

НОВИЙ ПІДХІД ЩОДО ПОБУДОВИ БАГАТОЕЛЕМЕНТНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ ВИХРОСТРУМОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ОДНОКАНАЛЬНИХ ДЕФЕКТОСКОПІВ

В.Г. Рибачук, В.М. Учанін

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: vuchanin@gmail.com

Запропоновано новий підхід щодо побудови багатоелементних параметричних вихрострумівих перетворювачів для роботи з одноканальними вихрострумівими дефектоскопами. На прикладі чотирьохелементного перетворювача з лінійним розміщенням обмоток показано ефективність даного класу вихрострумівих перетворювачів для виявлення коротких тріщин у виробів із алюмінієвих та титанових сплавів. Досліджено вплив відстані між обмотками на індуктивність та чутливість багатоелементного вихрострумівого перетворювача. Бібліогр. 17, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: багатоелементний вихрострумівий перетворювач, вихрострумівий дефектоскоп, обмотка індуктивності, індуктивність, електричний опір, стандартний зразок, тріщина, годограф, комплексна площина

Вихрострумівий метод має велике значення для неруйнівного контролю конструкцій [1–5]. При цьому часто виникає необхідність у виявленні дефектів у виробів з великою площею поверхні. Сканування такої поверхні вихрострумівими перетворювачами (ВСП) у ручному режимі є трудомістким і малопродуктивним процесом з великою ймовірністю пропуску дефекта. Можливим рішенням цієї проблеми є використання багатоелементних ВСП, при якому здійснюють послідовне опитування елементів ВСП шляхом їх почергового підключення до дефектоскопа за допомогою комутатора (мультиплексора). Такий підхід реалізовано в спеціалізованих багатоканальних дефектоскопах, серед яких найвідоміші дефектоскопи американської фірми OLYMPUS і канадської фірми EDDYFI [6–12]. Недоліком такої апаратури є висока ціна, що суттєво обмежує її використання. Інший підхід полягає у одночасному опитуванні всього масиву елементів багатоелементного ВСП. Такий підхід можна використовувати, коли відсутня необхідність визначати координати виявленого дефекту (необхідно тільки виявити його).

Поставлено задачу розробити принципи побудови багатоелементних параметричних ВСП, придатних для застосування з одноканальними дефектоскопами. Використання таких ВСП під час обстеження виробів з великою площею поверхні дозволить суттєво підвищити продуктивність контролю.

Принцип побудови багатоелементних параметричних ВСП для роботи з одноканальними вихрострумівими дефектоскопами. Для роботи з одноканальними дефектоскопами імпеданс багатоелементного ВСП (БВСП) має бути близь-

ким (а в ідеальному випадку рівним) до імпедансу окремого елемента. Це дозволяє його роботу на частоті, яка визначена як оптимальна для одноелементного ВСП, що важливо для реалізації резонансного або автогенераторного режимів вихрострумівого контролю [2].

За відсутності взаємної індукції еквівалентні параметри послідовно та паралельно з'єднаних n ідентичних обмоток підпорядковуються наступним співвідношенням [13]: еквівалентна індуктивність $L_{\text{екв}} = nL$ та еквівалентний активний опір $R_{\text{екв}} = nR$ для послідовного з'єднання і, відповідно, $L_{\text{екв}} = L/n$ та $R_{\text{екв}} = R/n$ для паралельного з'єднання (L та R – індуктивність та активний опір однієї обмотки). Ідентичність електричних параметрів (індуктивності і активного електричного опору) БВСП параметрам однієї окремої обмотки можна досягнути комбінацією послідовного та паралельного з'єднання обмоток БВСП таким чином, щоб збільшення індуктивності і активного опору послідовно з'єднаних обмоток компенсувалося зменшенням їх за рахунок паралельного включення. Для цього всю сукупність обмоток БВСП необхідно розділити на окремі групи. Спосіб з'єднання обмоток в межах усіх груп повинен бути однаковим (послідовним або паралельним), а групи з'єднуються між собою також однаковим чином, причому спосіб їх з'єднання повинен бути протилежним способу з'єднання обмоток у групах. Очевидно, що при цьому кількість обмоток у групах та кількість груп повинні бути однаковими. Це накладає певні обмеження на загальну кількість обмоток БВСП. Мінімальна кількість обмоток такого БВСП дорівнює чотирьом, тобто маємо у складі дві групи по дві обмотки. Узагальнюючи можна сказати, що загальна кількість

n ідентичних індуктивних обмоток БВСП повинна задовільняти умові $n = k^2$ (k – довільне натуральне число більше одиниці; за $k = 1$ маємо одноелементний ВСП). Вся сукупність обмоток БВСП розбита на k груп по k індуктивних обмоток у групі. Причому обмотки кожної групи з'єднані між собою послідовно (паралельно) та усі групи обмоток з'єднано паралельно (послідовно) [14]. Такі БВСП можна підключати до одноканальних вихрострумів дефектоскопів і працювати на робочій частоті, яка є оптимальною для роботи окремої індуктивної обмотки.

