

Р.О. Корж, Я.Г. Притуляк, С.В. Фестрига  
Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій

## УДОСКОНАЛЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНО-АКУСТИЧНИХ МЕТОДІВ ТЕХНІЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ

© Корж Р.О., Притуляк Я.Г., Фестрига С.В., 2013

Розглянуто питання підвищення безаварійної безпечної діяльності роботи економічно небезпечних технічних об'єктів, таких як атомні електричні станції; потреба в нових і модернізованих методах технічної діагностики, які б відбирали максимальну кількість інформації про стан об'єкта, є дуже актуальною. Запропоновано новий метод, в якому використовується ультразвуковий перетворювач електромагнітного типу гармонічних. Подальше збільшення кількості відбору інформації з об'єкта досягається за допомогою використання в первинних перетворювачах методу електричного сканування з азимутальною неоднорідністю. Збільшення реальної чутливості вимірювань відбувається за рахунок використання акустичного розмірного резонансу, а застосування збудження електромагнітного поля за допомогою азимутальної неоднорідності із  $n$ -гармонік уможливило сконцентрувати на невеликій площі сумарну потужність відповідних гармонік. Використання у первинному перетворювачі методу електричного сканування з обертовою азимутальною неоднорідністю дає змогу отримати томографічний експеримент, а це означає, що будь-яка неоднорідність буде виявлена з імовірністю, близькою до одиниці.

**Ключові слова:** ультразвуковий перетворювач електромагнітного типу, електромагнітно-акустичний метод, азимутальна неоднорідність, електричне сканування.

The question of accident-free operation rise of ecologically dangerous technical objects as nuclear electric stations etc. is considered in this article. The needs in new and improved diagnostic methods which can significantly increase information value concerning the real state and thus to determine the accident-free operating life of objects under inspection. The new highly informative method is considered in which harmonic oscillations ultrasonic transducer of electromagnetic type is used. This method in comparison to the electromagnetic-acoustic method doesn't use signal reverse transformation, that's why a signal loss reduces from  $10^{-2}$  to  $10^{-4}$ . Next steps in S/N increase occurs by size acoustic half-wave resonance using, where the Q of metals can reach  $5 \times 10^2$ . Electromagnetic field harmonic excitation using which consists of  $n$  harmonics and is applied to the object through small surface, where concentration of the all harmonics power occurs, by azimuthal non-uniformity, rise the S/N is about the order. In this case the signal at the transducer out isn't limited by the noise.

**Key words:** electromagnetic type ultrasonic transducer, electromagnetic-acoustic method, azimuthal non-uniformity, electric scanning.

### Вступ

До сучасних екологічно небезпечних та складних технічних об'єктів ставляться надзвичайно високі вимоги щодо надійності їх роботи, тому для цього необхідно систематично проводити контроль оцінки стану виникнення аварійних ситуацій. Особливо це стосується аварії на АЕС Фукусіма в Японії.

Реальну оцінку безпеки визначає технічна діагностика ТД, а для цього необхідно застосувати нові сучасні та модернізувати традиційні методи контролю, які б давали достовірну та максимально можливу кількість інформації про стан об'єкта.

Основними напрямками розвитку електромагнітно-акустичних ЕМА методів технічної діагностики, на наш погляд, є застосування електрично-сканувальних перетворювачів [1, 2], що дає змогу значно підвищити надійність виявлення дефектів у металах, незалежно від їх форми і орієнтації в просторі, визначати координати і проводити оцінку параметрів з метою виявлення ступеня небезпеки; формувати образи дефектів та їх візуалізацію; створювати банк образів дефектів з метою аналізу поточного стану і прогнозувати працездатність діагностованого обладнання.

