

УДК 681.2.082

О.Ф. Закревський

Вимірювання амплітуди механічних коливань ультразвукового частотного діапазону

Класифікація методів вимірювання амплітуди механічних коливань ультразвукового частотного діапазону, їх характеристики. Основний акцент зроблено на безконтактні методи вимірювань за допомогою активних первинних перетворювачів. Розглянуто їх позитивні та негативні сторони. Уточнено різницю між вихрострумовим та індуктивним методами.

Classification of ultrasonic mechanical amplitude oscillation measurement methods and its characteristics are considered. Noncontact methods of measurement with the help of active sensors were given consideration. Its positive and negative features were considered. The difference between Eddy-Current and Inductive methods is given.

Ключові слова: амплітуда механічних коливань, методи вимірювань.

Вступ

У зв'язку з широким розповсюдженням ультразвукових технологій та актуальності проблеми вимірювання амплітуди механічних коливань (АМК) ультразвукового частотного діапазону (УЗЧД) та відсутність універсальної методики, яка б дозволила проводити вимірювання та контроль АМК не тільки в лабораторних умовах, але й під час технологічного процесу, як зазначають автори робіт [1, 2], постає необхідність вдосконалення існуючих методів вимірювання АМК УЗЧД та розробки універсальної методики, щодо вимірювання АМК УЗЧД. Вибір напрямку вдосконалення вимагає знання передісторії розвитку та поточний стан проблеми.

Постановка проблеми

Віброметрія – наука про вимірювання параметрів вібрації, охоплює широкий спектр методів вимірювання не тільки АМК, але й швидкості вібрації та її прискорення, охоплюючи в основному низькочастотний діапазон вібрацій [3]. Ультразвукові коливання характеризуються високочастотним діапазоном механічних коливань. Оскільки ультразвук набув особливо бурного розвитку в останні десятиліття минулого століття, на сьогодні відсутня єдина методологія вимірювання та контролю АМК УЗЧД, можна лише вказати на фрагментарний характер цієї

проблеми, тобто зустрічаються в літературі опис окремих методів [1, 2], навіть спроби провести певну класифікацію. Якогось конкретного огляду методів вимірювання АМК УЗЧД немає.

Постановка завдання

Метою цієї роботи є вибір раціонального методу вимірювання АМК УЗЧД з огляду на характерні особливості ОК на базі проведення огляду методів та їх загальної класифікації, що відповідають певним вимогам, а саме, вимірювання АМК УЗЧД в діапазоні (0.1 – 100) мкм та частотному діапазоні (20 – 100) кГц.

Основна частина

Перед розглядом конкретних методів вимірювання, доцільно було би визначити об'єкти контролю (ОК), які можуть бути одномірні, двомірні та тримірні. Це важливо з огляду на те, що саме ОК визначають вибір методу вимірювання.

Характеризуючи ОК слід зазначити, що до одномірних об'єктів переміщення відносяться вироби з плоскою поверхнею, до двомірних – з циліндричною, до тримірних – із сферичною, з формою у вигляді багатокутників (піраміди, призми, паралелепіпеди і т.п.) та ряд інших [3].

Конфігурація виробу повністю визначена, якщо задані допустимі елементи на розміри та форму поверхні. Реальна форма виробу відрізняється від заданої. Спостерігаються відхилення форми реальної поверхні або реального профілю від форми номінальної поверхні чи номінального профілю. Відхилення можуть бути мікрогеометричними, які коротко називають відхиленням форми.

Плaskі поверхні характеризуються відхиленням від площинності та прямолінійності, а також випуклістю та ввігнутістю. Циліндричні поверхні, в свою чергу, характеризуються відхиленням від циліндричності, а саме, відхилення від круглості (овальність, огранка) та відхилення профілю по здовжнього перерізу циліндричної поверхні (конусоподібність, бочкоподібність, сідлоподібність). Аналогічні характеристики мають і тримірні вироби [3].

ОК може бути діелектричним, напівпровідниковим або електропровідним [3].

Більшість ОК виготовлена з електропровідного матеріалу, який на поверхні містить тонкий шар діелектрику з наперед невідомою товщиною. При цьому електропровідний матеріал може бути як немагнітним, так і магнітним, що характеризується петлею гістерезису, тобто залежністю магнітної проникності від амплітуди магнітного поля, та залежності магнітної проникності від його частоти [4, 5]. Електропровідність у свою чергу, як і магнітна проникність, може бути функцією просторових координат. Поверхня ОК може містити неоднорідності у вигляді різних мікродфектів.

Проведення класифікації методів вимірювання АМК УЗЧД потребує виділення класифікаційних ознак. Однією з ознак можна зазначити наявність механічного контакту, тобто розрізняють контактні та безконтактні методи.

Контактні методи полягають у безпосередньому механічному контакті первинного перетворювача (ПП) з ОК. Безконтактні методи характеризуються відсутністю механічного контакту ПП з ОК. Контакт ПП з ОК, у випадку безконтактних методів, полягає у взаємодії поля (електричного, магнітного, електромагнітного або ультразвукового), створюваного ПП з ОК – активні ПП, та взаємодії ультразвукового поля ОК з ПП – пасивні ПП [6 – 9], тобто ще однією класифікаційною ознакою є форма взаємодії ПП з ОК, згідно чого розрізняють активні та пасивні ПП, ПП ближньої та дальньої локації.

