

## ЕЛЕКТРИЧНІ МОДЕЛІ ДОСЛІДНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ ВИХОРОСТРУМОВОМУ МЕТОДІ

© Бучма І.М., Репетило Т.М., 2008

**Розглянуто підходи до тлумачення методу вихорових струмів. Зроблено огляд, аналіз та обґрунтування електричних моделей як неферомагнітних, так і феромагнітних об'єктів. Запропоновано нову модель для феромагнітних об'єктів.**

**In this article approaches to the interpretation of method of eddy currents were had considered. The electric models were reviewed, analysed and proved both ferromagnetic and non ferromagnetic objects. Also a new model for the ferromagnetic objects was proposed.**

**1. Постановка задачі.** Вихорострумова дефектоскопія є одним з найпростіших та найдешевших методів неруйнівних досліджень та контролю [1–7]. Зокрема, хороших результатів досягнуто у створенні вихорострумових дефектоскопів антикорозійних покриттів неферомагнітних матеріалів [1]. Теорія і практика застосування вихорострумового методу для дослідження феромагнітних матеріалів обмежується окремими статтями [1–4, 8, 9]. У зв'язку з цим є потреба у огляді та науковому обґрунтуванні електричних моделей дослідних об'єктів (ДО), зокрема з феромагнітними властивостями.

**2. Формулювання цілей статті.** Стаття стосується аналізу підходів до тлумачення методу вихорових струмів, огляду, аналізу та обґрунтування електричних моделей як неферомагнітних, так і феромагнітних ДО, що використовуються на практиці, та створення нових моделей феромагнітних ДО.

**3. Виклад основного матеріалу.** Крім вищезгаданих, вихорострумовий метод має ще низку позитивних рис. Насамперед він є безпечним для навколишнього середовища та обслуговуючого персоналу. Роботу вихорострумових засобів можна легко автоматизувати і використовувати в найскладніших зовнішніх умовах, зокрема у металургії, мікроелектроніці, енергетиці, особливо в ядерній тощо [1].

Ідея методу вихорових струмів полягає у такому. Котушка зі змінним струмом створює первинне електромагнітне поле. Якщо таку котушку розташувати над металеву основу (звану ДО), то магнітна складова поля збуджує в металі вихорові струми.

Є два підходи до тлумачення методу вихорострумового контролю. При першому вихорові струми збуджують вторинне магнітне поле, яке накладається (підсумовується) на первинне поле (з первинним полем). Вторинне магнітне поле дає інформацію про властивості металу (провідність, магнітну проникність, товщину металевої основи, наявність дефектів у структурі металу, щілину між металеву основу та котушкою зі струмом тощо). У загальному випадку у пункті спостереження вторинне магнітне поле зсунуте за фазою відносно первинного магнітного поля. Амплітуда і зсув фази вторинного магнітного щодо первинного є тими параметрами вторинного магнітного поля, що відображають властивості ДО.

Отже, інформація вторинного магнітного поля про властивості металу є багатопараметровою, тобто обидва параметри вторинного магнітного поля одночасно залежать від багатьох параметрів (перераховані вище) ДО. В багатопараметровості якраз і полягають труднощі використання методу вихорових струмів. Тобто для того, щоб можна було виміряти якийсь один параметр матеріалу, необхідно виключити вплив на вторинне магнітне поле всіх інших параметрів матеріалу,

наприклад, зробити їх незмінними. Тоді параметри вторинного магнітного поля будуть залежати від змін вимірюваного параметра ДО. Друга складність полягає в тому, що залежності амплітуди та фази вторинного поля від параметрів матеріалу є нелінійними. Тому найчастіше намагаються використовувати такий діапазон змін параметрів, в якому ці залежності з допустимою похибкою можна вважати лінійними. Це один підхід.

Є й інший підхід. Можна вважати, що вторинне магнітне поле, накладаючись на первинне, змінює параметри котушки зі струмом. Зміни параметрів котушки (активного опору, індуктивності) залежать від параметрів ДО. Виключивши вплив усіх параметрів металу, крім одного, можна, вимірюючи зміну параметра котушки, виміряти параметр матеріалу. Тут також залежності є нелінійними, але вибирають рівень поля і діапазон зміни параметрів ДО так, щоб їх можна було вважати лінійними.

