

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

Скопенко Василь Вікторович

УДК 620.179.14

**ВИХРОСТРУМОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ДЕФЕКТІВ ДЕТАЛЕЙ
ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ
ФОРМИ**

**Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин**

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі приладів і методів неруйнівного контролю Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Горкунов Борис Митрофанович,
Національний технічний університет "Харківський
політехнічний інститут", м. Харків, професор
кафедри приладів і методів неруйнівного контролю

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бондаренко Володимир Омелянович,
Національний технічний університет "Харківський
політехнічний інститут", м. Харків,
завідувач кафедри передачі електричної енергії

кандидат технічних наук, доцент
Остапущенко Дмитро Леонідович,
Державний заклад "Луганський державний
медичний університет", м. Луганськ,
доцент кафедри медичної і біологічної фізики,
медичної інформатики, біостатистики

Захист відбудеться "11" жовтня 2012 р. о 14-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий "07" вересня 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Глоба С. М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В теорії та практиці електромагнітного неруйнівного контролю (НК) проблеми дефектоскопії, пов'язані з виявленням й оцінкою параметрів дефектів об'єкта контролю (ОК), з точки зору невизначеної геометрії та неоднорідності електромагнітних характеристик, потребує подальшого розвитку. Існуючі математичні труднощі в розв'язанні крайової задачі, що описує взаємодію тримірних векторних функцій інформаційного електромагнітного поля дефекту з вихрострумовим перетворювачем (ВСП), стримують широке застосування вихрострумових методів НК.

Аналітичні методи розв'язання диференційних або інтегральних рівнянь, які описують взаємодію системи ВСП-ОК, проблемні навіть для випадку, коли ізотропний виріб, що контролюється, має дефекти простої геометричної форми. Застосування широко розвинених на цей час чисельних методів моделювання інформаційного поля дефекту дає можливість оцінити реакцію сигналу виміральної обмотки ВСП від дефекту, однак вимагає істотних витрат машинного часу та наявності коштовного програмного забезпечення.

Під час допускового контролю якості, окремим випадком якого є виявлення та ідентифікація розмірів дефектів, залежно від того, чи перебуває контрольований параметр (розмір дефекту) у допустимих границях. Обмежена точність вимірювання параметрів вихідного сигналу ВСП, як і недотримання умов проведення контролю, може привести до помилкових рішень, тобто до визнання придатного до експлуатації об'єкта не придатним, і навпаки. У класичному варіанті вихрострумового дефектоскопа, сигнал від дефекту в ОК візуально порівнюється з рядом сигналів від зразкових дефектів, після чого оператор приймає рішення, виходячи, в основному, із власного досвіду.

Таким чином, постає актуальна задача підвищення достовірності контролю параметрів дефектів, для вирішення якої необхідно запропонувати такий математичний підхід, який, враховуючи похибки моделі і виміру параметрів ВСП в реальному часі, дозволить приймати рішення з певною долею ймовірності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалася відповідно до тематики роботи кафедри приладів та методів неруйнівного контролю НТУ "ХПІ". Здобувач як виконавець брав участь у науково-дослідній держбюджетній роботі МОН України: "Дослідження можливості створення прототипів приладів неруйнівного контролю нового покоління з використанням енерго- та ресурсозберігаючих технологій" (ДР № 0111U002280).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методів і пристроїв, що підвищують достовірність вихрострумового контролю при виявленні та визначенні геометричних параметрів дефектів циліндричних виробів у поперечному однорідному електромагнітному полі, з урахуванням помилок першого й другого роду.

Для досягнення цієї мети в роботі поставлені наступні задачі:

– розробити фізико-математичну модель системи ВСП-ОК, засновану на суперпозиції елементарних електромагнітних полів, яка описує взаємодію лінійного вихрового струму в циліндричному ОК з обмотками ВСП у поперечному однорідному електромагнітному полі;

– на основі лінійної моделі обтікання вихрового струму поверхні дефекту в ОК розробити метод та отримати аналітичні вирази для розрахунку вихідних сигналів ВСП залежно від геометричних розмірів дефекту і його орієнтації у просторі;

– за розробленими алгоритмами провести розрахункові та натурні експерименти для визначення чутливості ВСП до геометричних розмірів дефекту й підтвердження адекватності розроблених теоретичних моделей системи ВСП-ОК з дефектами;

– розробити метод ідентифікації невизначеності результатів контролю геометричних розмірів дефекту за вимірними сигналами ВСП шляхом їх порівняння з відповідними розрахунковими сигналами та визначенням достовірності контролю;

– розробити вихрострумний пристрій для безконтактного контролю дефектів в циліндричних об'єктах у поперечному магнітному полі зі зменшенням впливу зазору та видачею результату контролю з певною достовірністю.

