

Юрій ХОМЯК, Микита НОСКОВ

Україна, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ПАРАМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ОРТОГОНАЛЬНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТОВЩИНИ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПОКРИТТІВ

Проведено параметричний аналіз ортогонального вихрострумowego перетворювача для контролю товщини діелектричних покриттів на електропровідній основі. Розглянуто вплив частоти збудження, зазору між перетворювачем і поверхнею об'єкта контролю, а також геометричних розмірів перетворювача на амплітуду вихідного сигналу та співвідношення сигнал/шум. Показано, що інформативний сигнал формується внаслідок зміни електромагнітного зв'язку між замкненими контурами збуджувальної та приймальної обмоток і провідною основою через діелектричний шар. Експериментально встановлено, що нормовані градувальні характеристики, отримані для різних частот, мають близьку форму, а найбільша чутливість спостерігається при малих зазорах. За результатами вимірювань обґрунтовано раціональність діапазону частот 200–400 кГц для перетворювачів більших розмірів та показано, що верхня межа контрольованої товщини визначається шириною робочої зони перетворювача.

Ключові слова: вихрострумний контроль, діелектричне покриття, товщинометрія, ортогональний перетворювач, зазор, сигнал/шум.

Контроль товщини діелектричних покриттів на електропровідних основах є важливим для забезпечення довговічності та надійності виробів у машинобудуванні, авіації, енергетиці та транспорті. Покриття (лакофарбові, полімерні, оксидні, композиційні) виконують захисну та функціональну ролі, а їхня товщина визначає ефективність цих властивостей. Відхилення від нормативних значень призводить до погіршення експлуатаційних характеристик і перевитрати матеріалів [1].

Перспективним методом контролю покриттів є вихрострумний, який характеризується безконтактністю, швидкодією, чутливістю до змін електромагнітних параметрів об'єкта контролю та придатністю до автоматизації. Вихрострумові методи ефективні для контролю покриттів — як діелектричних, так і електропровідних, а також параметрів самих провідних матеріалів [1]–[3]. Водночас через те, що в процесі вимірювання товщини непровідних покриттів сигнал формується опосередковано за зміною умов індукції вихрових струмів у провідній основі, результати залежать від частоти, властивостей матеріалу, геометрії котушок, зазору та рівня шумів [2], [3].

У роботах [1], [4]–[6] розглянуто підходи до підвищення точності вихрострумовой товщинометрії, зокрема багатопараметричну обробку сигналів і багаточастотні режими збудження. Встановлено, що на результати вимірювання істотно впливають зазор (*lift-off*), електромагнітні властивості основи та частота сигналу.

Перспективним напрямом є застосування ортогональних та обертових конфігурацій котушок [7]–[9], які зменшують паразитний зв'язок між обмотками та підвищують чутливість. У роботі [10] показано зростання селективності сигналу у разі використання ортогональних структур. Разом з тим, на характеристики поля та точність вимірювання суттєво впливають геометричні параметри перетворювача [11], [12].

Отже, щоб зробити вимірювання товщини покриттів точнішими та надійнішими, необхідно оптимізувати геометричні параметри ортогональних вихрострумowych перетворювачів (ВСП), удосконалити конфігурацію котушок та врахувати їхній вплив на характеристики поля й селективність сигналу.

Метою цієї роботи було встановлення закономірностей впливу частоти збудження, зазору та геометричних параметрів ортогонального вихрострумowego перетворювача на амплітуду вихідного сигналу і співвідношення сигнал/шум для вибору раціональних режимів контролю товщини діелектричних покриттів на електропровідних основах.

Досягнення мети передбачало розв'язання таких завдань: визначення залежностей амплітуди сигналу від зазору для різних матеріалів основи; нормування отриманих характеристик для коректного порівняння; оцінювання частотної залежності співвідношення сигнал/шум; встановлення впливу розмірів ВСП на робочий діапазон вимірювання товщини покриття.

Принцип дії вихрострумового методу

Метод базується на взаємодії змінного електромагнітного поля, яке створюється збуджувальною котушкою, з вихровими струмами, що індукуються в електропровідній основі об'єкта контролю. У випадку абсолютного двообмотувального перетворювача інформативний сигнал виникає внаслідок зміни комплексного імпедансу системи Z та взаємної індуктивності між обмотками при введенні провідного півпростору в область дії поля. Комплексний імпеданс перетворювача може бути представлений у вигляді

$$Z = R + j\omega L, \quad (1)$$

де R — активний опір;

L — індуктивність;

ω — кругова частота, $\omega = 2\pi f$;

f — частота.

Наявність діелектричного шару товщиною h призводить до збільшення ефективної відстані між збуджувальною котушкою та провідною основою, що зумовлює зміну амплітудних і фазових характеристик сигналу, подібну до ефекту варіювання зазору. Для якісного опису зменшення електромагнітного зв'язку при збільшенні товщини діелектричного шару використано наближену експоненціальну модель

$$Z(h) = Z_0 \exp(-h/\delta), \quad (2)$$

де Z_0 — сигнал за нульового ефективного зазору;

δ — характеристична глибина проникнення поля.

Це співвідношення не розглядається як точне аналітичне розв'язання задачі для реальної геометрії ВСП, а використовується як фізично обґрунтована апроксимація монотонного спадання сигналу зі збільшенням відстані між обмотками перетворювача та провідною основою, для якої

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}}, \quad (3)$$

де μ , σ — магнітна проникність та електропровідність основи відповідно.