На рис. 2 зображено торець робочої накладки ультразвукового молотка, який наглядно відображає суть поставленої проблеми, АМК якого потрібно виміряти.



Рис. 2. Торець робочої накладки ультразвукового молотка

Найбільш прості серед контактних методів – ті, що реєструють АМК за допомогою п'єзоелектричних сенсорів [7, 8]. Вони дозволяють проводити вимірювання з високою точністю в діапазоні низьких частот та відносно великих АМК, але внаслідок своєї великої інерційності, яка призводить до спотворення форми сигналу, ускладнюючи вимірювання АМК високої частоти та малої амплітуди. Крім того, якщо маса ОК невелика, то такий сенсор може суттєво впливати

на характер АМК, що також вносить додаткову похибку у вимірювання.

Вимірювальній схемі без підсилювача сигналу з п'єзоперетворювача характерний нижній поріг вимірювання АМК 10 мкм. Застосування підсилювача дозволяє розширити нижній діапазон АМК до 1 мкм. Більш точне вимірювання вимагає контролю сигналу з п'єзоперетворювача в смузі робочих частот АМК ОК [8].

До переваг контактних методів слід віднести простоту реалізації, точність положення на ОК, невисоку вартість. Проте необхідність встановлення контактного ПП безпосередньо на динамічний ОК різко звужує сферу його застосування.

Серед недоліків контактних ПП слід зазначити неможливість контролю АМК безпосередньо в ході технологічного процесу, за виключенням випадків безпосередньої вбудови ПП в ультразвуковий випромінювач (УЗВ), залежність показів вимірювального пристрою від сили притискання ПП [8], схильність ПП та лінії зв'язку до шкідливих, з точки зору надійності, механічних впливів, що призводять до частих та дорогих збоїв та відмов у системах контролю, застосування тільки тоді, коли маса їх принципово менша маси ОК, відносно слабкий рівень електричного сигналу в порівнянні з мікрофонним ефектом підвідних провідників, власними шумами та іншими завадами, зміна чутливості з часом, що вимагає періодичного калібрування, суттєвий розкид характеристик від зразка до зразка, мала механічна міцність [1, 2].

Тепер розглянемо безконтактний оптичний метод. Слід зазначити, що лазерні оптично-інтерферометричні методи широко використовують при калібруванні апаратури вимірювання АМК. Висока чутливість та точність цих методів [10] забезпечує можливість вимірювання малих височастотних АМК, а тому є важливими при розробці та калібруванні УЗВ. Розглянемо конкретний метод, що полягає у застосуванні оптичного інтерферометра зі зворотнім зв'язком.

Відбивач інтерферометра складається з активної поверхні УЗВ. Оптична довжина шляху інтерферометра рівномірно змінюється від механічного зміщення лазера відносно ПП, або зміни індексу заломлення середовища на шляху лазерного променя. АМК поверхні ОК оцінюється за амплітудою електричного сигналу спектральної складової вихідного сигналу фотоприймача, що перетворює випромінювання лазера. Якщо одночасно з рівномірною зміною оптичної довжини шляху інтерферометра збуджено напругою УЗВ за законом косинуса з час-

тотою f , вихідний сигнал інтенсивності випромінювання лазера $I(x,t)$ зі зворотнім зв'язком можна представити так:

$$I(x,t) = a_0 + A \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda_0}(x + \Delta x \cos(2\pi ft))\right) \quad (1)$$

де a_0 – постійна складова вихідного сигналу випромінювання; A – масштабний коефіцієнт пропорційний величині зворотного зв'язку (у випадку слабкого зворотного зв'язку $A \ll a_0$); λ_0 – довжина хвилі лазерного випромінювання; x – довжина оптичного шляху між лазером та УЗВ; $\Delta x = \xi \eta_0$ – амплітуда зміни оптичного шляху, ξ – АМК поверхні УЗВ, η_0 – оптичний коефіцієнт заломлення середовища.

Спектр сигналу (1) на виході фотопомножувача показано на рис. 3. Амплітуди різних спектральних складових змінюються згідно закону функції Беселя першого роду $J_n(4\pi\Delta x / \lambda_0)$ порядком якої рівний номеру частоти гармоніки збудження ($n = 1, 2, 3, \dots$). Щоб визначити АМК спостережуваної точки на поверхні, можна використати будь-яку спектральну складову $(nf + F)$ або $(nf - F)$ виділеної вузькою смуговим $(nf \pm F)$ фільтром, або використанням обох складових, виділених фільтром зі смугою $2F$. У вище наведених виразах $F = 2v / \lambda_0$, $v = dx / dt = \text{const}$ – рівень зміни оптичного шляху інтерферометра. У першому випадку на виході фільтра з'явиться синусоїдальна напруга, а в другому – сигнал, що характеризується биттям двох синусоїдальних коливань. Амплітуда вихідного сигналу залежатиме від Δx , тобто від АМК, представлених також функціями Беселя [3].

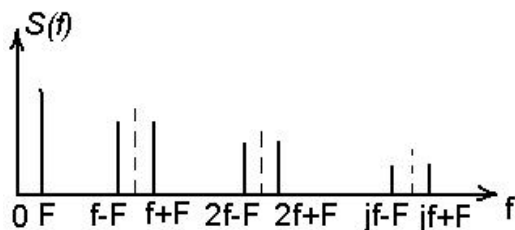


Рис. 3. Частотний спектр вихідного сигналу фотопомножувача

У зв'язку з розвитком цифрових технологій обробки зображення, з'являються методи вимірювання АМК, які полягають у цифровій обробці 2D зображення із субпіксельною роздільною здатністю [11], що дозволяє не тільки покращити точність вимірювання АМК, але й автоматизувати такий процес.