Можливі два варіанти з'єднання обмоток БВСП. Розглянемо їх на прикладі БВСП, що складається із дев'яти елементів (тобто для випадку $k = 3$) [14]. При першому варіанті (рис. 1, а) сукупність із дев'яти ідентичних обмоток розбивається на три групи по три обмотки у кожній. Тут L_{11}, L_{12}, L_{13} – індуктивні обмотки першої групи; L_{21}, L_{22}, L_{23} – індуктивні обмотки другої групи; L_{31}, L_{32}, L_{33} – індуктивні обмотки третьої групи. Індуктивні обмотки кожної групи з'єднані послідовно, а між собою усі три групи з'єднані паралельно. Еквівалентна індуктивність першої групи індуктивних обмоток становить $L_1 = L_{11} + L_{12} + L_{13} = 3L$ (де L – індуктивність окремої обмотки). Аналогічно індуктивності обмоток другої і третьої груп будуть також дорівнювати $L_2 = L_3 = 3L$. Еквівалентна індуктивність дев'ятиелементного параметричного БВСП, який складається із трьох паралельно з'єднаних груп обмоток з індуктивностями $L_1 = L_2 = L_3 = 3L$ дорівнює $L_{\text{ВСП}} = L$. Таким чином, загальна еквівалентна індуктивність дев'ятиелементного ВСП (рис. 1, а) дорівнює індуктивності однієї окремої обмотки. Подібним чином можна показати, що еквівалентний електричний опір цього БВСП дорівнює $R_{\text{ВСП}} = R$.

Другий варіант з'єднання обмоток дев'ятиелементного параметричного БВСП (рис. 1, б) відрізняється від першого іншим складом груп та способом з'єднання обмоток в межах груп та новоутворених груп між собою. Тут першу групу утворюють обмотки L_{11}, L_{21} і L_{31} ; другу – обмотки L_{12}, L_{22} і L_{32} ; третю – обмотки L_{13}, L_{23} і L_{33} . Індуктивні обмотки в межах кожної з цих трьох груп з'єднані паралельно, а між собою усі три групи з'єднані послідовно. Можна показати, що і для цього варіанту з'єднання обмоток еквівалентні індуктивність та електричний опір дев'ятиелемент-

ного параметричного БВСП дорівнюють $L_{\text{ВСП}} = L$ та $R_{\text{ВСП}} = R$, відповідно.

Взаємне просторове розміщення обмоток у БВСП вибирають залежно від форми дефектів, які підлягають виявленню, а також від заданої чутливості та локальності контролю. Обмотки можуть розташовуватися в один ряд або у декілька рядів (наприклад, у шаховому порядку). Для забезпечення суцільного контролю ділянки поверхні виробу та запобігання пропуску дефектів необхідно, щоб робочі зони контролю його елементів (обмоток) перекривалися.

Досліджувані ВСП, зразки з дефектами, прилади контролю та методика експерименту. Для дослідження запропонованих БВСП були виготовлені два чотирихелементні параметричні накладні БВСП (за № 1 і № 2) та одноелементний ВСП з однаковими конструктивними параметрами обмоток. Кожна обмотка налічує 26 витків проводу діаметром 0,07 мм, намотаних на феритових осердях діаметром 1,2 мм та довжиною 6 мм. Довжина обмоток – 2,2 мм, відстань від робочого торця осердя до обмотки 0,08 мм. У обох БВСП обмотки встановлено лінійно в один ряд, але у БВСП № 1 вони стояли впритул, а у БВСП за № 2 – рознесені на відстань 1,2 мм (відповідає діаметру феритових осердь).

Для досліджень використано стандартні зразки (СЗ) з поверхневими дефектами із алюмінієвого сплаву Д16 та титанового сплаву ВТЗ. Два з них призначені для імітування тріщин довжиною 2 мм, розкриттям 0,1 мм та глибиною 0,2 мм і 0,5 мм (для алюмінієвого сплаву) та 0,5 мм (для титанового сплаву). Поверхневі штучні дефекти нанесено електророзрядним методом. Третій зразок із алюмінієвого сплаву Д16 містить свердлення діаметром 0,5 мм та глибиною 0,5 мм. Під час дослідження взаємного впливу обмоток БВСП використовували четвертий СЗ зі сталі 45 без дефекту.