З наведених залежностей випливає, що зі зростанням частоти збуджувального сигналу глибина проникнення електромагнітного поля зменшується, тоді як чутливість до тонких діелектричних покриттів підвищується. Водночас спостерігається посилення впливу шумових компонентів і поверхневої неоднорідності матеріалу. У зв'язку з цим, вибір оптимальної частоти має здійснюватися з урахуванням компромісу між досягненням високої чутливості та забезпеченням стабільності вимірювального сигналу.

Слід зазначити, що у реальних умовах розподіл вихрових струмів є просторово неоднорідним, і точність визначення товщини покриття залежить не лише від величини h , а й від електромагнітних характеристик підкладки та конструктивних особливостей вихрострумового перетворювача [1].

Конструкція ортогонального ВСП

Збуджувальна та приймальна обмотки вихрострумового перетворювача розміщували відповідно до схеми, наведеної на **рис. 1**.

Збуджувальна та приймальна обмотки ортогонального ВСП утворюють два замкнені електричні контури, взаємне розташування яких вибирається так, щоб мінімізувати прямий електромагнітний зв'язок між ними. Ділянки обмоток 3 і 7, а також 4 і 8 орієнтовані взаємно ортогонально, внаслідок чого електрорушійна сила в них не індукується. Водночас ділянки 5 і 6 збуджувальної котушки створюють у провідниках 9 і 10 приймальної котушки електрорушійні сили (ЕРС) однакової величини, але протилежного напрямку [7]–[9]. За відсутності об'єкта контролю геометрія ортогонального розташування забезпечує наближене взаємне компенсування компонентів магнітного потоку збуджувальної обмотки, що зчіплюються з приймальним контуром, тому сумарна ЕРС приймальної обмотки наближається до мінімального рівня, який визначається залишковою асиметрією конструкції, неточністю намотування, паразитними ємнісними зв'язками та шумами вимірювального тракту. При наближенні перетворювача до електропровідної основи у ній індукуються вихрові струми, вторинне електромагнітне поле яких порушує умови компенсації та формує інформативну компоненту вихідного сигналу. У підсумку ЕРС, індуковані в елементах приймальної обмотки окремими ділянками збуджувальної котушки, компенсують одна одну, що призводить до нульового сумарного сигналу. Отже, якщо перетворювач виготовлено з високою точністю та має симетричну конструкцію, то за відсутності об'єкта контролю в зоні вимірювання сигнал на виході приймальної котушки не виникає.

Розглянемо вплив об'єкта контролю, який має захисне покриття товщиною h , виконане з неелек-

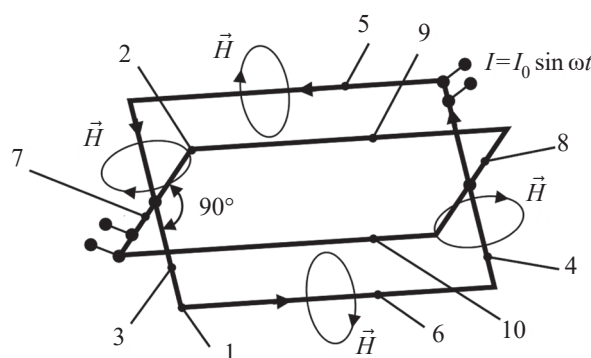


Рис. 1. Схематичне подання взаємного розташування замкнених контурів збуджувальної та приймальної обмоток ортогонального ВСП:

1, 2 — збуджувальна та приймальна котушки; 3...6 — ділянки збуджувальної котушки 1; 7...10 — ділянки приймальної котушки 2; $\vec{H}$ — вектор напруженості електромагнітного поля (формується збуджувальною котушкою ВСП за відсутності об'єкта контролю)

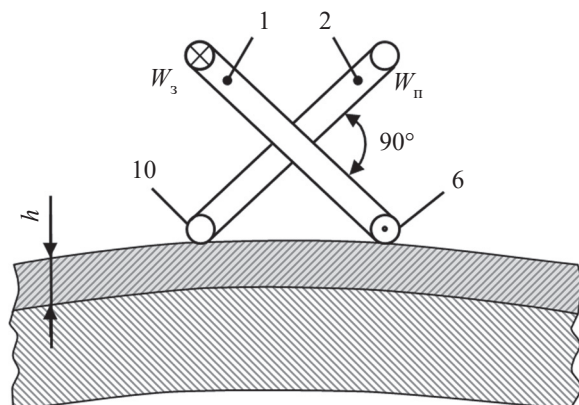


Рис. 2. Спрощена модель взаємодії ортогонального ВСП з електропровідною основою через діелектричне покриття товщиною h

тропровідного та неферромагнітного матеріалу, на структуру електромагнітного поля, що створюється збуджувальною котушкою вихрострумового перетворювача. Припустимо, що на поверхні покриття розташовані відповідні ділянки збуджувальної 6 та приймальної 10 обмоток, як показано на **рис. 2** (W_3 , W_{π} — кількість витків збуджувальної та приймальної котушок відповідно).