Незважаючи на такі переваги, як висока точність та велика роздільна здатність, можливість точкових вимірювань, оптичним методам характерні такі недоліки, як складність, висока вартість апаратури, великі енергозатрати та високі вимоги до поверхні ОК та оптичного середовища. На практиці такий метод доцільно використовувати для калібрування, градуювання та перевірки УЗВ [12].

Найбільшого поширення серед оптичних методів отримали стробоскопічні оптичні методи. Ці методи полягають у застосуванні мікроскопу, оснащеного окулярною шкалою або сіткою [13 – 15].

Темпи розвитку оптичних технологій показують, що, в перспективі, існують передумови розробки оптичних методів, які не висувають жорстких умов до якості обробки поверхні та необхідності застосування дзеркал, а також жорстких умов до джерела світла, тобто когерентності та стабільності частоти випромінювання, являються компактними та малогабаритними [16]. Однак, вимоги до якості оптичного середовища, яке слугує каналом зв'язку між ОК та ПП залишаються високими.

Тепер розглянемо ємнісний метод. Ємнісний вимірювач мікропереміщень включає в себе ємнісний ПП (ЄПП), що перетворює мікропереміщення поверхні в ємність, та вимірювач ємності, шкала котрого градуйована в одиницях вимірювальної величини. Якість та особливості роботи ємнісних вимірювачів мікропереміщень в першу чергу визначаються параметрами ЄПП. Це пов'язано з тим, що ЄПП, на відміну від іншої частини засобу вимірювання, працює при підвищеній вібрації, в агресивних умовах, при великих коливаннях температури та вологості. Тому близько 80% відмов засобів вимірювання відбувається, в основному, через вихід з класу точності ПП [2, 3, 7, 9].

За принципом дії ЄПП відносяться до параметричної групи, яка характеризується тим, що вимірювальна або контрольована фізична величина – переміщення, перетворюється в параметр електричної ланки – ємність [7, 9].

Раніше ЄПП використовувались у вигляді двоелектродного конденсатору. При цьому основна ємність ЄПП залежала не тільки від конструктивних параметрів конденсатору, але й від близькості розміщення окремих предметів, їх відносного переміщення та ємності з'єднувальних кабелів та проводів, які вносять нестабільність при проведенні вимірювань.

Від цього недоліку в значній мірі вільні триелектродні ЄПП, в яких вимірюється частко-

ваємність між високо потенційним та низько потенційним електродами, що розміщені в екрані. До недоліків триелектродних ЄПП слід віднести те, що часткові ємності між потенціальними електродами та екраном при увімкненні ЄПП в трансформаторний міст шунтують генератор або індикатор рівноваги [17].

За способом увімкнення ЄПП поділяються на одноємнісні, напівдиференційні та диференційні [7].

В одноємнісних ЄПП переміщення діє на один робочий конденсатор, а зразковий конденсатор постійної ємності знаходиться у вимірювальному пристрої; для напівдиференційних – зразковий конденсатор розміщено в одному корпусі з робочим, і вони виконуються за можливістю ідентичними; в диференційних – обидва конденсатори є робочими та розміщені в одному корпусі.

Переміщення змінює ємність ЄПП шляхом дії на будь-який його параметр: ефективна площа електродів або відстань між електродами, діелектричну проникність ізолятора між електродами конденсатору, як видно з такої формули: $C = \varepsilon_0 \varepsilon_r (n-1) S / d$, де n – число пластин, S – площа однієї сторони пластини, d – товщина діелектрику, ε_r – відносна діелектрична проникність та $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Аналіз суттєвих ознак, що визначають конструкцію ЄПП та принцип їх функціонування, показав, що для вимірювання малих та надмалих переміщень доцільно використовувати ЄПП зі змінним зазором [7].

На рис. 4 показано декілька ЄПП, а на рис. 5 зображена залежність ємності від а) відстані між пластинами, б) часткового перекриття, в) діелектричної проникності.

Як видно з рис. 5 лише залежність ємності від відстані (рис. 5, а) нелінійна, проте її можна зробити лінійною за допомогою електронних ланок.

Як правило для отримання вихідного сигналу змінний ЄПП підключають до ланки постійного струму зі зміщенням або до мосту змінного струму. Оскільки зміна ємності невелика, порядку декількох пікофарад, ЄПП можна включити з підсилювачем зі зворотним зв'язком або забезпечувати частотну модуляцію високо-частотного генератора.

Тепер розглянемо переваги та недоліки ЄПП. До переваг ємнісних сенсорів доцільно віднести такі: висока чутливість, простота пристрою, малі габарити та вага, мала інерційність, незначні зусилля електричної взаємодії між обкладинками сенсора.