Для дослідження сигналів від дефектів використовували універсальний вихрострумівий дефектоскоп Eddyson С [15, 16] у резонансному режимі. БВСП під'єднували до дефектоскопа і переводили останній у резонансний режим роботи з параметричними ВСП (режим «Single»). Після цього відводили БВСП у повітря та здійснювали автоматичний підбір конденсатора резонансного контуру (клавіша «AUTO ADJUST»). По завершенню цієї процедури ВСП встановлювали на бездефектну ділянку поверхні СЗ і проводили його балансування (кла-

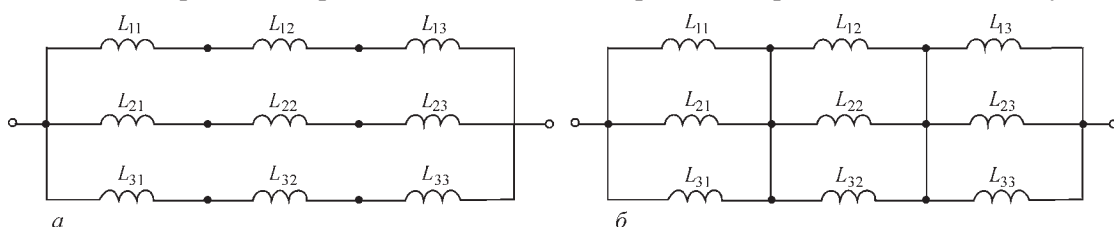


Рис. 1. Варіанти схем з'єднання обмоток дев'ятиелементного параметричного БВСП

Індуктивності одноелементного та чотирьохелементних параметричних ВСП

Режим роботи	Індуктивність, мкГн		
	Одноелементний ВСП	Чотирьохелементний ВСП № 1	Чотирьохелементний ВСП № 2
ВСП у «повітрі»	4,7	8,2	4,7
ВСП на СЗ із алюмінієвого сплаву	4,4	8,0	4,4
ВСП на СЗ зі сталі 45	8,5	11,4	9,5

віша «NULL»). Після цього здійснювали сканування поверхні СЗ в зоні дефекту та реєстрували сигнали від дефекту в комплексній площині на екрані дефектоскопу. Фазу опорної напруги підбирали таким чином, щоб годограф сигналу, викликаний зміною зазору між БВСП та поверхнею СЗ, змінювався по горизонтальній осі. Основні параметри контролю під час експериментів наступні: робоча частота – 1 МГц; попереднє підсилення – 6 дБ; підсилення – 8 дБ (при дослідженні чутливості до локальних дефектів – 10 дБ); вертикальне підсилення – 18 дБ (при дослідженні чутливості до локальних дефектів – 20 дБ); амплітуда напруги збудження генератора дефектоскопа – 2 В. Вимірювання індуктивності обмоток БВСП здійснювали приладом типу МТ4080D на частоті 10 кГц та напрузі збудження 1 В.

Результати дослідження чотирьохелементних параметричних БВСП. Розглянутий вище принцип роботи БВСП не враховує взаємного впливу сусідніх обмоток, який відчутний за малої відстані між ними. Для оцінки цього впливу на параметри БВСП проведено вимірювання індуктивностей БВСП з різною відстанню між обмотками (№ 1 і № 2) та індуктивності одноелементного ВСП під час розміщення їх у повітрі, на бездефектних ділянках СЗ із алюмінієвого сплаву Д16 і сталі 45. Результати подано в таблиці.

Аналіз даних таблиці свідчить, що відстань між обмотками чотирьохелементних ВСП суттєво впливає на їх основний електричний параметр – індуктивність. Зокрема для БВСП з обмотками, розміщеними впритул одна до одної (№ 1), індуктивність у повітрі у 1,7 рази перевищує індуктивність одноелементного ВСП. Під час встановлення ВСП на СЗ із алюмінієвого сплаву Д16 це перевищення становить 1,8 рази, а при встановленні на СЗ зі сталі 45 – 1,3 рази. Для багатоеlementних параметричних ВСП, обмотки яких мають сильний індуктивний зв'язок, еквівалентна індуктивність суттєво перевищує індуктивність окремого елемента, тобто співвідношення $L_{\text{ВСП}} = L$ не виконується. Тому їх застосування разом з одноканальними вихрострумовими дефектоскопами може вимагати суттєвого переналаштування останніх. Особливо це стосується дефектоскопів автогенераторного типу. Проте зі збільшенням відстані між обмотками зв'язок між ними суттєво послаблюється. Так, індуктивність чотирьохелементного ВСП № 2, обмотки якого рознесено на 1,2 мм, дорівнює індуктивності од-