Така конструктивна схема забезпечує значне послаблення прямого електромагнітного зв'язку між збуджувальною та приймальною обмотками. В умовах ідеальної симетрії перетворювача вихідний сигнал приймальної котушки за відсутності об'єкта контролю прямує до нульового рівня, тоді як корисна складова формується переважно під впливом вторинного електромагнітного поля, зумовленого вихровими струмами в провідній основі.

ВСП для досліджень виготовлювався намотуванням мідного проводу типу ПЕВ-1 на спеціально розроблені діелектричні каркаси з оргскла із заготовленими пазами для взаємно перпендикулярного розташування обмоток. Така конструкція забезпечує стабільність геометричних параметрів і дотримання ортогональної орієнтації збуджувальної та приймальної котушок. Після завершення намотування балансуюлися незакріплені ділянки обмоток, що мінімізувало паразитний електромагнітний зв'язок між ними. Застосування такого підходу є важливим для розширення динамічного діапазону перетворювача та під-

Конструктивні параметри досліджуваних ВСП

№ ВСП	Кількість витків / діаметр проводу обмотки		Розміри обмоток, мм	Розміри каркасу ($a \times b \times c$), мм
	збуджувальної	виміральної		
1	5 / 0,07 мм	35 / 0,15 мм	12×11,5	10×10×14
2			16,5×15	12×12×16
3			40×40	30×30×42

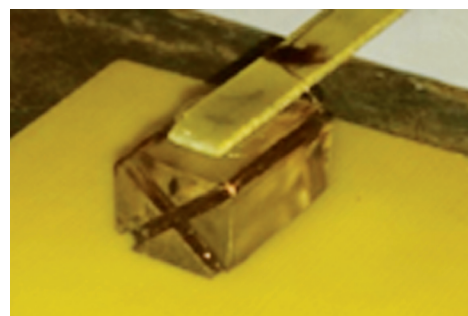
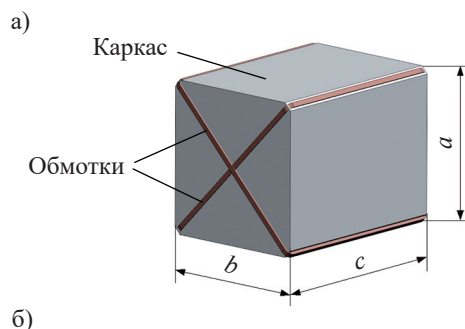


Рис. 3. Конструкція досліджуваного ортогонального ВСП: a — геометричні параметри діелектричного каркаса; b — розміщення обмоток на каркасі

вищення ефективності виділення слабкого інформативного сигналу, обумовленого наявністю діелектричного покриття [11], [12]. Схему конструкції перетворювача та його зовнішній вигляд наведено на **рис. 3**, основні технічні параметри досліджуваних зразків — у **таблиці**.

Методика проведення експерименту

Експериментальні дослідження проводилися із застосуванням вимірювального стенда, структурну схему якого наведено на **рис. 4**.

За допомогою органів керування генератора G (ГЗ-112) формувалася синусоїдальна напруга із заданими значеннями частоти та амплітуди. Для кожного встановленого значення частоти струм збудження перетворювача задавався на основі показів мілівольтметра $PV1$ (ВЗ-38Б), яким вимірювалося падіння на-

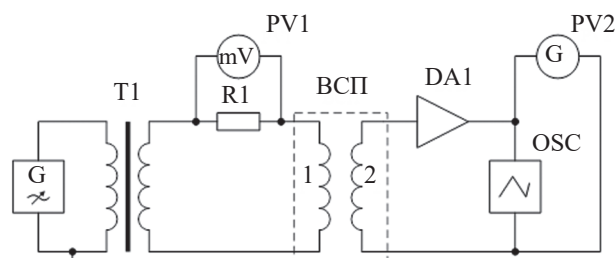


Рис. 4. Структурна схема експериментального стенда для вимірювання сигналу ортогонального ВСП:

G — генератор гармонійного сигналу; $T1$ — узгоджувальний трансформатор; $R1$ — прецизійний резистор (шунт для контролю струму збудження); $DA1$ — інтегральний підсилювач; $PV1$, $PV2$ — вольтметри; OSC — осцилограф

пруги на прецизійному резисторі R1 (типу С2-11, 1 Вт, 1 Ом, $\pm 0,5\%$), що використовувався як шунт. У всьому досліджуваному діапазоні частот — від 10 до 1000 кГц — струм збудження підтримувався на рівні 25 мА, що дозволило коректно порівнювати результати на різних частотах. Для узгодження параметрів збуджувальної обмотки перетворювача з виходом генератора застосовувався широкосмуговий трансформатор на феритовому кільцевому осерді. Вихід вимірювальної обмотки з'єднувався з інтегральним підсилювачем DA1 вимірювального сигналу з коефіцієнтом підсилення 40 дБ у частотній смузі 0–1 МГц. Підсилену напругу вимірювали за допомогою вольтметра PV2 (B7-27Б), для візуального контролю форми сигналу використовувався осцилограф OSC (C1-64).

Моделями покриттів слугували діелектричні прокладки з різних матеріалів, а електропровідних основ — латунь, алюміній і сталь.

Програма досліджень складалася з вимірювання амплітуди сигналу при зміні зазору на різних частотах, нормування отриманих характеристик, аналізу співвідношення сигнал/шум та оцінки впливу розміру ВСП на верхню межу вимірюваної товщини.