Отже, метод вихорових струмів має подвійне тлумачення.

Згідно з першим тлумаченням використовують магнітне поле вихорових струмів. У цьому разі за допомогою котушки (вихорострумового перетворювача ВСП) вимірюється зміна магнітного поля, викликана зміною одного з чинників ДО, таких, як наявність дефектів досліджуваного металу, провідність чи магнітна проникність або товщина металу. Для вимірювання параметрів магнітного поля, крім котушок, використовують також різного роду перетворювачі магнітного поля [1].

Друге тлумачення спирається на подання ДО як короткозамкненої вторинної обмотки трансформатора. Тоді первинною обмоткою трансформатора є котушка зі струмом, що збуджує поле. Зміна властивостей матеріалу ДО приводить до зміни вхідного імпедансу котушки збудження або котушки, що зв'язана з нею через магнітне поле.

При першій інтерпретації вихорові струми індукують вторинне магнітне поле, яке накладається на первинне магнітне поле, збуджене котушкою. Це явище описується першим та другим рівнянням Максвелла [1]:

$$\operatorname{rot} H = sE + e \frac{\partial E}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} E = -m \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (2)$$

де  $E$  – напруженість електричної складової поля;  $H$  – напруженість магнітної складової поля;  $s$  – провідність металу;  $e$  – відносна електрична проникність середовища;  $m$  – відносна магнітна проникність металу;  $\omega$  – кругова частота змінного поля.

Якщо збуджується гармонічне магнітне поле, то вирази (1) і (2) набудуть вигляду:

$$\operatorname{rot} H = sE + j\omega e E, \quad (3)$$

$$\operatorname{rot} E = -j\omega m H.$$

На низьких частотах, коли виконується нерівність

$$s \gg \omega e,$$

рівняння (3) спрощується до такого вигляду:

$$\operatorname{rot} H = sE.$$

Тоді змінне магнітне поле збуджує струми провідності, які набагато більші від струмів зміщення. Тому струмами зміщення нехтують.

На високих частотах виконується нерівність

$$s \ll \omega e,$$

і рівняння (3) спрощується до такого:

$$\operatorname{rot} H = j\omega e E$$

У такому разі у матеріалі переважають струми зміщення.

Незалежно від того, з яким випадком ми маємо справу, випадкове вторинне магнітне поле залежить від однорідності чи неоднорідності металу ДО та його електричних властивостей.

Неоднорідності у металі (дефекти) викликають нерівномірний розподіл (розходження) вихорвих струмів, а вони індуюють нерівномірне вторинне магнітне поле.

При другій інтерпретації вихорструмового методу ДО подають як короткозамкнену вторинну обмотку повітряного трансформатора, заступна схема якого зображеного на рис.1 [1]

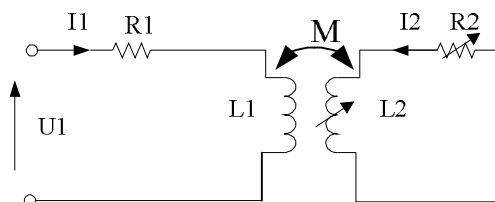


Рис.1. Заступна схема повітряного трансформатора

Тут  $R_1$ ,  $L_1$  та  $R_2$ ,  $L_2$  – відповідно активні опори та індуктивності котушки зі струмом та вторинної обмотки, що є електричною моделлю ДО,  $M$  – взаємна індуктивність котушки зі струмом та вторинної обмотки.

З рис.1 на підставі другого закону Кірхгофа для первинної обмотки можна записати: [1]

$$(R_1 + j\omega L_1)I_1 + j\omega MI_2 = U_1, \quad (4)$$

де  $M$  – взаємна індуктивність між  $L_1$  між  $L_2$

Аналогічно для вторинної:

$$(R_2 + j\omega L_2)I_2 + j\omega MI_1 = 0. \quad (5)$$

Вхідний імпеданс первинної обмотки виражається формулою:

$$Z_{1w} = \frac{U_1}{I_1}.$$

З урахуванням (4) і (5) отримуємо:

$$Z_{1w} = \left( R_1 + \frac{\omega^2 M^2 R_2}{Z_2^2} \right) + j \left( \omega L_1 - \frac{\omega^3 M^2 L_2}{Z_2^2} \right), \quad (6)$$

де  $Z_2^2 = R_2^2 + (\omega L_2)^2$

Запишемо рівняння (6) інакше:

$$Z_{1w} = (R_1 + \Delta R) + j\omega(L_1 - \Delta L), \quad (7)$$

де  $\Delta R = \frac{\omega^2 M^2 R_2}{Z_2^2}$ , і  $\Delta L = \frac{\omega^2 M^2 L_2}{Z_2^2}$  – відповідно внесені опір та індуктивність за рахунок ДО.