Об'єктом дослідження є процес взаємодії електромагнітного поля з поверхневим дефектом у циліндричному об'єкті контролю, що викликає невизначеність у прийнятті рішення за результатами контролю.

Предметом дослідження є методи та пристрої вихрострумного контролю розмірів дефекту, порівняння розрахункових та вимірних сигналів з урахуванням похибок з метою їх ідентифікації.

Методи дослідження. Під час вирішення поставлених задач використані аналітично-чисельні методи розв'язання крайових задач електродинаміки суцільних середовищ, теорія ланцюгів з розподіленими параметрами, методи диференціального та інтегрального розрахунку, методи лінійної алгебри та математичного аналізу, елементи теорії ймовірності і математичної статистики, елементи розпізнавання образів. Перевірка адекватності розроблених методів здійснювалася в процесі експериментальних досліджень на створеній установці з використанням спеціально виготовлених зразків із заданими розмірами дефектів.

Наукова новизна отриманих результатів:

– розроблено метод розрахунку вихрострумного перетворювача з поперечним полем, заснований на суперпозиції збуджуючого поля та поля індукованих лінійних вихрових струмів у дефектній і бездефектній області об'єкта контролю;

– удосконалено метод ідентифікації розмірів дефектів, заснований на порівнянні сімейства розрахункових сигналів із сигналами вихрострумного перетворювача від реальних дефектів у реальному масштабі часу;

– удосконалено метод оцінки достовірності контролю розмірів дефектів при однопараметровій і двохпараметровій ідентифікації, заснований на врахуванні похибок моделювання та вимірювання сигналів перетворювача, що дозволило підвищити надійність контролю.

Практичне значення отриманих результатів для приладобудування полягає в запровадженні методик направлених на модернізацію та створення приладів неруйнівного контролю.

- Розроблено та виготовлено лабораторну установку з вихрострумним перетворювачем для контролю деформованого стану циліндричних об'єктів у поперечному магнітному полі (Патент на корисну модель № 61060 (Україна)).

- Для підвищення ефективності виявлення дефектів у броньованому кожусі силових кабелів розроблено та виготовлено вихрострумний перетворювач з незначним впливом повітряного зазору та локального намагнічування зон контролю.

- Розроблено методику обробки експериментальних даних контролю параметрів дефекту, яка дозволила оцінити ризики замовника та виконавця при прийнятті рішення про придатність виробу до експлуатації.

Основні результати роботи впроваджено:

- АК "Харківобленерго" (м. Харків) – для безконтактного контролю наявності дефектів у броньованому кожусі силових кабелів;

- результати роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі приладів та методів неруйнівного контролю НТУ "ХП" – під час проведення лабораторних занять, підготовки фахівців, магістрів і аспірантів.

Особистий внесок здобувача. Всі основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: розроблено теоретичні положення та створено модель процесу обтікання вихровим струмом дефекту із установленням функціональних залежностей між розмірами дефекту і сигналами перетворювача; розроблено методику ідентифікації дефекту з урахуванням похибок моделювання та вимірювання сигналу перетворювача; встановлено раціональні за чутли-

вістю та похибками режими роботи перетворювача; сформульовано шляхи зменшення невизначеності результатів контролю та розроблено метод визначення достовірності результатів контролю; проведені експериментальні дослідження, що підтверджують адекватність і коректність проведених у роботі досліджень.

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні наукові результати та положення дисертаційної роботи доповідались, обговорювалися та були схвалені на: 17th National scientific symposium "Metrology and metrology assurance 2007", (Софія, Болгарія, 2007); 7-й Міжнародній конференції "Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности" (Москва, Росія, 2008); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Приладобудування»: стан і перспективи, (Київ, 2008); наукових семінарах кафедри приладів та методів неруйнівного контролю НТУ "ХП".