Дослідження амплітуди сигналів ВСП на різних частотах при зміні зазору

Досліджувані ортогональні ВСП встановлювалися на поверхню металевих зразків (латунь, алюміній, сталь). Зазор моделювався діелектричними прокладками різної товщини зі склотекстоліту, плексигласу, лавсану, гетинаксу. Товщина контролювалася мікрометром.

У ході експериментів було проаналізовано вплив частоти живлення перетворювача на амплітуду корисного сигналу. Частота генератора встановлювалася дискретно: 50, 100, 200, 400, 600, 800 та 1000 кГц.

На **рис. 5** наведено амплітудні залежності сигналу від зазору z для трьох досліджуваних ВСП на алюмінієвій основі, конструктивні характеристики яких наведено вище у таблиці. Аналогічні серії вимірювань були виконані також для латуні та сталі. Вони підтвердили однаковий характер зміни амплітуди U сигналу при збільшенні зазору z , однак відрізнялися абсолютними значеннями амплітуди, що зумовлено різними електромагнітними властивостями матеріалів основи. (Алюміній обрано як репрезентативний немагнітний електропровідний матеріал, для якого вплив магнітної проникності основи є мінімальним, а зміна сигналу визначається переважно електропровідністю та геометричним *lift-off* [7]–[9].)

Отримані залежності свідчать про монотонне зменшення амплітуди сигналу зі збільшенням зазору між перетворювачем і електропровідною основою. Фізично це пояснюється зменшенням електромагнітного зв'язку між полем збуджувальної обмотки та вихровими струмами, індукованими у провідній основі. Нелінійний характер залежностей обумовлю-

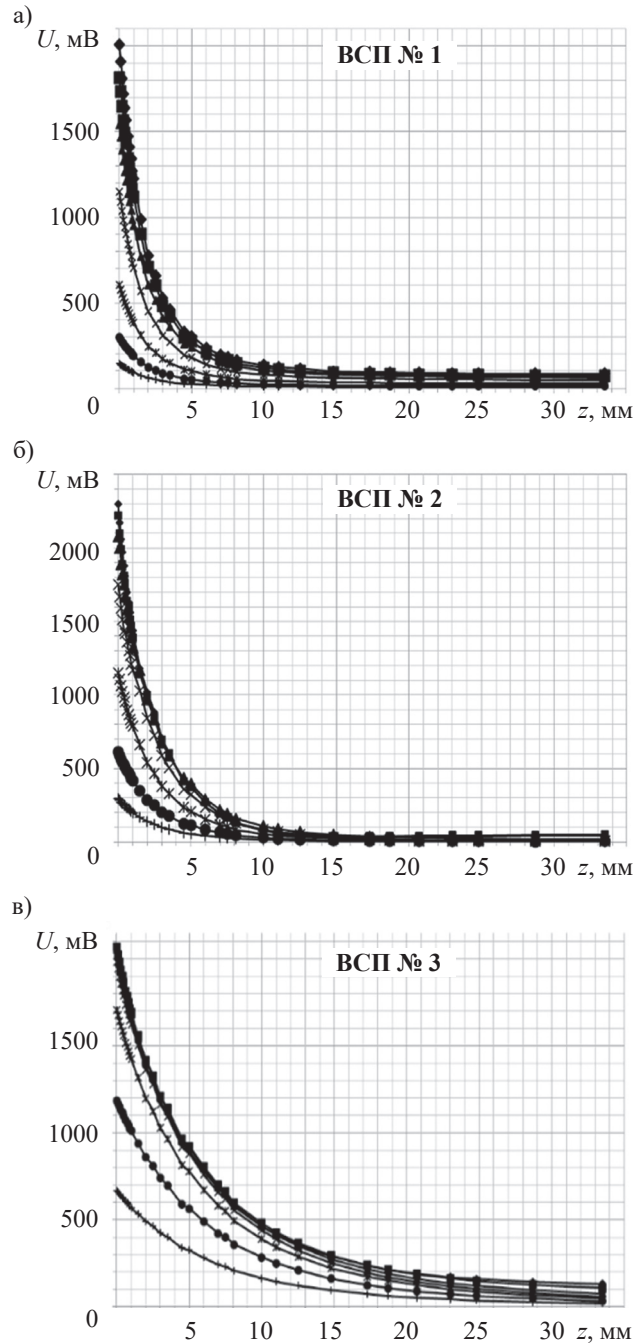


Рис. 5. Залежність амплітуди сигналу від зазору для трьох досліджуваних ВСП на алюмінієвій основі за різної частоти збудження (знизу вверх, у кГц): 50; 100; 200; 400; 600; 800; 1000

ється експоненціальним спаданням електромагнітного поля у провідному середовищі, що узгоджується з оцінкою за глибиною проникнення.

За малих значень зазору щільність вихрових струмів у поверхневому шарі металу є максимальною, що забезпечує найбільшу зміну магнітного потоку, зчепленого з контуром приймальної обмотки. Зі збільшенням зазору індукція вихрових струмів послаблюється, що призводить до зменшення інформативної компоненти сигналу.