ноелементного ВСП за їх розміщення у повітрі та на СЗ із алюмінієвого сплаву Д16. І тільки під час встановлення на СЗ зі сталі 45 індуктивність чотирьохелементного ВСП № 2 є більша у 1,1 рази за індуктивність одноелементного, що можна пояснити посиленням індуктивного зв'язку між обмотками за рахунок магнітних властивостей сталі. Таким чином, можна вважати, що умова ідентичності електричних параметрів БВСП параметрам одноелементного ВСП (окремого елемента) виконується шляхом рознесення обмоток на відстань, співмірну або більшу за діаметр осердь, на яких вони намотані.

Дослідження сигналів БВСП від дефектів здійснювали шляхом сканування СЗ перпендикулярно до напрямку тріщини за трьох варіантів взаємного положення її відносно обмоток ВСП. Під час сканування за варіантом 1 центр ВСП проходить над серединою тріщини (рис. 2). Під час сканування за варіантом 2 над тріщиною проходять дві крайні обмотки 3 і 4. Під час сканування за варіантом 3 над тріщиною проходить тільки одна крайня обмотка 4. Годографи сигналів від тріщин у СЗ із алюмінієвого та титанового сплавів, отримані з БВСП № 1, подано на рис. 3.

Представлені результати показують високу чутливість розробленого БВСП до дефектів в алюмінієвому та титановому сплавах за різних варіантів сканування з можливістю виділення сигналів від дефектів на фоні завад, пов'язаних зі зміною зазору, за рахунок різного напрямку відповідних годографів. Сигнали від тріщин в алюмінієвому СЗ розміщені у другому квадранті комплексної площини (рис. 3, а, в, д), а від тріщини у титановому СЗ – у третьому квадранті під час сканування за варіантом 1 (рис. 3, б) та у друго-

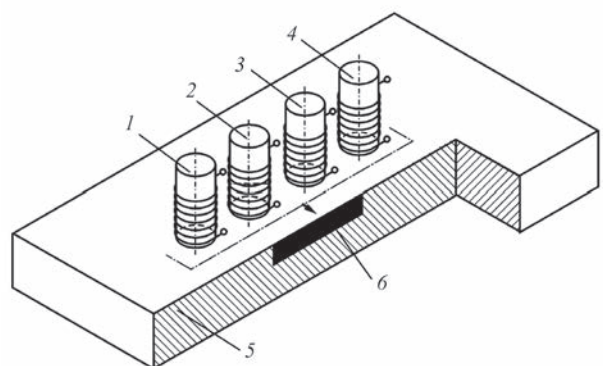


Рис. 2. Схема контролю БВСП: 1–4 – індуктивні обмотки; 5 – СЗ; 6 – тріщина

му квадранті під час сканування за варіантами 2 (рис. 3, *з*) і 3 (рис. 3, *е*). Годографи від зміни зазору орієнтовані в горизонтальному напрямку. Кут між годографами сигналів від дефектів і від зміни зазору дорівнює приблизно 75° , що дозволяє їх легко розрізняти. За амплітудою сигнали від тріщини меншої глибини (0,2 мм) в алюмінієвому СЗ та тріщини більшої глибини (0,5 мм) у титановому СЗ під час сканування за варіантами 1 (рис. 3, *а*, *б*) та 3 (рис. 3, *д*, *е*) практично однакові. Під час сканування за варіантом 2 співвідношення між амплітудами сигналів від вказаних дефектів збільшується до 1,2 разів на користь сигналу від тріщини у алюмінієвому СЗ (рис. 3, *в* годограф 1, *з*). Тобто чутливість до дефекту у титановому СЗ є меншою, що можна пояснити суттєво меншою електропровідністю титанового сплаву.