### 1. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розглянемо електромагнітні методи ЕМ неруйнівного контролю і технічної діагностики, в яких реалізований безконтактний метод, який максимально відповідатиме ЕМА-методу, в якому під час збудження вихрових струмів в електропровідному матеріалі та за постійного магнітного поля виникають ультразвукові коливання. В ЕМА-методі, кількість вимірюваних параметрів буде більшою, ніж окремо для вихрострумових і акустичних методів разом узятих [1]. Наприклад, крутильні в стрижнях, коли відбувається обертання хвиль навколо осі, а коливальний рух відбувається симетрично, або середини площини по осі у пластині завтовшки  $-h$  і розподіляється за законом [2]:

$$V_c = A \cos n_c \frac{2nz}{h} (K_c) \sin (K_c X - \omega t),$$

де  $A$  – амплітуда;  $n_c = 0, 1, 2, 3, \dots$  – номери хвиль;  $K_c = 2n/\lambda_c$  – хвильове число симетричної нормальної хвилі;  $z$  – коливання частинок стосовно площини  $z$ ;  $X$  – напрямок поширення хвилі;  $\omega$  – колова частина.

Але ЕМА-метод з гармонічним збудженням має істотний недолік, який обмежує його застосування. Це дуже малий зв'язок між електромагнітними і акустичними хвилями, який визначається так [3]:

$$K = \frac{\mu H_0^2}{\rho C^2}, \quad (1)$$

де  $K$  – коефіцієнт перетворення електромагнітного поля в акустичне і невисоке;  $H_0$  – напруженість поляризованого постійного магнітного поля;  $\rho$  – густина досліджуваного матеріалу;  $C$  – швидкість пружних хвиль у цьому середовищі;  $\mu$  – магнітна проникність середовища.

Фактично загальний коефіцієнт прямої і зворотної трансформації сигналу становить  $10^{-3} - 10^{-4}$  [1]. В результаті сигнал, виділений на вимірювальній обмотці, буде співмірний шумові, що унеможливає проводити його обмотку.

За результатами теоретичних і експериментальних робіт встановлено, що найефективнішою серед них є розробка ультразвукового перетворювача електромагнітного типу (УЗПЕТ) з розподільними параметрами, який складається із джерела постійного магнітного поля і певного контрольованого об'єму металу, де проходять процеси перетворення електромагнітного поля в енергію пружності коливань частинок середовища [2], які є металами феромагнітної або неферомагнітної групи. А прийнятною стороною буде не електромагнітна котушка, а п'єзоелектричний або магнітострикційний перетворювач, в яких ККД досягає 80 %, і відповідно відсутні втрати на зворотну трансформацію, тобто втрати під час перетворення зменшуються до  $10^{-2}$ , а звідси й збільшується реальна чутливість контролю.

Розглянемо ще один метод, який дасть змогу компенсувати загасання амплітуди акустичного сигналу під час його проходження через контрольоване струмопровідне середовище, коли визначаються розміри і товщина стінок тощо. Для цього необхідно налаштувати частоту генератора збуджувальних коливань  $f_{3\phi}$ . Так, за товщиною деталі  $h$  або діаметра стрижня  $d$ , які являтимуть собою резонатори акустичних хвиль:

$$f_{3\phi} = \frac{nc}{2h} = \frac{nc}{2d}, \quad (2)$$

де  $n$  – кількість напівхвиль, розташованих між боковими стінками;  $c$  – швидкість розповсюдження акустичних хвиль у контрольованому матеріалі.

При цьому утворюється стояча хвиля, яка складається з двох хвиль з рівними амплітудами, які розповсюджуються в прямому і зворотному напрямках. Якщо уздовж стрижня збуджувати

поздовжні нормальні хвилі, то власні частоти також отримаємо з виразу (2), тоді у знаменнику фігуруватиме довжина стрижня  $l$ . За початкових умов (2), які відповідають частотам розмірних пружних акустичних резонансів, амплітуди зміщень збільшуються пропорційно до акустичної добротності  $Q$  металу, які досягають  $5 \cdot 10^2$ , а звідси збільшується величина сигналу, наведена в акустичному перетворювачі. Але за великої кількості вкладених півхвиль  $n$ , за рахунок великої довжини  $l$  або  $h$ , загасання еквівалентного резонансного контура стає настільки великим, що можуть не виникнути коливання взагалі.