Для порівняння форми градуювальних характеристик сигнал нормували за максимальною амплітудою $U_{\max}$. Як видно з рис. 6, залежності нормованої амплітуди сигналу від частоти в діапазоні від 50 кГц до 1 МГц практично збігаються за формою. Це означає, що частота збудження впливає переважно на масштаб сигналу, але не змінює характер залежності від зазору. Такий результат має важливе практичне значення, оскільки дозволяє використовувати узагальнену нормовану градуювальну характеристику для перетворювачів одного типу з урахуванням частотного коефіцієнта. Тобто процедура калібрування може бути суттєво спрощена.

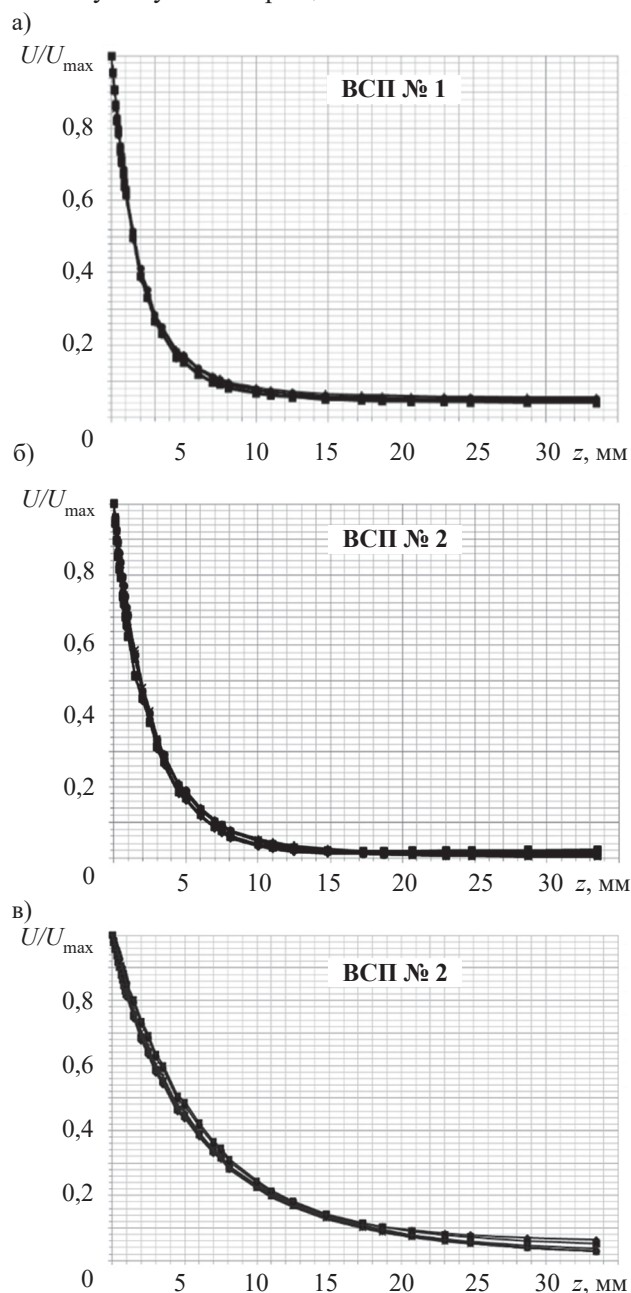


Рис. 6. Нормовані залежності амплітуди сигналу від зазору для трьох досліджуваних ВСП на алюмінієвій основі, отримані в діапазоні частоти збудження від 50 кГц до 1 МГц

Залежність відношення сигнал/шум від частоти

Необхідною умовою забезпечення коректного функціонування вихрострумowego перетворювача є підтримання відношення амплітуди корисного сигналу до рівня шумів не менше ніж 3:1. Зі збільшенням цього показника підвищуються чутливість перетворювача та діапазон вимірювань. У зв'язку з цим подальші дослідження були спрямовані на налаштування ВСП таким чином, щоб досягти максимальної амплітуди інформативного сигналу при одночасному забезпеченні найбільшого співвідношення сигнал/шум (SNR).