Під час сканування СЗ за варіантом 2 (рис. 3, *в*, *з*) амплітуда сигналів від дефектів збільшується порівняно зі скануванням за варіантом 1 (рис. 3, *а*, *б*). Для тріщин в алюмінієвому СЗ чутливість зростає майже удвічі, а для тріщин у титановому СЗ – приблизно у 1,5 рази. Форма годографів та їх орієнтація для алюмінієвого СЗ є аналогічною варіанту сканування 1. Для сигналу від тріщини у титановому СЗ (рис. 3, *з*) годограф зміщується у

другий квадрант комплексної площини і в цьому відношенні стає подібними до годографів, отриманих на алюмінієвому СЗ. Під час сканування за варіантом 3 сигнал від однієї і тієї ж тріщини в СЗ із алюмінієвого сплаву (рис. 3, *д*) є несуттєво менший за амплітудою, ніж для 1-го варіанту сканування (рис. 3, *а*). Сигнал від тріщини у титановому СЗ (рис. 3, *е*) за амплітудою є практично ідентичним до сигналу, отриманого за 1-го варіанту сканування (рис. 3, *б*).

Максимуми амплітуд, наведених на рис. 3 сигналів, відповідають положенню, коли центри обмоток чотирьохелементного ВСП знаходяться над тріщинами. Співвідношення між ними добре узгоджуються з відомими розрахунками модуля внесеного імпедансу однообмоточного параметричного ВСП від тріщин різної довжини [17]. При цьому враховано, що приведена довжина тріщин $l'_{тр} = l_{тр} / D_c$ (де $l_{тр}$ – довжина тріщини; D_c – середній діаметр обмотки) дорівнює 1,67 (вважаємо, що D_c співпадає з діаметром феритового осердя і становить 1,2 мм).

Для оцінки впливу відстані між елементами на чутливість до локальних дефектів досліджено сигнали чотирьохелементних ВСП з різним рознесенням обмоток (№ 1 і № 2) від свердлення в алюмінієвому СЗ за різного взаємного положення дефекту та обмоток ВСП у процесі сканування. Це важливо для оцінювання потенційної небезпеки пропуску локального дефекту під час використання БВСП з рознесеними обмотками. Результати у вигляді відповідних годографів сигналів від дефекту подано на рис. 4. Їх аналіз показує, що для всіх досліджених варіантів взаємного положення дефекту та обмоток, чотирьохелементний ВСП № 1 з обмотками, встановленими впритул (рис. 4, *а*, *в*, *д*, *е*), має більшу чутливість, ніж чотирьохелементний ВСП № 2 з рознесеними обмотками (рис. 4, *б*, *г*, *е*, *ж*). Проте і для другого варіанта конструкції чотирьохелементного ВСП сигнал від зазначеного дефекту є достатнім для його надійного виявлення. Максимальна чутливість до локального дефекта досягається, коли в процесі сканування над ним проходить стик (або проміжок) між однією з крайніх та сусідньою центральною обмотками чотирьохелементних ВСП (рис. 4, *д*, *е*). Вона зменшується у 1,4 рази, коли над дефектом проходить стик (проміжок) між центральними обмотками ВСП (рис. 4, *е*, *ж*). Чутливість до локальних дефектів є найменшою (у 2,5 рази порівняно з максимальним значенням), коли безпосередньо над дефектом проходить одна з крайніх обмоток чотирьохелементних ВСП (рис. 4, *в*, *з*). Але і в цьому випадку сигнал є достатнім для надійного виявлення дефекту навіть для конструкції з рознесеними обмотками (рис. 4, *з*).