З (7) видно, як вторинна обмотка трансформатора впливає на вхідний імпеданс трансформатора. Зокрема, вторинна обмотка трансформатора призводить до зростання опору і зменшення індуктивності первинної обмотки.

Якщо розглядати первинну обмотку відокремлено, тобто нехтуючи впливом на неї вторинної, то її імпеданс буде виражатись виразом:

$$Z_{10} = R_1 + j\omega L_1 \quad (8)$$

Оскільки ДО розглядається як вторинна обмотка трансформатора, то у найпростішому випадку первинну обмотку необхідно розглядати як сенсор, що використовується і для збудження первинного поля, і для вимірювання вторинного поля. З наближенням сенсора до досліджуваного матеріалу вхідний імпеданс змінюється згідно з виразом (7). Ця зміна викликана привнесенням опору  $\Delta R$  та індуктивності  $\Delta L$ .

Величина зміни опору  $\Delta R$  та індуктивності  $\Delta L$  залежить від: частоти  $f$  струму, що збуджує первинне магнітне поле; індуктивного зв'язку між сенсором і ДО (від нього залежить взаємна індуктивність  $M$ ); опору вихоровому струмові, що проходить через ДО, та від індуктивності, зв'язаної з магнітним потоком вихорових струмів.

З (8) видно, що уявна частина імпедансу  $Z_{10}$  є лінійною функцією частоти, хоча практично ця залежність є складнішою, бо  $L_1$  залежить від частоти. Що стосується активного опору  $R_1$ , то він також залежить від частоти.

На фіксованій частоті можна прийняти, що частота впливає тільки на ту частину активного опору, що привноситься ДО, тобто

$$\Delta R = \frac{\omega^2 M^2 R_2}{Z_2^2},$$

і на привнесену реактивність

$$\omega \Delta L = \frac{\omega^3 M^2 L_2}{Z_2^2}.$$

Крім цього, частота впливає на значення опору  $R_2$  та індуктивності  $L_2$ . Це пов'язано з явищем поверхневого ефекту, вплив якого тут розглядати не будемо.

Взаємна індуктивність залежить від співвідношення між струмом збудження  $I_1$  та вихоровим струмом  $I_2$ , що індукується в ДО.

Зміна щілини між сенсором і ДО [1] приводить до зміни індуктивного зв'язку котушки з досліджуваним матеріалом, викликаючи зміну взаємної індуктивності  $M$ . Від цього змінюється вхідний імпеданс котушки.

Еквівалентний опір  $R_2$  ДО вихоровим струмам також залежить від об'єму матеріалу, через який проходять вихорові струми, питомого опору матеріалу та виду і розміщення дефектів. Аналогічна ситуація і з еквівалентною індуктивністю  $L_2$ . Крім цього, вона залежить і від магнітної проникності матеріалу.

На рис.2 [1] зображено вектор імпедансу окремої котушки  $Z_{10}$  і вектори приростів імпедансу, викликані наближенням котушки до ДО. Закладено сталі значення щілини між котушкою та ДО. Прирости імпедансу викликані наближенням котушки до феромагнетика без дефекту –  $\Delta Z_1$  і з дефектом –  $\Delta Z_2$ . Зміну імпедансу можна трактувати як вимірювальний параметр у параметричних сенсорах.

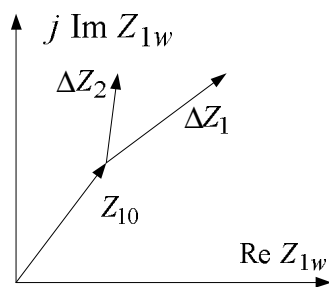


Рис.2. Імпеданс окремої котушки і його прирости

У генераторних сенсорах змінюється напруга. При струмовому збудженні вона пропорційна до імпедансу

$$U_{1w} = Z_{1w} I_1$$

Часто користуються еквівалентними величинами, наприклад, такими, як діюче значення магнітної проникності, або результатами математичного, числового або фізичного моделювання. Найпоширенішим методом числового моделювання є метод скінченних елементів [1].