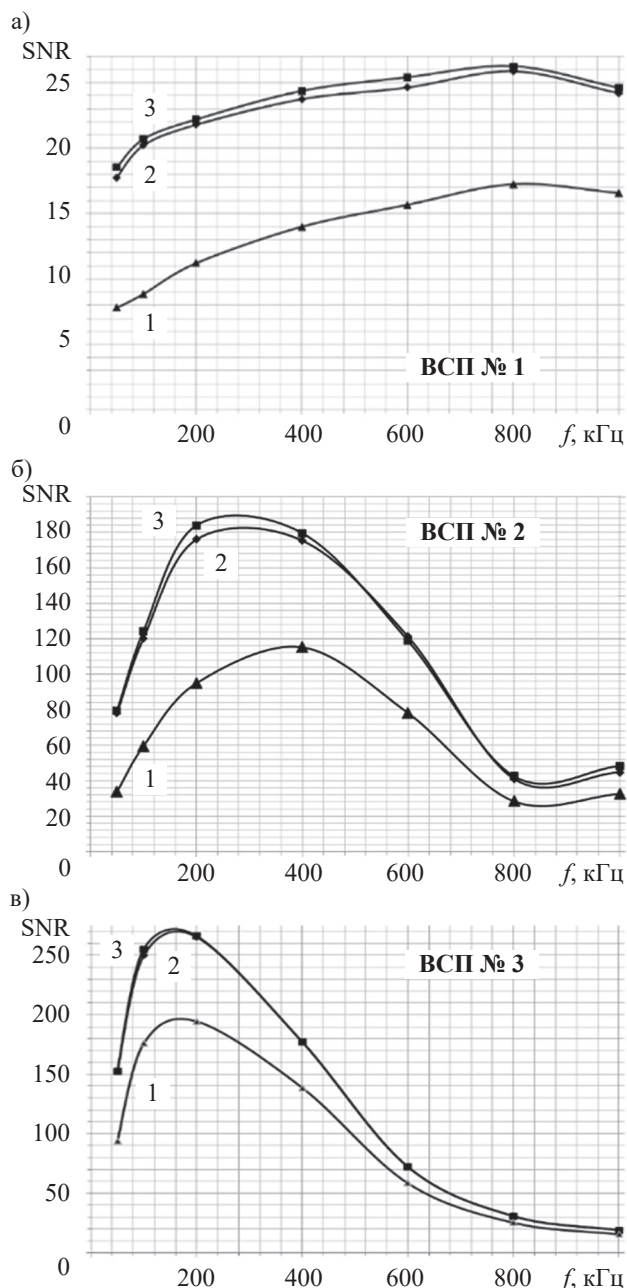


Рис. 7. Залежність відношення сигнал/шум від частоти для трьох досліджуваних ВСП на основі зі сталі (1), латуні (2) та алюмінію (3) при $Z=0$

На відміну від амплітудних характеристик, залежності SNR на **рис. 7** наведено для перетворювачів на всіх трьох основах. Тут видно, що кожному перетворювачу відповідає своя частотна характеристика, що обумовлює вибір робочого частотного діапазону.

Встановлено, що на нижній межі досліджуваного частотного діапазону (близько 10 кГц) рівень шумів становив 4–5 мВ, тоді як із підвищенням частоти він збільшувався і при наближенні до 1 МГц досягав приблизно 100 мВ. Під час проведення вимірювань струм у збуджувальній обмотці підтримувався на рівні 25 мА.

Отримані залежності вказують на те, що оптимальний режим роботи ВСП визначається не максимальним значенням амплітуди сигналу, а максимумом співвідношення сигнал/шум. Зі збільшенням частоти спостерігається одночасне зростання як корисного сигналу, так і рівня шумів, що обумовлено паразитними ємнісними зв'язками, втратами в обмотках та частотними властивостями вимірювального тракту.

Для ВСП більших розмірів максимум співвідношення сигнал/шум досягається в діапазоні 200–400 кГц, що дозволяє розглядати цей інтервал як раціональний робочий діапазон [9]–[12].

Отже, вибір частоти має здійснюватися за критерієм максимуму інформативності сигналу.

Вплив розміру ВСП на діапазон вимірювання товщини

Для демонстрації впливу розміру ВСП на діапазон вимірювання товщини покриттів на **рис. 8** наведено залежності для алюмінієвої основи при частоті 200 кГц — саме ця частота відповідає раціональному діапазону роботи перетворювачів більших розмірів і забезпечує високе співвідношення сигнал/шум [1], [11], [12].

Порівняння характеристик ВСП різних розмірів показало, що геометрія перетворювача визначає робочий діапазон вимірювання товщини покриттів.

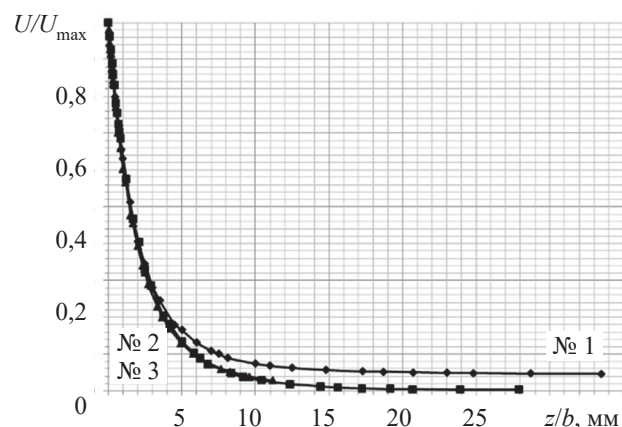


Рис. 8. Залежність приведеної амплітуди від приведенного зазору для ВСП різних розмірів (№1, №2, №3) на алюмінієвій основі при частоті 200 кГц

Зі збільшенням ширини b робочої зони перетворювача зростає об'єм провідної області, яка взаємодіє з електромагнітним полем, що забезпечує збереження інформативності сигналу при більших значеннях зазору. Встановлено, що верхня межа контрольованої товщини покриття становить приблизно $(0,8 - 1,0)b$.

Висновки

Дослідження показали, що ортогональний вихрострумний перетворювач є ефективним засобом вимірювання товщини діелектричних покриттів на електропровідних основах завдяки зменшенню прямого наведення між обмотками та підвищенню інформативності сигналу.

Проведений аналіз дозволив сформулювати важливі закономірності, що визначають оптимальні умови роботи перетворювача, а саме:

— найбільша інформативність сигналу досягається при малих зазорах і товщині покриття, що підтверджує ефективність ортогонального ВСП у задачах високоточного контролю;

— форма градувальних залежностей майже не змінюється з частотою, що спрощує калібрування та підвищує універсальність перетворювачів одного типу;

— виходячи з критерію максимального відношення сигнал/шум, для більших ВСП доцільно використовувати діапазон 200–400 кГц, тоді як для малогабаритних ВСП максимум SNR досягається близько частоти 800 кГц;

— ширина робочої зони визначає верхню межу контрольованої товщини, раціональний діапазон вимірювань становить приблизно $(0,8 - 1,0)b$;

— вибір параметрів ВСП має враховувати геометрію, частоту та умови вимірювання, що забезпечує оптимальну інформативність сигналу.

