенні електропровідності ОК зменшується величина внесеної індуктивності (рис. 3).

Як зазначено в роботі [3], зі зменшенням радіусу пластини спочатку внесена індуктивність збільшується, а потім зменшується до нуля.

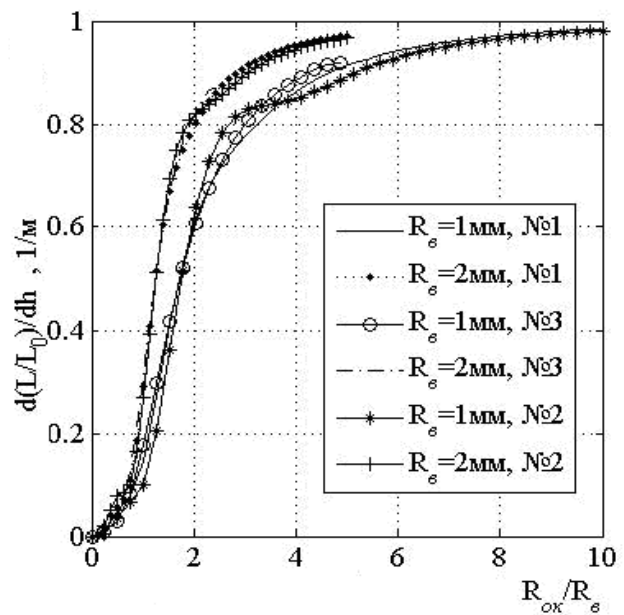


Рис. 4. Залежність приведенної чутливості ВСП до зміни зазору від приведенного радіуса ОК

Така поведінка залежності при більш детальному дослідженні за допомогою розробленої моделі спостерігається при певних значеннях узагальненого параметра (рис. 5):

$$\beta = R_{\text{OK}} \sqrt{\omega \mu_2 \mu_0 \sigma}.$$

$$\beta = \beta_1$$

При цьому спостерігається також зміна знаку внесеної індуктивності при певних значеннях радіусів ОК.

Ділянка максимальної крутості залежить від узагальненого параметра β (рис. 3, 5), зі збільшенням якого зміщується в напрямку значень радіуса ОК, що дорівнює радіусу витка. Це можна пояснити стисненням вихору струму в електропровідному ОК, тобто зміщенням максимуму вихорового струму в сторону витка зі струмом.

Зміщення ділянки максимальної крутості в бік більших радіусів ОК спостерігається при зменшенні узагальненого параметру, що пояснюється розширенням вихору струму в електропровідному ОК, тобто зміщенням максимуму вихорового струму в сторону від витка зі струмом.

Залежність приведенної чутливості ВСП до зміни зазору від приведенного радіуса ОК для витків радіусом 1 та 2 мм показано на рис. 5.

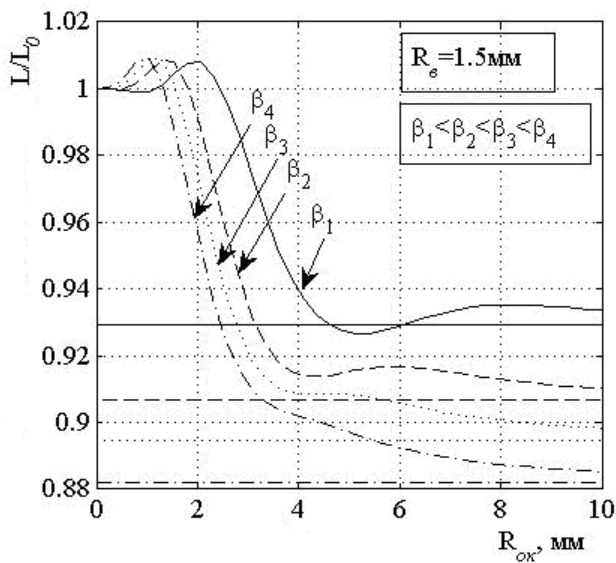


Рис. 5. Сім'я графіків залежності приведенної індуктивності від радіуса ОК

Криві на рис. 6 були розраховані для матеріалу 1 (див. таблицю) та радіуса витка зі струмом 1 мм і приведені до значення індуктивності ВСП на відстані 1 мм між ВСП та ОК.