Залежність сигналів сенсора від параметрів ДО та від режиму контролю виражається експериментально знятими годографами [5,6], оскільки сигнали можна подати векторами на комплексній площині напруг.

Еквівалентний імпеданс сенсора визначається виразом (6). З (6) виходить, що знак уявної складової годографа є від'ємним. Це підтверджує годограф відносної привнесеної напруги накладного вихорострумowego перетворювача під час контролю неферомагнітного ДО, показаний на рис.3 [5]. Звідси видно, що заступна схема (рис.1) є справедливою при діагностуванні неферомагнітного ДО. Електрична модель ДО у такому разі подається короткозамкненою вторинною обмоткою трансформатора (рис. 1).

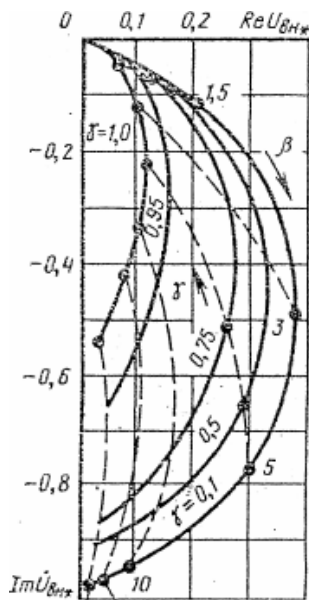


Рис.3. Годографи відносної привнесеної напруги накладного ВСП при контролі неферомагнітного півпростору

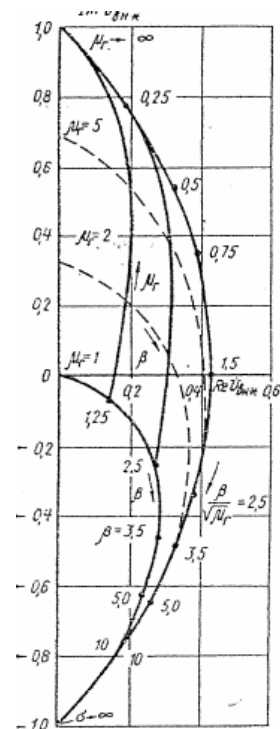


Рис.4. Годографи відносної привнесеної напруги накладного ВСП при контролі феромагнітного півпростору

Тепер розглянемо годограф відносної привнесеної напруги накладного вихорострумowego перетворювача при контролі листа з феромагнітного матеріалу (рис. 4) [5].

З рис. 4 видно, що знак уявної складової може бути як від'ємним, так і додатним. Тому електрична модель ДО, що подана на рис.1, непридатна для відображення впливу феромагнітних матеріалів, оскільки з неї не впливає зміна знака годографа.

У роботі [9] для пояснення зміни знака реактивної складової вторинного поля електрична модель ДО, що складається з послідовно увімкнених індуктивності  $L_e$  та активного опору  $R_e$ , доповнена послідовно увімкненим конденсатором  $C_e$  (рис. 5), де ВСП – трансформаторний вихорострумовой перетворювач (сенсор);  $U_{ex}$  – генератор напруги (може бути струму); ВП – вимірювальний пристрій;  $L_1$  – індуктивність первинної обмотки ВСП;  $L_2$  – індуктивність вторинної обмотки ВСП, зв'язаної з первинною обмоткою через магнітне поле, ДО – досліджуваний об'єкт, електрична модель якого складається з  $L_e$  – еквівалентної індуктивності ДО,  $C_e$  – еквівалентної ємності ДО та  $R_e$  – опору втрат ДО;  $M_{1-2}$  – взаємна індуктивність між обмотками ВСП;  $M_{1-ДО}$  – взаємна індуктивність між первинною обмоткою ВСП і ДО;  $M_{ДО-2}$  – взаємна індуктивність між ДО і вторинною обмоткою ВСП.