Таким чином, параметри ВСП необхідно визначати на основі комплексного урахування геометрії, частоти та умов вимірювання. Отримані результати можуть бути використані в процесі створення високоточних товщиномірів для лакофарбових, полімерних, оксидних і композиційних покриттів.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на чисельне моделювання електромагнітного поля ортогонального вихрострумного перетворювача, аналіз впливу електромагнітних властивостей основи на параметри сигналу, а також розроблення багаточастотних алгоритмів обробки сигналів для підвищення точності товщинометрії діелектричних покриттів.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

[1] X. Meng, M. Lu, W. Yin, A. Bennecer, and K. J. Kirk, "Evaluation of coating thickness using lift-off insensitivity of eddy current sensor," *Sensors (Basel)*, vol. 21, no. 2, p. 419, 2021, doi: 10.3390/s21020419.

[2] S. S. Udpa, and P. O'Moore, *Electromagnetic Testing*, vol. 5, 3rd ed. Columbus, OH, USA: ASNT, 2004, *Nondestructive Testing Handbook*.

[3] І. П. Білокур, Основи дефектоскопії, Київ, Україна: Азимут-Україна, 2004.

[4] A. Abdou, T. Bouchala, B. Abdelhadi, A. Guettafi, and A. Benoudjit, "Nondestructive eddy current measurement of coating thickness of aeronautical construction materials," *Instrumentation Mesure Métrologie*, vol. 18, no. 5, pp. 451–457, 2019. doi: 10.18280/i2m.180504

[5] G. M. Suchkov, Y. V. Khomyak, S. N. Hloba, and L. C. Hieu, "A highly stable eddy current transducer for testing the thickness of dielectric coatings on metal articles," *Meas. Tech.*, vol. 59, no. 4, pp. 369–373, 2016, doi: 10.1007/s11018-016-0973-6.

[6] Хомяк Ю. В., Дроздова Т. В., Корнев І. В., та Носков М. С., "Математичне моделювання накладного ортогонального вихрострумового перетворювача," *Метрологія та прилади*, № 2, с. 65–71, 2025, doi: 10.30837/2663-9564.2025.2.09.

[7] T. Chen, X. Xiao, L. Zhang, C. Lv, Z. Deng, and X. Song, "Design of orthogonal eddy-current probe for weld crack detection," *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 64, no. 1–4, pp. 1347–1355, 2020, doi: 10.3233/JAE-209453.

[8] L. Huang, C. Liao, X. Song, T. Chen, X. Zhang, and Z. Deng, "Research on detection mechanism of weld defects based

on orthogonal axial eddy current probe," *Sensors (Basel)*, vol. 20, no. 19, p. 5515, 2020, doi: 10.3390/s20195515.

[9] Z. Xu, X. Wang, and Y. Deng, "Rotating focused field eddy-current sensing for arbitrary orientation defects detection in carbon steel," *Sensors (Basel)*, vol. 20, no. 8, p. 2345, 2020, doi: 10.3390/s20082345.

[10] M. Mussatayev, Q. Yi, M. Fitzgerald, V. K. Maes, P. Wilcox, and R. Hughes, "Directional eddy current probe configuration for in-line detection of out-of-plane wrinkles," *arXiv preprint*, 2023, doi: /arXiv..

[11] M. Song, M. Li, S. Xiao, and J. Ren, "Research on the influence of geometric structure parameters of eddy current testing probe on sensor resolution," *Sensors (Basel)*, vol. 23, no. 14, p. 6610, Jul. 22 2023, doi: 10.3390/s23146610.

[12] Z. Xu, C. Zhu, and J. Jin, "Reduction of pulsed eddy current probe footprint using multiple coils," *J. Nondestr. Eval.*, vol. 43, no. 2, 2024, doi: 10.1007/s10921-024-01072-x.

Надійшла до редакції 20.04.2026

Прийнято до друку 4.05.2026

DOI: 10.15222/TKEA2026.1.76
UDC 621.317.39:620.179.14:539.216

Yurii KHOMIAK, Mykyta NOSKOV

Ukraine, Kharkiv, National Technical University
«Kharkiv Polytechnic Institute»

PARAMETRIC ANALYSIS OF AN ORTHOGONAL EDDY CURRENT TRANSDUCER FOR MEASURING THE THICKNESS OF DIELECTRIC COATINGS

This paper presents a parametric analysis of an orthogonal eddy current transducer for measuring the thickness of dielectric coatings on conductive substrates. The problem of non-destructive thickness measurement of dielectric coatings is important for the quality assurance and reliability of products in mechanical engineering, aerospace applications, power engineering, and the transport industry. Orthogonal eddy current transducers are promising for this application due to reduced parasitic electromagnetic coupling between excitation and receiving coils and increased sensitivity to changes in the object under test.