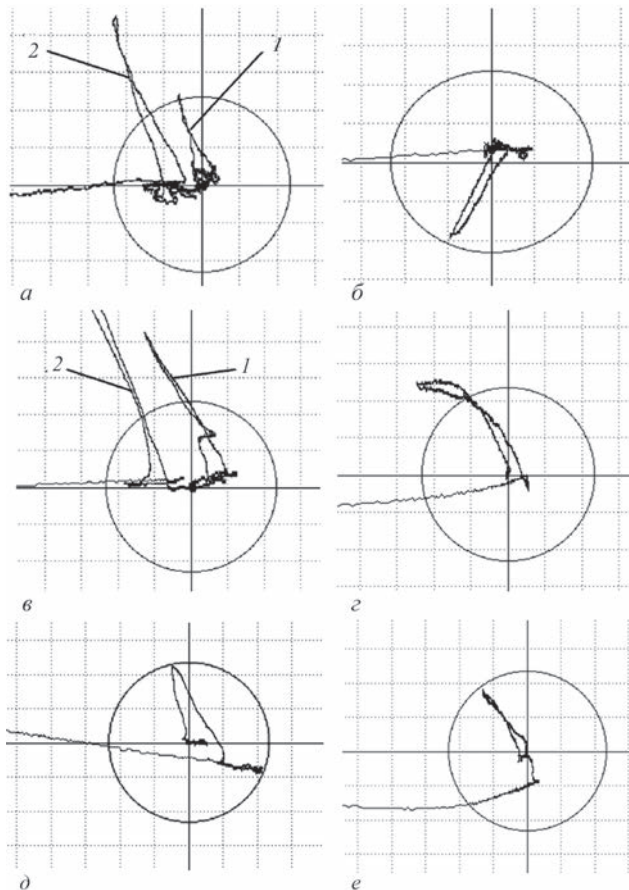


Рис. 3. Годографи сигналів чотирьохелементного ВСП від дефектів типу тріщини глибиною 0,2 мм (1) і 0,5 мм (2) в алюмінієвому сплаві (*а*, *в*, *д*) та глибиною 0,5 мм в титановому сплаві (*б*, *г*, *е*) для варіантів сканування 1 (*а*, *б*), 2 (*в*, *з*) і 3 (*д*, *е*)

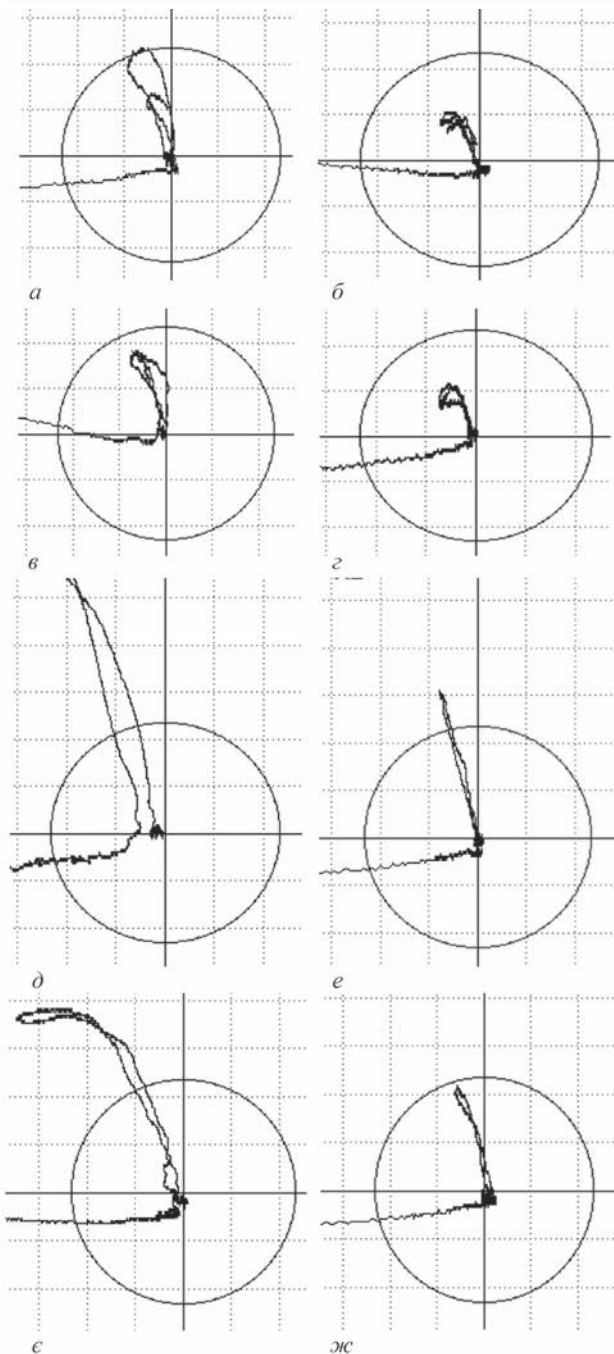


Рис. 4. Годографи сигналів БВСП № 1 (а, в, д, ж) та № 2 (б, г, е, ж) від свердлення, коли над дефектом проходить одна із центральних обмоток (а, б); одна із крайніх обмоток (в, г); стик між крайньою та сусідньою центральною обмотками (д, е) і проміжок між крайньою та сусідньою центральною обмотками (ж, з)

Висновки

Запропоновано принцип побудови параметричних БВСП для роботи з одноканальними вихрострумовими дефектоскопами. Встановлено, що для забезпечення еквівалентності електричних параметрів БВСП електричним параметрам параметричного ВСП з однією обмоткою необхідно, щоб загальна кількість n їх ідентичних індуктивних обмоток задовільняла умові $n = k^2$, (k – довільне натуральне число більше 1), а вся сукупність з

n обмоток була розбита на k груп по k індуктивних обмоток у кожній групі. Характер з'єднання обмоток між собою у межах всіх груп повинен бути однаковим (послідовний або паралельний) і протилежним характеру з'єднання між групами. Встановлено, що збільшення відстані між обмотками до величини, співмірної з їх діаметром, дозволяє усунути взаємний вплив між ними.