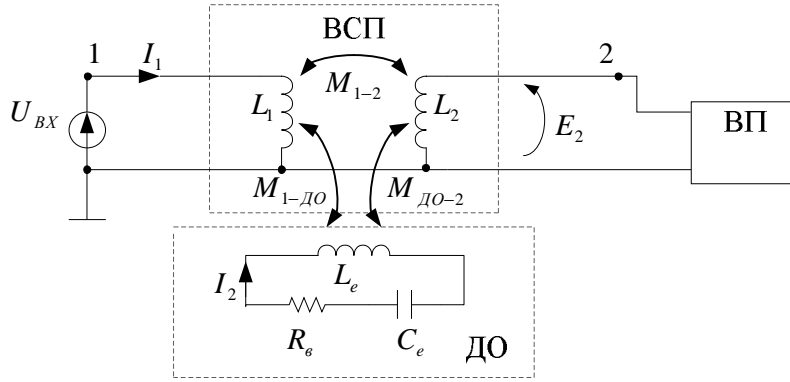


Рис. 5. Електрична модель ДО з феромагнітними властивостями

У цій моделі паразитними міжвитковими ємностями, активними опорами обмоток та прохідними ємностями знехтувано. Параметри  $L_e$ ,  $C_e$ ,  $R_g$ ,  $M_{1-DO}$ ,  $M_{DO-2}$  елементів електричної моделі ДО залежать одночасно від багатьох параметрів (провідності, магнітної проникності, габаритних розмірів ДО, щільності між ДО та ВСП). Ці залежності здебільшого є нелінійними, але з метою спрощення аналізу цією нелінійністю знехтувано.

У [9] розглянуто ситуацію, коли вторинна обмотка ВСП виконана у вигляді двох котушок, обмотки яких увімкнені послідовно-зустрічно. Так вдається вилучити з розгляду вплив первинного поля, тобто ( $M_{1-2}=0$ ).

Тоді для струму  $I_2$  та ЕРС  $E_2$  на виході вторинної обмотки ВСП можна записати вирази:

$$I_2 = \frac{-j\omega M_{1-DO} I_1}{R_g + j\omega L_e + \frac{1}{j\omega C_e}} = \frac{-j\omega M_{1-DO} I_1}{R_g + j(\omega L_e - \frac{1}{\omega C_e})}$$

та

$$E_2 = j\omega M_{DO-2} I_2 = \frac{\omega^2 M_{1-DO} M_{DO-2} I_1}{R_g + j(\omega L_e - \frac{1}{\omega C_e})} \quad (9)$$

відповідно.

Проаналізуємо вираз (9):

1) Якщо  $\omega \rightarrow 0$ , можна знехтувати  $R_g$  та  $j\omega L_e$  порівняно з  $\frac{1}{j\omega C_e}$  тоді для  $E_2$  будемо мати:

$$E_2 \rightarrow \frac{\omega^2 M_{1-DO} M_{DO-2} I_1}{-j \frac{1}{\omega C_e}} = j\omega^3 M_{1-DO} M_{DO-2} I_1 C_e.$$

З останнього видно, що при збільшенні  $\omega$  від 0  $E_2$  буде зростати від 0.

2) Якщо  $\omega L_e = \frac{1}{\omega C_e}$   $E_2 = \frac{\omega^2 M_{1-DO} M_{DO-2} I_1}{R_g}$ .

З п.1 і 2 випливає, що  $E_2$  буде спочатку зростати у разі збільшення частоти від 0 до якогось значення, а потім при збільшенні впливу  $R_g$  та  $j\omega L_e$  почне зменшуватись і стане активним.

3) Якщо  $\omega \rightarrow \infty$ , можна знехтувати  $R_g$  та  $\frac{1}{\omega C_e}$  порівняно з  $\omega L_e$ . Тоді

$E_2 \rightarrow -j \frac{\omega M_{1-DO} M_{DO-2} I_1}{L_e}$ . Тобто  $E_2$  змінить знак і перейде у нижню від'ємну площину.

У моделі ДО, поданий на рис. 5, елементи  $R_e$ ,  $L_e$ ,  $C_e$  увімкнені послідовно. Очевидно, що можна подати електронну модель ДО, в якій елементи  $R_e$ ,  $L_e$ ,  $C_e$  будуть увімкнені паралельно. Така модель зображена на рис. 6.