The influence of excitation frequency, lift-off between the transducer and the test surface, and geometrical dimensions of the transducer on the output signal amplitude and signal-to-noise ratio is investigated. The informative signal arises from variations in electromagnetic coupling between excitation and receiving coils through the dielectric layer and conductive substrate. Experimental studies were conducted for three orthogonal transducers with different geometrical dimensions using aluminum, brass, and steel substrates with dielectric spacers of different thicknesses simulating coatings. Amplitude characteristics, normalized calibration curves, and signal-to-noise ratio curves were analyzed.

Experimental results demonstrate that normalized calibration characteristics have similar shapes across different excitation frequencies, while the highest sensitivity is observed at small lift-off values. It is shown that excitation frequency mainly affects the signal amplitude and signal-to-noise ratio without significantly changing the general form of the calibration characteristic. Based on the measurements, a rational frequency range of 200–400 kHz is substantiated for larger transducers, and the upper limit of measurable thickness is determined by the width of the transducer's active zone. The obtained results may provide a basis for optimizing orthogonal eddy current transducers in high-precision thickness measurement systems for dielectric coatings and can be used for the development of industrial eddy current thickness gauges.

Keywords: eddy current testing, dielectric coating, thickness measurement, orthogonal transducer, lift-off, signal-to-noise ratio (SNR).

REFERENCES

[1] X. Meng, M. Lu, W. Yin, A. Bennecer, and K. J. Kirk, "Evaluation of coating thickness using lift-off insensitivity of eddy current sensor," *Sensors (Basel)*, vol. 21, no. 2, p. 419, Jan. 9 2021., doi: 10.3390/s21020419.

[2] S. S. Udpa, and P. O'Moore, *Electromagnetic Testing*, vol. 5, 3rd ed. Columbus, OH, USA: ASNT, 2004, *Nondestructive Testing Handbook*.

[3] І. П. Білокур, *Fundamentals of Defectoscopy* (in Ukrainian). Kyiv, Ukraine: Azimut-Ukraine, 2004.

[4] A. Abdou, T. Bouchala, B. Abdelhadi, A. Guettafi, and A. Benoudjit, "Nondestructive eddy current measurement of coating thickness of aeronautical construction materials," *Instrumentation Mesure Métrologie*, vol. 18, no. 5, pp. 451–457, 2019. doi: 10.18280/i2m.180504

[5] G. M. Suchkov, Y. V. Khomyak, S. N. Hloba, and L. C. Hieu, "A highly stable eddy current transducer for testing the thickness of dielectric coatings on metal articles," *Meas. Tech.*, vol. 59, no. 4, pp. 369–373, 2016, doi: 10.1007/s11018-016-0973-6.

[6] Y. V. Khomyak, T. V. Drozdova, I. V. Kornev, and M. S. Noskov, "Mathematical modeling of the overlay orthogonal eddy current transducer (in Ukrainian)," *Metrology and Instruments*, no. 2, pp. 65–71, 2025, doi: 10.30837/2663-9564.2025.2.09.

[7] T. Chen, X. Xiao, L. Zhang, C. Lv, Z. Deng, and X. Song, "Design of orthogonal eddy-current probe for weld crack detection," *Int. J. Appl. Electromagn. Mech.*, vol. 64, no. 1–4, pp. 1347–1355, 2020, doi: 10.3233/JAE-209453.

[8] L. Huang, C. Liao, X. Song, T. Chen, X. Zhang, and Z. Deng, "Research on detection mechanism of weld defects based on orthogonal axial eddy current probe," *Sensors (Basel)*, vol. 20, no. 19, p. 5515, 2020, doi: 10.3390/s20195515.

[9] Z. Xu, X. Wang, and Y. Deng, "Rotating focused field eddy-current sensing for arbitrary orientation defects detection in carbon

steel," *Sensors (Basel)*, vol. 20, no. 8, p. 2345, 2020, doi: 10.3390/s20082345.

[10] M. Mussatayev, Q. Yi, M. Fitzgerald, V. K. Maes, P. Wilcox, and R. Hughes, "Directional eddy current probe configuration for in-line detection of out-of-plane wrinkles," *arXiv preprint*, 2023, doi: /arXiv..

[11] M. Song, M. Li, S. Xiao, and J. Ren, "Research on the influence of geometric structure parameters of eddy current testing probe on sensor resolution," *Sensors (Basel)*, vol. 23, no. 14, p. 6610, Jul. 22 2023, doi: 10.3390/s23146610.

[12] Z. Xu, C. Zhu, and J. Jin, "Reduction of pulsed eddy current probe footprint using multiple coils," *J. Nondestr. Eval.*, vol. 43, no. 2, 2024, doi: 10.1007/s10921-024-01072-x.

Відомості про авторів

Хомяк Юрій Валентинович, канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна;
e-mail: Yurii.Khomiak@khpi.edu.ua;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6998-8393>

Носков Микита Сергійович, аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Україна;
e-mail: Mykyta.Noskov@infiz.khpi.edu.ua;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2299-1418>

About the authors

Yurii Khomiak, Ph.D., Associate Professor, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine;
e-mail: Yurii.Khomiak@khpi.edu.ua;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6998-8393>

Mykyta Noskov, Ph.D. Student, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Ukraine;
e-mail: Mykyta.Noskov@infiz.khpi.edu.ua;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2299-1418>



Copyright: © 2026, The author(s). Licensee: Politekhperiodika, Odesa, Ukraine. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).