## 2. Цілі статті

**Мета роботи** – створити метод технічної діагностики із відбором максимальної кількості інформації зі струмопровідних об'єктів з імовірністю виявлення дефектів, близьких до одиниці.

## 3. Збільшення інформативності і надійності контролю

У ланці відбору і оброблення інформації найвужчим місцем є первинний перетворювач, який обмежує вимірювальний потік інформації і відповідно основні показники усієї системи. Застосування традиційних конструкцій ЕМА перетворювачів унеможливить збільшення інформативності, яка необхідна для отримання достовірної інформації про стан об'єкта.

Застосовуючи метод електричного скасування з використанням скануючих перетворювачів з обертовою азимутальною неоднорідністю (ОАН) [4], можна розв'язати поставлені задачі і отримати томографічний експеримент, що дасть змогу з максимальною імовірністю виявляти дефекти, визначати їх розміри і конфігурацію.

Скористаємось методикою [4] для визначення продуктивності вимірювальної інформації поля скануючого перетворювача з ОАН, яка дорівнює числу біт інформації, яка знімається з одиниці площі, за одиницю часу:

$$P_{\mu} = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_s \mu_T \mu_a \mu_{\phi} \mu_{\alpha} \mu_z} = \frac{1}{S} \frac{1}{T_a} \log_2 \left(1 + \frac{1}{\beta_a}\right) \left(1 + \frac{1}{\beta_{\alpha}}\right) \left(1 + \frac{1}{\beta_l}\right) \left(1 + \frac{1}{\beta_H}\right) \text{ біт/м}^2\text{с}, \quad (3)$$

де  $\mu_s$   $\mu_T$   $\mu_a$   $\mu_{\phi}$   $\mu_l$   $\mu_n$  – відповідно просторова, часова, амплітудна, фазова поточні координати вектора магнітного поля і азимут;

$$\mu = \frac{1}{H}; \quad H = \log_2 \left(1 + \frac{1}{\beta}\right); \quad \beta = \frac{\Delta}{d_{\max}},$$

де  $H$  – ентропія відповідної міри;  $\beta$  – діапазон зміни відповідних компонентів поля;  $S = nR^2$  – площа бази розрізнення перетворювача з радіусом  $R$ ;  $T$  – період збуджувального поля.

У продуктивності перетворювачів традиційних конструкцій будуть відсутні міри  $\mu_l$   $\mu_n$  і відповідно на таку ж величину буде зменшена інформативність. Крім того, інформативність поля у традиційних конструкціях перетворювачів з лінійною поляризацією залежить від орієнтації неоднорідності, і нехай це буде поздовжня тріщина, розташована паралельно до напрямку вектора магнітної індукції  $Y$  збуджувальному магнітному полі амплітудна  $\lambda$  і фазова  $\phi$  міри набудуть значень, близьких до нуля, що веде до пропуску дефекту. За ортогонального розташування значення мір буде максимальним. У разі скануючого обертового магнітного поля шукані міри набуватимуть максимальних значень за рахунок того, що неоднорідність опромінюватиметься з усіх боків. Тобто створюється томографічний експеримент, який реалізується електроскануючими УЗПЕТ-перетворювачами, що збуджуються гармонічними коливаннями азимутальної неоднорідності [5, 6], і виявляє неоднорідність з імовірністю, близькою до одиниці.

Базова конструкція УЗПЕТ скануючих перетворювачів з азимутальною неоднорідністю складається із кільцевого магнітопроводу, на якому розташовані  $n$ -обмоток, де перша обмотка створена з ідентичних 4-х секцій, друга – із 8 секцій тощо,  $n$  – відповідає кількості гармонік що формують азимутальну неоднорідність. Живляться збуджувальні котушки від  $n$ -квадратурних генераторів з виходами, зсунутими по фазі на  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ , в результаті чого створюється обертова азимутальна неоднорідність.