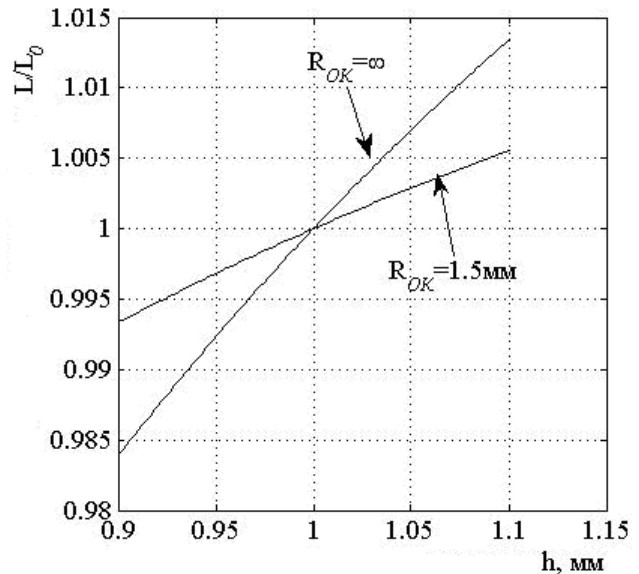


Рис. 6. Залежність приведенної індуктивності від відстані між ВСП та ОК

Для перевірки достовірності розробленої моделі планується проведення експерименту. На цьому етапі проходить виготовлення дослідних зразків та доопрацювання стенда за результатами попередніх випробувань.

Висновки

Чутливість ВСП до зміни зазору у випадку скінченного ОК порівняно з чутливістю до зміни зазору у випадку скінченного ОК зі збільшенням узагальненого параметру значно знижується при менших радіусах ОК.

При зменшенні радіусу ОК зменшується крутість кривої залежності індуктивності від відстані від ВСП до ОК та зменшується її нелінійність. Крутість кривої залежності індуктивності від відстані між ОК та ВСП, як і чутливість ВСП, можна регулювати за допомогою зміни частоти струму живлення ВСП.

Щоб зменшити вплив крайових ефектів на вимірювання параметрів вібрації, слід коректно вибирати частоту струму живлення ВСП, що входить у формулу узагальненого параметра β . Зменшення впливу крайових ефектів при збільшенні частоти пояснюється стисканням вихору струму при збільшенні узагальненого параметра β .

Це стосується лише немагнітних матеріалів ОК, оскільки у випадку магнітних матеріалів ОК характер поведінки залежності індуктивності ВСП від радіуса ОК змінюється і залежить від співвідношення магнітної проникності та електропровідності ОК з частотою струму живлення витка, а тому потребують окремого дослідження.

У разі застосування формули (4) для розрахунку вихрового струму, зумовленого впливом бокового поля, при зростанні аргументу модифікованої функції Бесселя спостерігається значна нестійкість моделі, що зумовлено швидким зростанням модифікованої функції Бесселя та скінченністю розрядів числових даних обчислювальної техніки.

Завдяки наявності похилої ділянки залежності індуктивності ВСП від радіуса ОК найбільшої крутості (рис. 5) є потенційна можливість застосувати накладний ВСП для контролю радіуса деталей циліндричної форми по їх торцю.

Література

1. Герасимов В.Г. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами / В.Г. Герасимов и др. – М.: Энергия, 1978. – 216 с.
2. Курозаев В.П. Влияние геометрии изделий на результаты их контроля вихретоковыми преобразователями / В.П. Курозаев, Ю.И. Стеблев, В.Е. Шатерников // Дефектоскопия. – 1976. – №1. – С. 115–123.
3. Дякин В.В. Решение краевой задачи вихретокового контроля методом интегральных уравнений / В.В. Дякин, В.А. Сандовский // Дефектоскопия. – 1988. – №2. – С. 30–36.
4. Yating, Yu; Pingan, Du. 2008. Two approaches to coil impedance calculation of eddy current sensor. – Proc. IMechE. Vol. 222 Part C: J. Mechanical Engineering Science.
5. Дякин В.В. Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей / В.В. Дякин, В.А. Сандовский. – М.: Наука, 1981. – 137 с.
6. Закономерности распространения вихревых токов в немагнитном полупространстве и пути их использования для решения задач дефектоскопии / П.И. Беда, Ю.Г. Путников, М.С. Дударев, А.Е. Гвенгер // Дефектоскопия. – 1993. – №4. – С. 52–57.

Стаття надійшла до редакції 08.07.2011.