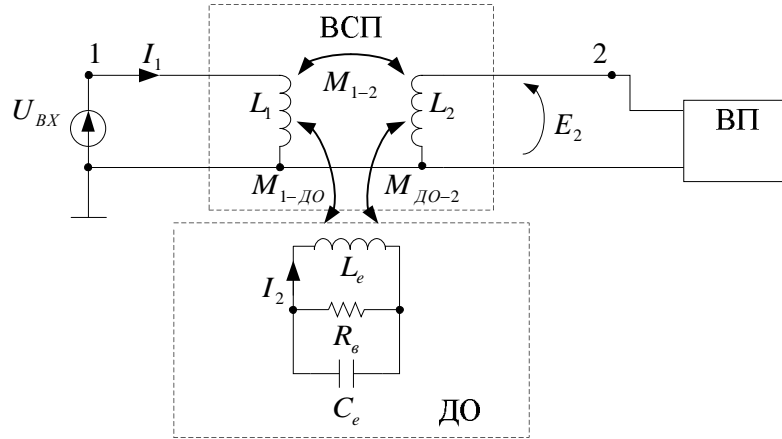


Рис.6. Електрична модель тестованого матеріалу

Тут всі позначення аналогічні до тих, що використані на рис. 5. На підставі рис. 6 можна подати вирази для струму  $I_2$  та ЕРС  $E_2$  на виході вторинної обмотки ВСП:

$$\begin{aligned}
 I_2 \cdot j\omega L_e + I_2(R_e \parallel C_e) + j\omega M_{1-ДО} \cdot I_1 &= 0 \\
 I_2 &= \frac{-j\omega M_{1-ДО} I_1}{j\omega L_e + \frac{R_e}{R_e + \frac{1}{j\omega C_e}}} = \frac{-j\omega M_{1-ДО} I_1}{j\omega L_e + \frac{R_e}{R_e j\omega C_e + 1}} = \frac{-j\omega M_{1-ДО} I_1}{\frac{j\omega L_e(R_e j\omega C_e + 1) + R_e}{R_e j\omega C_e + 1}} = \\
 &= \frac{-j\omega M_{1-ДО} I_1}{\frac{j\omega L_e R_e + R_e}{R_e j\omega C_e + 1}} = \frac{-j\omega M_{1-ДО} I_1 R_e}{j\omega L_e R_e + R_e} = \\
 &= \frac{-j\omega M_{1-ДО} I_1 R_e}{j\omega L_e R_e + R_e} = \frac{j\omega M_{1-ДО} I_1 R_e j\omega L_e}{j\omega L_e (R_e j\omega C_e + 1) + R_e} = \\
 &= \frac{j\omega^2 M_{1-ДО} I_1 R_e L_e}{-j\omega^2 R_e L_e C_e + j\omega L_e + R_e} = \frac{j\omega^2 M_{1-ДО} I_1 R_e L_e}{R_e (1 - \omega^2 L_e C_e) + j\omega L_e} \\
 E_2 &= j\omega M_{ДО-2} I_2 = j\omega M_{ДО-2} \left( \frac{j\omega^2 M_{1-ДО} I_1 R_e L_e}{R_e (1 - \omega^2 L_e C_e) + j\omega L_e} \right) = \\
 &= \frac{j\omega^3 M_{1-ДО} M_{ДО-2} L_e R_e I_1}{R_e (1 - \omega^2 L_e C_e) + j\omega L_e}
 \end{aligned}$$

Проаналізуємо вираз (10):

1) Якщо  $\omega \rightarrow 0$ , можна знехтувати  $\omega^2 R_e L_e C_e$  та  $j\omega L_e$  порівняно з  $R_e$ . Тоді для  $E_2$  будемо мати:

$$E_2 \rightarrow \frac{jw^3 M_{1-ДО} M_{ДО-2} R_6 L_e I_1}{R_6} = jw^3 M_{1-ДО} M_{ДО-2} L_e I_1.$$

З останнього видно, що при збільшенні  $w$  від 0  $E_2$  буде зростати від 0.

2) Якщо  $1 - w^2 L_e C_e = 0$   $E_2 = w^2 M_{1-ДО} M_{ДО-2} R_6 I_1$ .