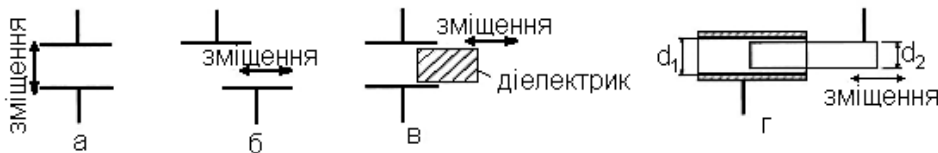


Рис. 4. Ємнісні перетворювачі: а – ЄПП за зміною відстані; б – ЄПП за зміною площі перекриття плоских пластин конденсатору; в – ЄПП зі зміною діелектричної проникності зазору конденсатора; г – ЄПП за зміною площі перекриття циліндричних пластин конденсатору

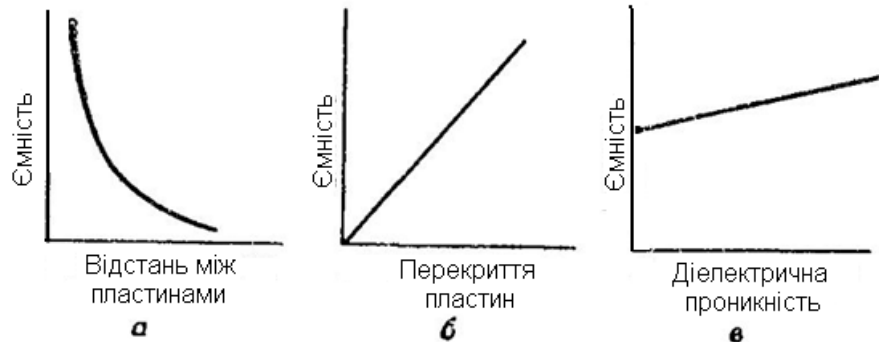


Рис. 5. Залежність ємності від параметрів перетворювача: а – функціональна залежність ємності ЄПП від відстані між пластинами конденсатору; б – від площі перекриття; в – від діелектричної проникності зазору між обкладинками конденсатору

Що ж до недоліків таких сенсорів, що обмежують їх застосування, то доцільно виділити

наступні: непостійність характеристики при значних змінах умов їх роботи (температури та

вологості зовнішнього середовища і ін.), необхідність використання для включення сенсорів відносно складних вимірювальних схем, а також вимоги до точного виготовлення, в деяких випадках, окремих деталей сенсорів [17].

Тепер розглянемо наступну групу ПП – електромагнітні. Електромагнітні ПП можуть вимірювати практично будь-яку механічну величину, в тому числі й лінійні переміщення [7, 9].

Практично для вимірювання АМК застосовують лише параметричні електромагнітні ПП, тому розглядатимемо лише їх. Параметричні електромагнітні ПП реалізують такі дві основні різновидності функцій перетворення:

$$L = w^2 \frac{\operatorname{Re}(Z_m)}{Z_m^2}$$

$$M = w_1 w_2 \frac{\operatorname{Re}(Z_m)}{Z_m^2}$$

де L – індуктивність обмотки одноконтурного ПП, який має w витків; M – взаємна індуктивність обмоток двоконтурного ПП з кількістю витків первинної w_1 та вторинної w_2 обмоток; $\operatorname{Re}(Z_m)$ – дійсна частина магнітного опору Z_m :

$$Z_m = \oint \frac{dl}{\mu S}$$

де інтегрування ведеться за замкненим контуром магнітної ланки, який має площу поперечно-го перерізу S та магнітну проникність μ .

Прийнято виділяти в групі параметричних електромагнітних ПП індуктивні, трансформаторні та вихроструміві.

Принцип дії індуктивних ПП базується на перетворенні зміни магнітного опору, що обумовлений дією вимірювальної величини, в електричний сигнал. Зміна магнітного опору ланки ПП обумовлена зміною геометричних розмірів повітряних зазорів магнітопроводу. На рис. 6 показано типові конструкції індуктивних ПП.

Розглянемо принцип дії індуктивних ПП на прикладі ПП, який зображено на рис. 6, а, і представляє собою дросель зі змінним повітряним зазором δ . У випадку невеликого зазору, індуктивність L ПП можна оцінити за формулою:

$$L = \frac{w^2}{\frac{l_M}{\mu_r \mu_0 S_M} + \frac{2\delta}{\mu_0 S_0}} \quad (2)$$

де l_M – середня лінія магнітної силової лінії в ярмі якоря; S_M та S_0 – середні площі перерізів осердя та повітряного зазору.

У випадку, коли магнітний опір осердя багато менший магнітного опору повітряного проміжку формула (2) записується так:

$$L = \frac{w^2 \mu_0 S_0}{2\delta}$$

Чутливість ПП до переміщення γ визначається відношенням ΔL до $\Delta \delta$ та визначається так:

$$\gamma = -\frac{w^2 \mu_0 S_0}{2\delta^2}$$

Отже, чутливість ПП обернено пропорційна квадрату величини повітряного зазору δ , тому індуктивні ПП особливо чутливі при малих зазорах та здатні вимірювати зміни зазорів близько 0.1...0.5 мкм. При збільшенні зазору залежність $L = f(\delta)$ стає нелінійною. Підвищити лінійність функції перетворення ПП та точність вимірювання можна, використавши диференційну схему ввімкнення ПП (рис. 6, в).

До переваг індуктивних ПП потрібно віднести велику вихідну потужність сигналу, достатню в багатьох випадках для вимірювання параметрів без підсилювальних пристроїв, високу чутливість, порівняну простоту конструкції.

Недоліком є складність регулювання нуля, тобто компенсації вихідної напруги при відсутності зовнішньої дії. Крім того для зниження завад вони, як правило, потребують екранування, що збільшує їх габарити та масу. Точність вимірювання невисока, особливо це відноситься до пристроїв, що не використовують диференційну схему ввімкнення, або якісь інші схеми, які компенсують негативний вплив зовнішніх факторів [18].