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 15 наукових праць, серед них: 11 публікацій у фахових наукових виданнях України, 1 патент України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертації становить 144 сторінки, серед них 39 рисунки по тексту, 10 рисунків на 6 окремих сторінках; 11 таблиць по тексту; 1 додаток на 3 сторінках; 142 найменування використаних літературних джерел на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено обґрунтування актуальності обраної теми дисертації, сформульовано мету роботи та задачі дослідження, відображено наукову новизну та практичну цінність роботи, викладено відомості про апробацію результатів дисертаційних досліджень і їх публікації.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану досліджень і розробок в області вихрострумової дефектоскопії. Проведений аналіз показав, що існуючі засоби вихрострумового контролю не забезпечують необхідної для практики достовірності контролю параметрів дефекту через вплив заважаючих факторів. При цьому актуальними є питання створення ефективних алгоритмів обробки результатів вимірювального контролю, удосконалення дефектоскопічних пристроїв та їх метрологічного забезпечення. Встановлено необхідність підвищення достовірності результатів вихрострумового контролю за рахунок використання сучасних методів обробки сигналів.

У другому розділі розроблено метод та отримано аналітичні вирази для розрахунку вихідного сигналу вихрострумового перетворювача з накладними та прохідними вимірювальними котушками, розташованими в зоні поверхневих дефектів циліндричних електропровідних об'єктів, які розміщені в однорідному електромагнітному полі. В роботі розроблено модель системи ВСП-ОК, яка представляє собою взаємодію елементарних електромагнітних полів обмоток ВСП і індукованих лінійних вихрових струмів у циліндричному протяжному ОК.

На рис. 1 показано модель системи ВСП-ОК, у якій намагнічуюче поперечне, відносно вісі ОК, змінне електромагнітне поле створюється за допомогою кату-

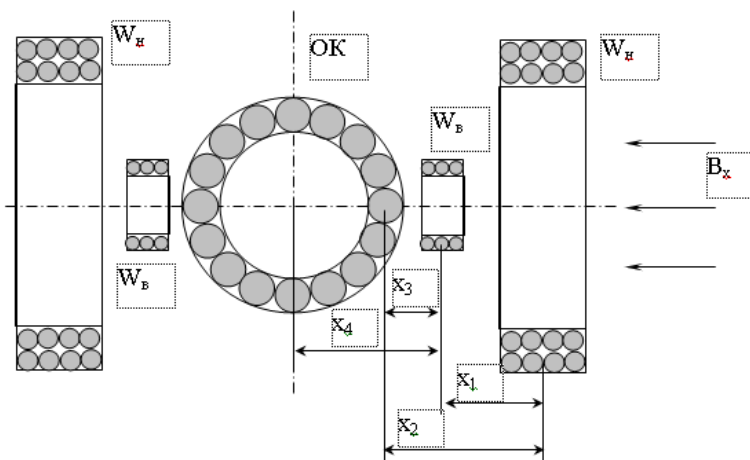


Рисунок 1 – Модель системи ВСП-ОК

шок Гельмгольца (W_H), з допомогою вимірювальних котушок накладного типу (W_B) контролюють реакцію поля на стан циліндричного ОК (циліндр або труба). ОК змодельований у вигляді окремих близько розташованих лінійних провідників, діаметр яких дорівнює еквівалентній глибині проникнення (δ) електромагнітного поля в зразок. Всі необхідні геометричні параметри відносного розміщення елементів системи ВСП-ОК зображені на рис. 1.

Еквівалентна електрична еквівалентна схема розробленої моделі системи ВСП-ОК представлена на рис. 2.