Експериментально досліджено чотирьохелементний БВСП ($k = 2$) з лінійним розміщенням обмоток. Показано його високу чутливість до коротких тріщин та локальних дефектів у виробках із алюмінієвих та титанових сплавів. Чутливість найбільша, коли під час сканування БВСП проходить над дефектом двома крайніми обмотками. Коли над дефектом проходить тільки одна з крайніх обмоток, чутливість зменшується у 2,5 рази відносно максимальної, але залишається достатньою для його надійного виявлення.

Список літератури

1. Libby H.L. (1971) *Introduction to electromagnetic nondestructive test methods*. New-York, Wiley Interscience.
2. Дорофеев А.Л., Казамапов Ю.Г. (1980) *Электромагнитная дефектоскопия*. Москва, Машиностроение.
3. Герасимов В.Г., Клюев В.В., Шатерников В.Е. (1983) *Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий*. Москва, Энергоатомиздат.
4. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. (1992) *Не разрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль: Практ. пособие*. Сухоруков В.В. (ред.). Москва, Высшая школа.
5. Учанін В.М. (2013) *Вихрострумові накладні перетворювачі подвійного диференціювання*. Львів, Сполом.
6. Gramz M., Stepinski T. (1994) Eddy current imaging array sensors and flaw reconstruction. *Research in Nondestructive Evaluation*, 5, 3, 157–174.
7. Hardy F., Samson R. (2002) *Eddy current probe with multi-use coils and compact configuration*, USA, Pat. № 6344739, G01N27/90.
8. Decure J.-M., Premel D., Manganet G. et. al. (2006) Flexible EC array probe for the inspection of complex parts developed within the European VERDICT Project. *9th Europ. Conf. on Non-destructive Testing. Berlin, 2006*.
9. Mook G., Michel F., Simonin J. (2008) Electromagnetic imaging using ptobe arrays. *17th World Conf. on Non-destructive Testing. Shanghai, 2008*.
10. Bureau J.-F., Ward R.C., Julien A. (2012) Application of eddy current array technology to surface inspection. *18th World Conference on Nondestructive Testing. Durban (South Africa), 2012*.
11. (2017) International Standard ISO 20339:2017 (E). *Non-destructive testing. Equipment for eddy current examination: Array probes characteristics and verification*. Geneva, ISO/TC 135/SC 4.
12. Учанін В.М. (2018) Пропозиції щодо вдосконалення класифікації вихрострумових перетворювачів. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 68–74.
13. Калантаров П.Л., Нейман Л.Р. (1948) *Теоретические основы электротехники. В 3-х частях. Ч. 2. Теория переменных токов*. Ленинград–Москва, Гос. энерг. изд-во.
14. Учанін В.М., Рибачук В.Г., Кириченко І.І., Дереча В.Я., Семенець О.І. (2018) *Накладний багатоелементний вихрострумовий перетворювач*. Заявка на винахід № а 2018 07627.
15. Uchanin V., Lutsenko G., Opanasenko A., Dzhaganian A. (2016) PROMPRYLAD Family of Eddy Current Flaw