До недоліків індуктивних ПП можна віднести також обмежену зону контролю. Наприклад, прилади типу УБВ-2, що випускались раніше, та в яких використовувались саме індуктивні ПП, не придатні для вимірювання АМК під час технологічного процесу, оскільки потребують наявності вільної площини мінімум 6 мм [8]. Отже, площа вільної площини слугує ще одним обмежувальним фактором.

Наступним типом електромагнітних ПП є трансформаторні ПП. Принцип дії

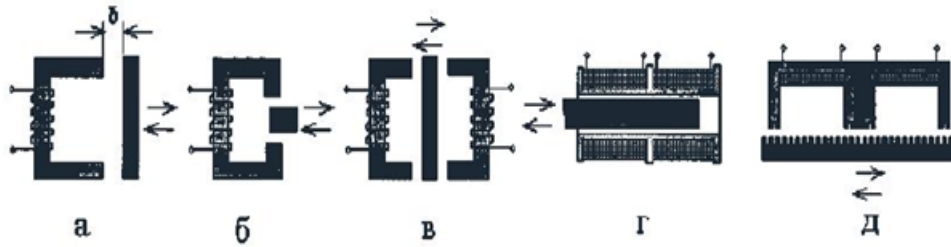


Рис. 6. Конструкції індуктивних ПП: а – ПП за зміною зазору; б – ПП за зміною площі перекриття; в – диференційний ПП; г – диференційний ПП за зміною магнітної проникності; диференційний ПП за зміною площі перекриття

трансформаторних ПП базується на зміні коефіцієнта взаємодуції M між збуджуючою та вимірювальною обмотками.

Трансформаторним ПП з однією вимірювальною обмоткою притаманна невисока точність та нелінійність залежності $e = f(I)$, тому, як правило, використовують диференційну схему ввімкнення, в якій є одна обмотка збудження та дві вимірювальні обмотки, які ввімкнені зустрічно. При нейтральному (симетричному) положенні якоря відносно вимірювальних обмоток напруга на виході рівна нулю. Зміщення якоря відносно нейтрального положення призводить до появи вихідної напруги, причому його фаза при переході через нейтральне положення повинна змінюватись на 180° . Реально вихідна напруга в нейтральному положенні не досягає нуля по-перше, через нелінійність кривої намагніченості магнітопроводу проявляють себе вищі гармонійні складові, по-друге, через наявність ємнісного зв'язку між первинною та вторинною обмотками [18].

Оскільки ОК переважно виготовляється із електропровідних матеріалів доцільно окремо та більш детально розглянути саме вихрострумний метод для вимірювання АМК УЗЧД.

Вихрострумний метод полягає у взаємодії змінного магнітного поля з електропровідним середовищем ОК. При цьому в ОК наводиться електричний струм, згідно закону Фарадея, який ще називають вихровим струмом. Вихровий струм в свою чергу створює магнітне поле, що направлене в протилежному напрямку первинному полю. Параметри вихрового струму визначаються параметрами електропровідного середовища ОК та параметрами первинного магнітного поля на поверхні ОК, а саме його частотою та амплітудою. Слід також зазначити, що у випадку, коли матеріал ОК магнітний, ВСП притаманні властивості індуктивних ПП, які домінуватимуть залежно від магнітних властивостей матеріалу ОК та величини вихрових струмів. З огляду на це доцільно, аналогічно числам подібності (числа Рейнольдса, Харта і

ін.), які визначають межу домінування тих чи інших явищ, ввести число, яке розмежуватиме індуктивні та вихрострумні ПП. У випадку ВСП виконується така умова:

$$2p \left[\frac{2R\mu_1 a_n}{\mu_2 \pi} \sqrt{(c_n^2 + d_n^2)} - 1 \right] \gg 1 \quad (3)$$

$$a_n = \sqrt{\left(\frac{(1+2p)\pi}{4pR} \right)^4 + k^2};$$

$$\tilde{n}_n = \sqrt{0.5 \left(1 + \left(\frac{(1+2p)\pi}{4pR a_n} \right)^2 \right)};$$

$$d_n = \sqrt{0.5 \left(1 - \left(\frac{(1+2p)\pi}{4pR a_n} \right)^2 \right)};$$

де μ_1, μ_2 – відносні магнітні проникності середовища та матеріалу ОК відповідно; R – радіус витка ВСП; p – параметр дискретизації простору за координатою r в циліндричній системі координат; $k = \omega \mu_2 \mu_0 \sigma_2$; $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м; ω – кругова частота струму збудження ВСП; σ_2 – питома електропровідність матеріалу ОК.

Нерівність (3) справедлива якщо радіальні розміри котушки ВСП мінімум в 4 рази менші радіальних розмірів ОК та товщина ОК мінімум в 3 рази більша за товщину скін-шару ОК.

Отже ВСП, згідно [4], – пристрій, що складається з однієї або декількох котушок індуктивності, призначених для збудження в ОК вихрових струмів та перетворення електромагнітного поля в сигнал ПП та задовольняє нерівності (3).