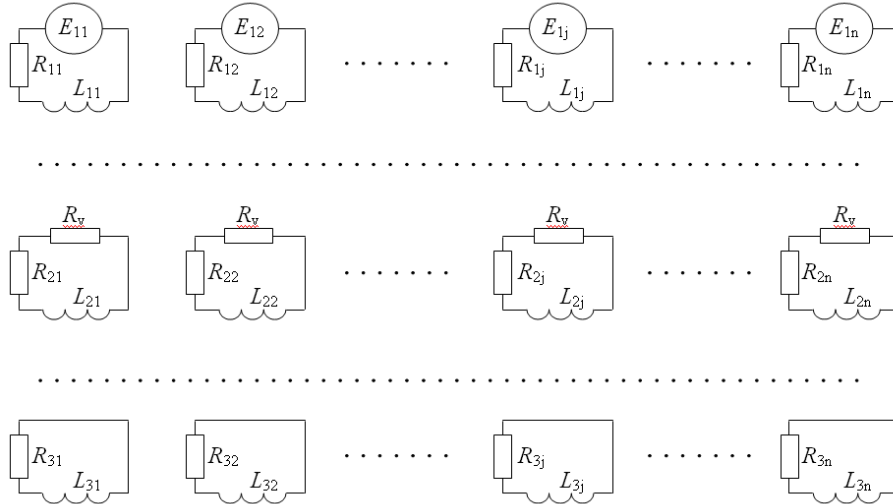


Рисунок 2 – Еквівалентна електрична схема системи ВСП-ОК

Для цієї еквівалентної схеми складена система лінійних алгебраїчних рівнянь у матричній формі:

$$\begin{pmatrix} \dot{Z}_H & \dot{Z}_{HB} & \dot{Z}_{HO1} & \dot{Z}_{HOi} & \dot{Z}_{HOn} \\ \dot{Z}_{BH} & \dot{Z}_B & \dot{Z}_{BO1} & \dot{Z}_{BOi} & \dot{Z}_{BOn} \\ \dot{Z}_{O1H} & \dot{Z}_{O1B} & \dot{Z}_{O1} & \dot{Z}_{O1i} & \dot{Z}_{O1n} \\ \dot{Z}_{OjH} & \dot{Z}_{OjB} & \dot{Z}_{Oj1} & \dot{Z}_{Oji} & \dot{Z}_{Ojn} \\ \dot{Z}_{OmH} & \dot{Z}_{OmB} & \dot{Z}_{Om1} & \dot{Z}_{Omi} & \dot{Z}_{Omn} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \dot{I}_H \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_{O1} \\ \dot{I}_{Oj} \\ \dot{I}_{Om} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{E}_H \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де \dot{Z}_H , \dot{Z}_B , \dot{Z}_{Oij} – власні комплексні опори намагнічуючої та вимірювальної обмоток, а також будь-якого лінійного вихрострумового провідника в ОК, тобто $\dot{Z}_H = R_H + j\omega L_H$, $\dot{Z}_B = R_B + j\omega L_B$ та $\dot{Z}_{Oij} = R_{Oij} + j\omega L_{Oij}$; ω – колова частота намагнічуючого поля; $\dot{Z}_{HB} = \dot{Z}_{BH}$ – комплексні опори, що визначають магнітну взаємодію між намагнічуючої та вимірювальною обмотками; $\dot{Z}_{HOi} \neq \dot{Z}_{OjH}$ – комплексні опори, що визначають магнітну взаємодію між намагнічуючою обмоткою та будь-яким лінійним вихровим струмом в ОК, які в загальному випадку (ферромагнітний матеріал) не рівні між собою; $\dot{Z}_{BOi} \neq \dot{Z}_{OjB}$ – комплексні опори, які визначають магнітну взаємодію між вимірювальною обмоткою та лінійними провідниками вихрових струмів в ОК; \dot{I}_H , \dot{E}_H – комплексний намагнічуючий струм і ЕРС генератора синусоїдальної напруги; \dot{I}_B – комплексне значення струму у ви-

мірjuвальній обмотці ВСП; \dot{I}_{oj} – комплексне значення вихрового струму в кожному з лінійних провідників ОК.