З п.1 і 2 випливає, що  $E_2$  буде спочатку зростати при збільшенні частоти від 0 до якогось значення, а потім при збільшенні впливу  $jwL_e$  почне зменшуватись і стане активним.

3) Якщо  $w \rightarrow \infty$  можна знехтувати 1,  $R_6$  та  $jwL_e$  порівняно з  $w^2 R_6 L_e C_e$ :

$$E_2 \rightarrow -\frac{jw M_{1-ДО} M_{ДО-2} R_6 I_1}{C_e}.$$

Тобто  $E_2$  змінить знак і перейде у нижню від'ємну площину.

Як бачимо, останні дві електричні моделі ДО з феромагнітними властивостями є цілком рівноправними.

**4. Висновки.** Отже, метод вихорострумowego контролю є одним з найдешевших та найпростіших методів неруйнівного контролю, є безпечним, його легко автоматизувати і використовувати у найскладніших зовнішніх умовах.

Є два підходи до трактування вихорострумowego методу: вихорові струми, збуджені в ДО, створюють вторинне магнітне поле, параметри якого (амплітуда і фаза) дають інформацію про параметри ДО; вторинне магнітне поле вихорових струмів, накладаючись на первинне магнітне поле, викликає зміни імпедансу котушки зі струмом, складові яких відображають параметри ДО; ДО трактується як короткозамкнена вторинна обмотка повітряного трансформатора, первинною обмоткою якого є котушка зі струмом (котушка збудження).

Для подання різних ДО як вторинної обмотки трансформатора використовують різні заступні схеми, названі тут електричними моделями.

Для ДО з неферомагнітних матеріалів достатньо вторинну обмотку подати як короткозамкнені послідовно увімкнені резистор та індуктивність, оскільки для них згідно з годографом вектор вторинного поля у всьому діапазоні зміни частот не виходить за межі нижнього квадранта, тобто його складові не змінюють знака.

Для ДО з феромагнітних матеріалів реактивна складова вторинного магнітного поля при зміні частоти збуджуючого струму від 0 до  $\infty$  змінює знак. У цьому разі ДО необхідно подавати за допомогою активного опору, індуктивності та ємності. При цьому увімкнення їх може бути як послідовним, так і паралельним. Останні моделі є адекватними.

1. Sikora R. *Elektromagnetyczne metody testowania materii*. INBZ, Warszawa 2003, 145s. 2. Yamada T., Suzuki I. *Способ та електромагнітний пристрій для вимірювання товщини пластини*. *A=Trans. Jest. Electron. Ins. and Commun. Eng. Jap. A.* – 1988, v.71, P. 1458–1460. 3. Yamada T., Suzuki I. *Електромагнітний товщиномір*. *Trans. Sos. Instrum. and Coatr. Eng.* – 1991, v.27, № 2. – P.133–140. 4. Бучма І.М., Бучма О.І., Столярчук П.Г. *Про можливості вимірювання товщини феромагнітних матеріалів методом вихрових струмів // Автоматика, вимірювання та керування.* – 1994. – № 283. – С.21–24. 5. *Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник./Под ред. Клюева В.В. кн.2.* – М.: Машиностроение, 1986. – 351 с. 6. Дорофеев А.Л., Казаманов Ю.Г. *Электромагнитная дефектоскопия.* – М.: Машиностроение, 1980. – 232с. 7. Дякин В.В., Сандовский В.А. *Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей.* – М.: Наука, 1981. – 136с. 8. Семенюк Г.Т., Шаповалов Г.О., Паньчишин О.Я. та інші. *Колісний транспортний робот для автоматизації процесів діагностики крупногабаритних зварних споруд // Матеріали доповідей наук.-техн. конф."Фізичні методи та засоби контролю матеріалів та виробів".* – Київ–Львів, 1996. – С.81–82. 9. Бучма І.М., Бучма О.І., Столярчук П.Г. *Вибір та аналіз електричної моделі пари вихрострумовой перетворювач – об'єкт контролю // Автоматика, вимірювання та керування.* – 1997. – № 314. – С.58–62. 10. Бучма І. М. *Метод аероелектророзвідки провідних магнітних руд // Інформаційні технології і системи.* – 2001. – Число 1–2. – Т 4. – С.115–122.