Існує багато різноманітних ВСП, які розрізняються за різними класифікаційними ознаками, серед яких можна виділити такі [19]:

- параметричний – трансформаторний;
- абсолютний – диференційний – мультидиференційний;
- прохідний – накладний – комбінований;

Накладні ВСП розміщують поблизу поверхні ОК. Вони мають одну або декілька обмоток. Їх вісі розміщують нормально до поверхні ОК. Проте можливе і поздовжнє розміщення накладних ВСП, коли вісі котушок направлені вздовж поверхні ОК (поздовжні накладні ВСП).

Накладні ВСП дозволяють контролювати геометричні та електромагнітні параметри ОК складної форми. Котушки накладних ВСП можуть бути круглими коаксіальними, прямокутними, прямокутними хрестоподібними, зі взаємно-перпендикулярними вісями та інші [19].

Накладні ВСП виконують з феромагнітними осердями та без них. Завдяки феромагнітному осердю (часто феритовому) підвищується абсолютна чутливість до зміни контрольованих параметрів та формується електромагнітне поле заданої топології. При цьому осердя може бути спільним для обох обмоток, або роздільним, для кожної з обмоток, як збуджуючої так і вимірювальної. Дуже часто осердя використовують для локалізації магнітного поля з метою зменшення зони контролю та, відповідно, підвищення роздільної здатності.

Підвищити роздільну здатність згідно [21] можна також із застосуванням соленоїдних багатосекційних джерел магнітного поля із заданим розподіленням поля в об'ємі простору, проектування яких можна провести із застосуванням структурного синтезу, як наведено в [22], що реалізується за допомогою генетичного алгоритму.

У накладних ВСП локалізація магнітного поля реалізується також за допомогою концентратора у вигляді мідної пластини в якій концентруються вихрові струми, які витісняють магнітне поле в зону контролю. Застосовують також магнітопроводи спеціальної форми, отвори в не феромагнітному електропровідному екрані або коротко замкнутий виток на магнітопроводі [23].

Електромагнітне поле, яке взаємодіє з ОК, створюється за допомогою збуджуючої обмотки. Збуджуюча обмотка в параметричних ВСП одночасно використовується і як чутливий елемент. При цьому про параметри ОК судять з комплексного опору обмотки [4, 19].

В трансформаторних ВСП, крім збуджуючої обмотки є один або декілька чутливих елементів, що реєструють параметри електромагнітного поля. Зазвичай в якості чутливого елемента використовують вимірювальні обмотки. Як збуджуючі так і вимірювальні обмотки виконуються у вигляді котушок індуктивності або намотаних ізольованим про-

водом, або виконаних технологією друкованих плат [4, 23].

Останнім часом все ширше застосовують багатоелементні ВСП з котушками індуктивності, що виконані технологією друкованих плат. На базі таких ВСП можна побудувати багатоелементні ВСП у вигляді лінійок або матриць, забезпечуючи збільшення зони контролю [23], що дозволить виміряти розподіл АМК на випромінюючій поверхні УЗВ.

За способом зчитування інформації із зони контролю ВСП ділять на абсолютні та диференційні (мультидиференційні) [19]. В абсолютних ВСП вихідний сигнал визначається реакцією вихрових струмів з контрольованої ділянки та відповідає абсолютним параметрам ОК в зоні контролю. В диференційних (мультидиференційних) ВСП вихідний сигнал визначається різницею реакції вихрових струмів з сусідніх зон контрольованої ділянки. В простому випадку диференційний ВСП складається з двох ідентичних абсолютних ВСП в яких обмотки збудження ввімкнені послідовно узгоджено, а вимірювальні обмотки – зустрічно. Вихідний сигнал такого ВСП визначається різницею значень параметрів ОК, що вимірюються в зонах розміщення вимірювальних обмоток.

Параметричні ВСП знаходять застосування за рахунок своєї простоти та малих габаритів. Функціональні можливості трансформаторних ВСП перед параметричними полягають в їх більш високій температурній стабільності. Проте слід відзначити, що зміна сигналу, яка пов'язана зі зміною температури, носить плавний характер та легко придушується при виділенні імпульсів вихідної напруги.

Значно суттєвим є можливість використовувати в трансформаторних ВСП не співвісність збуджуючих та вимірювальних котушок (анаксіальні) [19]. При зміщенні вісі збуджуючої та вимірювальної обмоток досягають таких переваг, як підвищення чутливості, за рахунок підвищення густини вихрового струму на контролюючій ділянці; зниження неінформативних складових у вихідному сигналі ВСП за рахунок ослаблення магнітного зв'язку між збуджуючою та вимірювальною обмотками, а також між вимірювальною обмоткою та вихровими струмами в ОК; збільшення глибини контролю за рахунок зменшення затухання густини вихрових струмів від поверхні в зоні віддаленій від збуджуючої обмотки, що особливо важливо в дефектоскопії.

Слід відзначити, що затухання вихрових струмів визначається параметрами η та β , а

саме, зі збільшенням цих параметрів затування вихрових струмів зменшується, та наближається до затування в плоскій хвилі. Узагальнений параметр β – безрозмірна величина, що характеризує властивості ВСП, ОК або умови контролю [4] і визначається так:

$$\beta = R\sqrt{\omega\sigma\mu_r\mu_0}$$

Параметр η визначається так [4]:

$$\eta = P/R$$

де P – значення відстані від витка до ОК.

Крім достоїнств зазначених для ЄПП, слід відзначити широку можливість, вибором частоти струму живлення, збільшувати чутливість ВСП до певної контрольованої величини та зменшувати її по відношенню до інших величин, що діють на ВСП. Наприклад, підвищенням частоти живлення струму ВСП можна підвищити чутливість до АМК відносно електропровідної пластини та зменшити її до електропровідності матеріалу цієї пластини.