На магнітопроводі потужність від  $n$ -гармонік складається і отримується азимутальна неоднорідність, яка буде електрично сканувати контрольовану поверхню з частотою першої гармоніки:

$$\omega_{\text{скан}} = 2nf_1.$$

Утворена скануюча азимутальна віялоподібна неоднорідність діє на поверхню через локальну малу площину з потужністю усіх використаних  $n$ -гармонік, що веде до значного збільшення відношення  $U_{\text{сигнал}}/U_{\text{шум}}$ , тобто збільшення реальної чутливості контролю. Окрім того, з'являється роздільна здатність за азимутом і за глибиною проникнення магнітного поля. При цьому, що більше буде використано в азимутальній неоднорідності гармонік, то більшою буде азимутальна  $\mu_{\text{аз}}$  та  $\mu_{\text{д}}$ . При цьому різні частоти проникають на різну глибину, тому збудження магнітними полями з великим спектром частот дає змогу забезпечити максимальну чутливість до вторинного інформаційного поля з різними провідностями глибини залягання.

Приймальний акустичний перетворювач являє собою кільце, розрізане на чотири ідентичні секції, що розташовані коаксіально до збуджувальної котушки. Із протилежних секцій знімаються відповідно ортогональні сигнали  $U_s$  і  $U_c$ .

На магнітопроводі потужності від  $n$ -гармонік складається і отримується азимутальна неоднорідність, яка скануватиме контрольовану поверхню з частотою першої гармоніки:

$$\omega = 2nf_1.$$

Утворена скануюча азимутальна віялоподібна неоднорідність діє на поверхню через локальну малу площину з потужністю усіх використаних  $n$ -гармонік, що веде до значного збільшення відношення  $U_{\text{сигналу}}/U_{\text{шуму}}$ , тобто збільшення реальної чутливості контролю. Окрім того, з'являється роздільна здатність за азимутом і за глибиною проникнення магнітного поля. При цьому буде використана азимутальна неоднорідність  $\mu_{\text{аз}}$  та  $\mu_{\text{д}}$ . При цьому різні частоти проникають на різну глибину, тому збудження магнітними полями з великим спектром частот забезпечує максимальну чутливість до вторинного інформаційного поля з різними провідностями і глибиною залягання.

Приймальний акустичний перетворювач являє собою кільце, розрізане на чотири ідентичні секції, що розташовані коаксіально до збуджувальної котушки. Із протилежних секцій знімаються відповідно ортогональні сигнали  $U_s$  і  $U_c$ .

### Висновки

Модернізовано електромагнітно-акустичний метод, за якого одержується максимально можлива кількість діагностичної інформації.

За рахунок створення нової конструкції ультразвукового перетворення електромагнітного типу вдається у два рази зменшити втрати під час трансформації сигналу, а використовуючи акустичний резонанс, значно збільшити реальну чутливість  $U_{\text{сигн.}}/U_{\text{шум}}$ .

Застосовуючи в конструкції перетворювача електричне сканування з обертовою азимутальною неоднорідністю, отримаємо томографічний експеримент, за якого імовірність виявлення дефектів наближається до одиниці, звідки максимально збільшується кількість отриманої діагностичної інформації та продуктивність контролю.

1. Ермолов И.Н. Теория и практика ультразвукового контроля. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
2. Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.
3. Сучков Г.М., Хащина С.В., Петрищев О.Н. Развитие концепций создания ультразвуковых преобразователей электромагнитного типа // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2012. – №1. – С. 23–28.
4. Притуляк Я.Г. Информационные характеристики вихрострумовых перетворювачів з обертовим полем // Теорія і проектування  $n/n$  та р. е. пристроїв // Вісник ЛПУ. – 1992. – № 264. – С.45–48.
5. Пат. України № 18425 с1. Пристрій для електромагнітно-акустичного неруйнівного контролю / Я.Г. Притуляк, І.Н. Прудіус та ін. 27.02.98 р. А. С. (СССР) № 1529098.
6. Электромагнитно-акустический способ неразрушающего контроля дефектов изделий из ферромагнитных материалов и устройств для его осуществления / В.А. Гуляев, А.И. Стасюк, М. Чаплыга, Я.Г. Притуляк. – Бюл. №46. 15.12.89.