Коефіцієнти головної діагоналі матриці системи рівнянь (1), які характеризують власні опори та індуктивності котушок, знаходять за відомими співвідношеннями. Для знаходження взаємного електромагнітного впливу намагнічуючої та вимірювальної обмоток ВСП на ОК, у роботі отримано співвідношення для розрахунку взаємних індуктивностей у загальному вигляді:

$$M_{\text{HO}} = \frac{l\delta\mu_0\mu_r}{4\pi} \sum_{i=1}^n \frac{2}{\sqrt{(a_{\text{H}} + z_i)^2 + x_2^2}} \left[K + \frac{a_{\text{H}}^2 - z_i^2 - x_2^2}{(a_{\text{H}} - z_i)^2 + x_2^2} E \right]; \quad (2)$$

$$M_{\text{BO}} = \frac{l\delta\mu_0\mu_r}{4\pi} \sum_{i=1}^n \frac{2}{\sqrt{(a_{\text{B}} + z_i)^2 + x_3^2}} \left[K + \frac{a_{\text{B}}^2 - z_i^2 - x_3^2}{(a_{\text{B}} - z_i)^2 + x_3^2} E \right], \quad (3)$$

де l – ефективна довжина лінійного провідника з вихровим струмом в ОК; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ_r – відносна магнітна проникність матеріалу; z_i – поточна координата напрямку якої співпадає з віссю ОК; a_{H} та a_{B} – радіуси намагнічуючої та вимірювальної обмоток відповідно; K і E – повні еліптичні інтеграли першого і другого роду.

Для розробки фізико-математичної моделі системи ВСП-ОК за наявності дефектів на циліндричній поверхні ОК в роботі розглянуто дефекти у вигляді радіальної проточки (1) і тріщин, які мають різний кут нахилу відносно координати z (2, 3, 4), як показано на рис. 3 а. У випадку тріщини (2, 3, 4) змінюється конфігурація вихрострумів лінійних провідників в ОК, як показано на рис. 3 б.

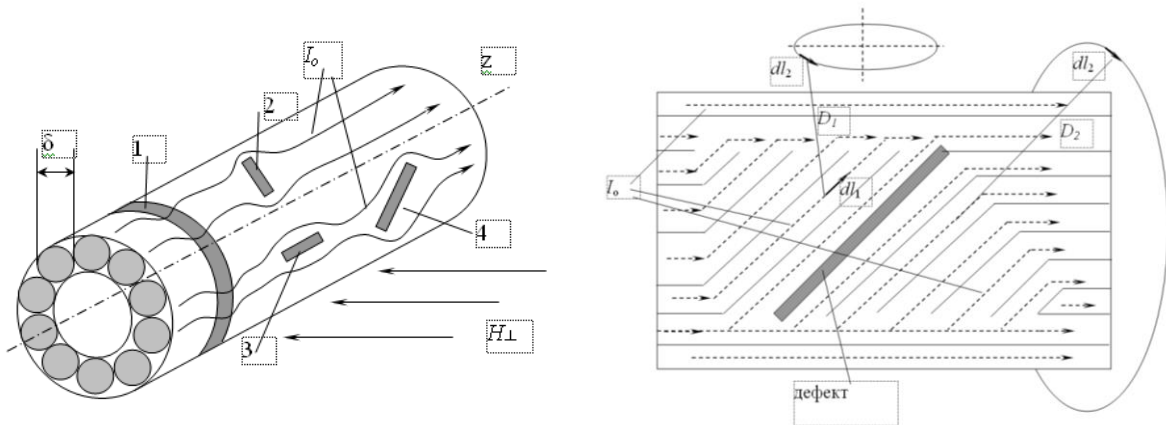


Рисунок 3 – Циліндричний ОК з дефектами різної конфігурації

Встановлено зв'язок між розмірами тріщини та довжиною змінних лінійних провідників a_i , яка знаходиться за формулою:

$$a_i = (a \sin \alpha - i\delta) \sqrt{1 - 2\cos(\pi - 2\alpha)}, \quad (4)$$

де a – довжина тріщини; α – кут нахилу дефекту відносно координати z ;

i – порядковий номер відповідної ділянки лінійного вихрового струму в ОК;

Після визначення всіх геометричних параметрів локальних зон ОК з дефектом, знаходять відповідні активні опори, індуктивності та взаємної індуктивності лінійних вихрострумів провідників, далі отримані коефіцієнти підставляють у матрицю (1).