Серед недоліків слід відзначити, що в деяких випадках характеристики розглядуваних ВСП в незначно більшому ступені, ніж ємнісні, залежать від температури зовнішнього середовища [4, 23 – 25].

Вимірювання АМК можливо із застосуванням методів радіолокації. Такий метод полягає в опроміненні ОК високочастотними полями (електромагнітні, ультразвукові), в розглядуваному випадку ультразвуковими випромінюваннями в частотному діапазоні 115 кГц ... 2МГц і вище. Порівняння прямих та відбитих хвиль дозволяє встановити всю послідовність положення ОК в просторі та, таким чином, дослідити АМК ОК. Такий підхід, теоретично, дозволяє дослідити АМК в широкому частотному діапазоні. Верхній частотний діапазон АМК визначатиметься частотою випромінювання УЗВ ПП. Довжина хвилі ультразвукових полів зменшується з підвищенням частоти УЗВ ПП. В розглядуваному діапазоні довжин ультразвукової хвилі, режим роботи УЗВ ПП представляє собою область геометричної оптики. Отже, недоліки та переваги, які характерні для оптичного інтерференційного методу і описані вище, будуть характерними і для ультразвукового методу. А саме, підвищені вимоги до якості поверхні ОК, вимоги до стабільності параметрів навколишнього середовища (температура), оскільки вони визначають параметри ультразвукової хвилі. Застосування різних схем термокомпенсації дозволяє суттєво покращити якість вимірювання, проте призводить до ускладнення вимірювального пристрою.

Такі дестабілізуючі фактори як зміна базової відстані, зміна довжини ультразвукової хвилі, що обумовлені вібрацією кріплення УЗВ ПП, рухом повітря в акустичному тракту, зміною температури та іншими факторами призводять до дестабілізації робочої точки вимірювального тракту. Вплив зазначених факторів лежить в низькочастотному діапазоні ~20 Гц, тому їх легко усунути, наприклад застосуванням системи ФАПЧ.

Реалізований пристрій для вимірювання вібрації в частотному діапазоні до 20 кГц, діапазоні АМК 0.01 мкм..10 мм та робочою частотою випромінювання УЗВ ПП 250 кГц описано в роботі [26].

Відомостей щодо вимірювання АМК в частотному діапазоні до 100 кГц у автора не має, проте, як видно з вище наведеного, такий метод вимірювання АМК має перспективи.

Ще однією класифікаційною ознакою є спосіб отримання вимірювальної інформації, тобто прямий і непрямий метод вимірювання АМК УЗЧД. Вище розглянуто прямі методи вимірювання, коли вимірювальна інформація отримується безпосередньою взаємодією з вимірювальним параметром ОК. Непрямий метод полягає в залежності АМК УЗВ від будь-якого іншого параметру УЗВ, який певним чином пов'язаний з вимірювальним параметром УЗВ, наприклад, струму його живлення [27]. Такий метод можна математично описати так:

$$\xi = k_M(I_{\mathcal{E}} - I_0)$$

де k_M – коефіцієнт пропорційності, $I_{\mathcal{E}}$ – струм живлення, I_0 – струм зміщення.

Переваги цього методу очевидні, а саме, відсутність зовнішніх пристроїв, простота реалізації.

До недоліків слід віднести необхідність індивідуального налаштування, тобто визначення параметру k_M , зміну цього параметру під час технологічного процесу, що пов'язано зі зміною параметрів робочого середовища та параметрів матеріалу УЗВ під впливом температури.

Такий метод було реалізовано у Бійському технологічному інституті (Російська Федерація). Як показують проведені експерименти точність складає $\approx 10\%$.

На основі проведеного вище огляду методів вимірювання АМК УЗЧД було розроблено класифікаційну схему, яка зображена на рис. 7.

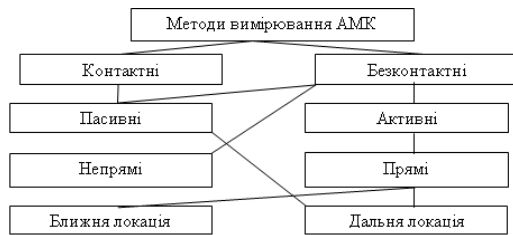


Рис. 7. Класифікація методів вимірювання АМК УЗЧД

Отже, проведено загальну класифікацію та огляд методів вимірювання АМК УЗЧД, яка спрощує вибір методу вимірювання АМК для конкретного ОК, виходячи з його геометричних та електрофізичних параметрів, умов проведення вимірювання.

Висновки

Запропоновано класифікацію та наведено короткий огляд методів вимірювання АМК УЗЧД, що дозволило провести узагальнення та вибрати вихрострумний метод для вимірювання АМК з метою його подальшого удосконалення та розробки універсальної методики вимірювання АМК УЗЧД. Конкретизовано визначення вихрострумного методу та наведено вираз, який дозволяє розмежувати індуктивні та вихрострумні ПП.

Вихрострумному методу, незважаючи на простоту реалізації як ПП так і вимірювального пристрою, характерні недоліки, які не дозволяють широко застосовувати його в практиці вимірювання АМК УЗЧД. Вирішення їх дозволить суттєво розширити діапазон застосування методу та розробити універсальну методику вимірювання АМК УЗЧД що і планується в подальшому зробити.