- Detectors – From Simple to more Complicated. *19th World Conf. on Non-destructive Testing. Munich, 2016.*
16. (2014) *Дефектоскоп вихретоковый «Eddycon C»*. Руководство по эксплуатации. ЕС.14327992.01.13 РЭ. Киев, ООО «Ультракон-сервис».
 17. Учанін В.М. (2007) Особливості просторового розподілу сигналу вихреструмового перетворювача від тріщин різної довжини. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **4**, 121–124.
- References**
1. Libby, H.L. (1971) *Introduction to electromagnetic nondestructive test methods*. New-York, Wiley Interscience.
 2. Dorofeev, A.L., Kazamanov, Yu.G. (1980) *Electromagnetic flaw detection*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 3. Gerasimov, V.G., Klyuev, V.V., Shaternikov, V.E. (1983) *Methods and devices of electromagnetic testing of industrial products*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
 4. Gerasimov, V.G., Pokrovsky, A.D., Sukhorukov, V.V. (1992) *Nondestructive testing*. In: 5 books. Book 3: Electromagnetic testing. Pract. manual. Ed. by V.V. Sukhorukov. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
 5. Uchanin, V.M. (2013) *Eddy current put-on double differentiation transducers*. Lviv, Spolom [in Ukrainian].
 6. Gramz, M., Stepinski, T. (1994) Eddy current imaging array sensors and flaw reconstruction. *Research in Nondestructive Evaluation*, **5(3)**, 157–174.
 7. Hardy, F., Samson, R. (2002) *Eddy current probe with multi-use coils and compact configuration*, USA, Pat, № 6344739, G01N27/90.
 8. Decure, J.-M., Premel, D., Mangenet, G. et. al. (2006) Flexible EC array probe for the inspection of complex parts developed within the European VERDICT Project. *In: Proc. of 9th Europ. Conf. on Non-destructive Testing. Berlin, 2006.*
 9. Mook, G., Michel, F., Simonin, J. (2008) Electromagnetic imaging using probe arrays. *In: Proc. of 17th World Conf. on Non-destructive Testing. Shanghai, 2008.*
 10. Bureau, J.-F., Ward, R.C., Julien, A. (2012) Application of eddy current array technology to surface inspection. *In: Proc. of 18th World Conf. on Nondestructive Testing. Durban (South Africa), 2012.*
 11. (2017) International Standard ISO 20339:2017 (E): *Non-destructive testing. Equipment for eddy current examination: Array probes characteristics and verification*. Geneva, ISO/TC 135/SC 4.
 12. Uchanin, V.M. (2018) Propositions on improvement of the classification of eddy current transducers. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 68–74 [in Russian].
 13. Kalantarov, P.L., Nejman, L.R. (1948) *Theoretical principles of electrical engineering*. In: 3 Pts. Pt 2: Theory of alternating currents. Leningrad-Moscow, Gos.Energ. Izd-vo [in Russian].
 14. Uchanin, V.M., Rybachuk, V.G., Kyrychenko, I.I., Derecha, V.Ya., Semenets, O.I. (2018) *Put-on multielement eddy current transducer*. Applic. No. a 2018 07627 [in Ukrainian].
 15. Uchanin, V., Lutsenko, G., Opanasenko, A., Dzhaganian, A. (2016) PROMPRYLAD family of eddy current flaw detectors – from simple to more complicated. *In: Proc. of 19th World Conf. on Non-destructive Testing. Munich, 2016.*
 16. (2014) *Eddy current flaw detector «Eddycon C»*. Operating instructions. ES.14327992.01.13 RE. Kiev, LLC Ultracon-service [in Russian].
 17. Uchanin, V.M. (2007) Features of spatial distribution of eddy current transducer signal from cracks of different length. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, **4**, 121-124 [in Ukrainian].

НОВЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОДНОКАНАЛЬНЫХ ДЕФЕКТОСКОПОВ

В.Г. Рыбачук, В.Н. Учанин

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенко НАН України. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5.
E-mail: vuchanin@gmail.com

Предложен новый подход к построению многоэлементных параметрических вихретоковых преобразователей для работы с одноканальными вихретоковыми дефектоскопами. На примере четырехэлементного преобразователя с линейным размещением обмоток показана эффективность данного класса вихретоковых преобразователей для выявления коротких трещин в изделиях из алюминиевых и титановых сплавов. Исследовано влияние расстояния между обмотками на индуктивность и чувствительность многоэлементного вихретокового преобразователя. Библиогр. 17, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: многоэлементный вихретоковый преобразователь, вихретоковый дефектоскоп, обмотка индуктивности, индуктивность, электрическое сопротивление, стандартный образец, трещина, годограф, комплексная плоскость

NEW APPROACH TO DESIGNING MULTIELEMENT PARAMETRIC EDDY CURRENT TRANSDUCERS FOR SINGLE-CHANNEL FLAW DETECTORS

V.G. Rybachuk, V.M. Uchanin

G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine. 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.
E-mail: vuchanin@gmail.com

A new approach is proposed to designing multielement parametric eddy current transducers for operation with single-channel eddy-current flaw detectors. Four element transducer with linear arrangement of the windings is used as an example to show the effectiveness of this class of eddy current transducers for detection of short cracks in products from aluminium and titanium alloys. The influence of winding spacing on inductance and sensitivity of multielement eddy current transducer was studied. 17 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

Keywords: multielement eddy current transducer, eddy current flaw detector, inductance winding, inductance, electric resistance, standard sample, crack, hodograph, complex plane

Надійшла до редакції
01.07.2019