Література

- Leonov G. V., Khmelev V. N., Savin I. I. Automation of the amplitude measurement process of ultrasonic oscillatory systems irradiating surface. Biysk, // 6th International Siberian workshop and tutorial EDM'2005, session II, July 1-5, ERLAGOL, p.64-67
- Волковец А. И., Руденко Д. Ф., Гусинский А. В, Кострикин А. М. Радиоволновой бесконтактный метод измерения параметров движения вибрации. // Доклады БГУИР Октябрь-Декабрь 2007 №4(20), 58-64 с.
- Иорш Ю. И. Виброметрия. Измерение вибрации и ударов. Общая теория, методы и приборы. Москва 1963 – 773с.
- Дякин В. В., Сандовский В. А. Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей. – М.: Наука, 1981. – 137 с.
- Сандовский В. А., Дякин В. В., Дударев М. С. О частотной зависимости магнитной проницаемости при контроле накладными преобразователями. // Дефектоскопия 1997, №1, 63-66 с.
- Макаров Л. О. Акустические измерения в процессах ультразвуковой технологии, - М., Машиностроение, 1983
- Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон, П. Дегут. Датчики измерительных систем: // В 2-х книгах. Кн. 2 Перевод с франц. – М.: Мир, 1992. – 424 с., ил.
- Ланин В. Л., Дежкунов Н. В., Томаль В. С. Приборное обеспечение измерения параметров ультразвуковых воздействий в технологических процессах. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2008, №2, стр. 51 – 56.
- Поліщук Є. С., Дорожовець М. М., Івахів О. В. та ін. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: Підручник / За ред. проф. Є.С. Поліщука – Львів: Видавництво «Бескид Біт», 2008. – 618 с.
- Шмальгаузен В. И. Новые приборы и методы измерений. Интерферометры для изучения малых колебаний. // Успехи физических наук. т.132, вып.4 декабрь 1980г. стр. 679-684.
- P. Santoz, E. Carry, J.-M. Friedt, S. Ballandras Digital image processing for measuring 2D vibration amplitudes with subpixel resolution: application to the quartz tuning fork. Frequency Control Symposium, 2007 Joint with the 21st European Frequency and Time Forum. IEEE International. May 29 2007 – June 1 2007. p. 1225-1228.
- Барсуков Р. В., Савин А. Н., Цыганок С. Н., Хмелев В. Н. Исследование механических колебаний в системах с высокой добротностью методом оптического стробоскопического наблюдения. // Межвузовский сборник «Измерения, автоматизация и моделирования в промышленности и научных исследованиях», Бийск, 2001 г., стр. 224-229.
- Макаров Л. О. Акустические измерения в процессах ультразвуковой технологии. – М.: Машиностроение 1983.
- Патент Российской Федерации №2004132109, Способ измерения амплитуды колебаний излучающей поверхности ультразвуковой колебательной системы. В. Н. Хмелев, И. И. Савин, Р. В. Борсуков, С. Н. Цыганок, 2004

15. The patent of the Russian Federation №2292530, 2006. An expedient of measuring of a vibration amplitude // G. V. Leonov, V. N. Khmelev, I. I. Savin, D. S. Abramenko.
16. Соколов А. Н., Яцеев В. А. Волоконно-оптические датчики и системы: принципы построения, возможности и перспективы. // Измерительная техника №4, 2006, стр. 42-44.
17. Горбовой Г. М. Приборы контроля линейных перемещений на основе бесконтактных электроемкостных трехэлектродных первичных измерительных преобразователей. Дисс. д.т.н. 2006, стр.
18. В. И. Смирнов Методы и средства функциональной диагностики и контроля технологических процессов на основе электромагнитных датчиков / Ульяновский государственный технический университет. - Ульяновск: УлГТУ, 2001, - с. 190.
19. В. Н. Учанин Вихретоковые накладные преобразователи: расширенная классификация, сравнительный анализ и характерные примеры реализации (Обзор). // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2010, №4, с. 24 – 30.
20. В. А. Викторов, Б. В. Лункин, А. С. Совлуков. Высокочастотный метод измерения неэлектрических величин. – М. 1973.
21. М. А. Воробьев Интеллектуальная система компьютерного проектирования соленоидальных многосекционных источников магнитных полей с заданным распределением поля в объеме пространства. // Искусственный интеллект. 2004, №1, стр. 144 – 151.
22. А. К. Павлов, В. Я. Гальченко Информационные модели для проектирования источников магнитных полей. // Информационные технологии. 2002, №7, стр. 47 – 53.
23. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник/ В. В. Ключев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев и др.; Под ред. В. В. Ключева. 3-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
24. В. Г. Герасимов, Ю. А. Останин, А. Д. Покровский. и др. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами – М.: Энергия, 1978. – 216 с., ил.
25. Б. А. Агранат, В. И. Башкиров, Ю. И. Китайгородский, Н. Н. Хавский Ультразвуковая технология. // под ред. докт. техн. наук проф. Б. А. Аграната – Москва «Металлургия» 1974. – стр. 504.
26. В. В. Казаков Ультразвуковой фазовый измеритель вибраций для задач вибрационной диагностики. // Датчики и системы. 2009, №11 (126), стр. 39 – 42.
27. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. // И. П. Голямина. – М.: Издат. «Советская энциклопедия», 1979, – 400 с.