Розв'язок системи лінійних рівнянь (1) відносно комплексного значення струму у вимірювальній обмотці ВСП, дало можливість отримати співвідношення для визначення

амплітуди та фаза різницевого вихідного сигналу ВСП, тобто різницю між сигналами вимірювальних котушок, розташованих над бездефектною та дефектною областями ОК:

$$E_p = \sqrt{(\operatorname{Re}(\dot{E}_\Sigma - \dot{E}_{\Sigma\partial}))^2 + (\operatorname{Im}(\dot{E}_\Sigma - \dot{E}_{\Sigma\partial}))^2}; \quad (5)$$

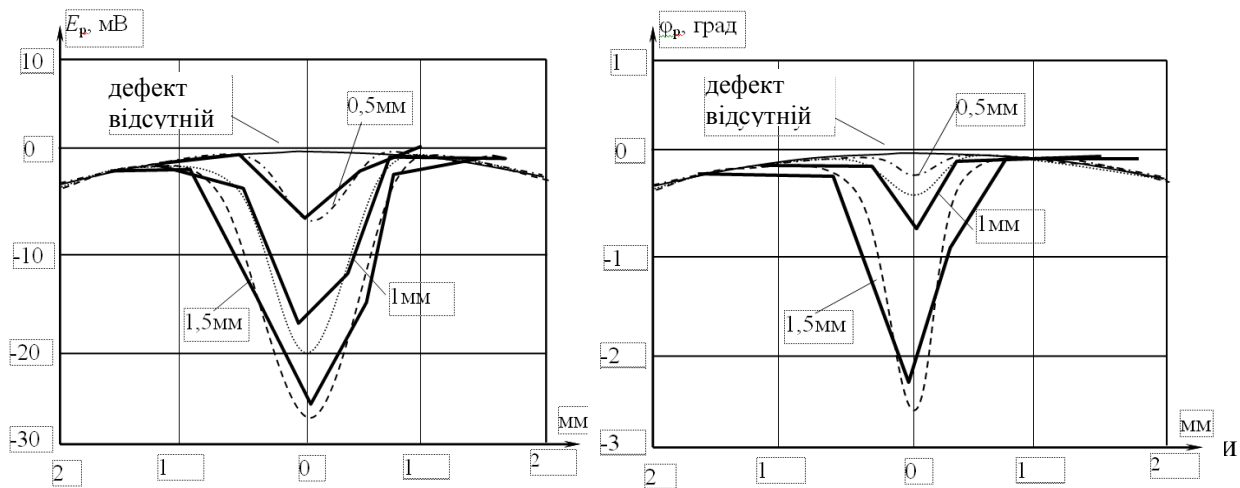
$$\varphi_p = -\operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im}(\dot{E}_\Sigma - \dot{E}_{\Sigma\partial})}{\operatorname{Re}(\dot{E}_\Sigma - \dot{E}_{\Sigma\partial})}, \quad (6)$$

де \dot{E}_Σ – сумарна комплексна ЕРС вимірювальної обмотки ВСП у бездефектній області;
 $\dot{E}_{\Sigma\partial}$ – сумарна комплексна ЕРС вимірювальної обмотки ВСП у дефектній області.

У третьому розділі, для підтвердження розробленого методу розрахунку вихідних сигналів для системи ВСП-ОК проведено експериментальні дослідження. Контроль параметрів дефектів здійснювався за визначенням напруги та фази вихідного сигналу вимірювальних котушок ВСП накладного і прохідного типів. В експерименті використовувалися циліндричні зразки діаметром 30 мм, виготовлені з феромагнітного матеріалу (сталь 45). На поверхні кожного зразка були сформовані штучні дефекти типу 1 – радіальна проточка зі змінними параметрами ширини та глибини в діапазоні (0,5 мм; 1 мм; 1,5 мм) і типу 4 (див. Рис. 3 а) – тріщина довжиною 12 мм із аналогічними параметрами ширини та глибини. Одна з вимірювальних обмоток (накладна або прохідна) розташовувалася у бездефектній області ОК, а інша за допомогою мікрометричного гвинта переміщала вздовж координати z над поверхнею ОК із кроком 0,25 мм.

Проведені в лабораторії кафедри приладів та методів неруйнівного контролю НТУ "ХП" експериментальні дослідження з визначення залежностей амплітуди та фази вихідної напруги ВСП з ОК, в якому присутні дефекти з відомими геометричними параметрами, наведено на графіках рис. 4.

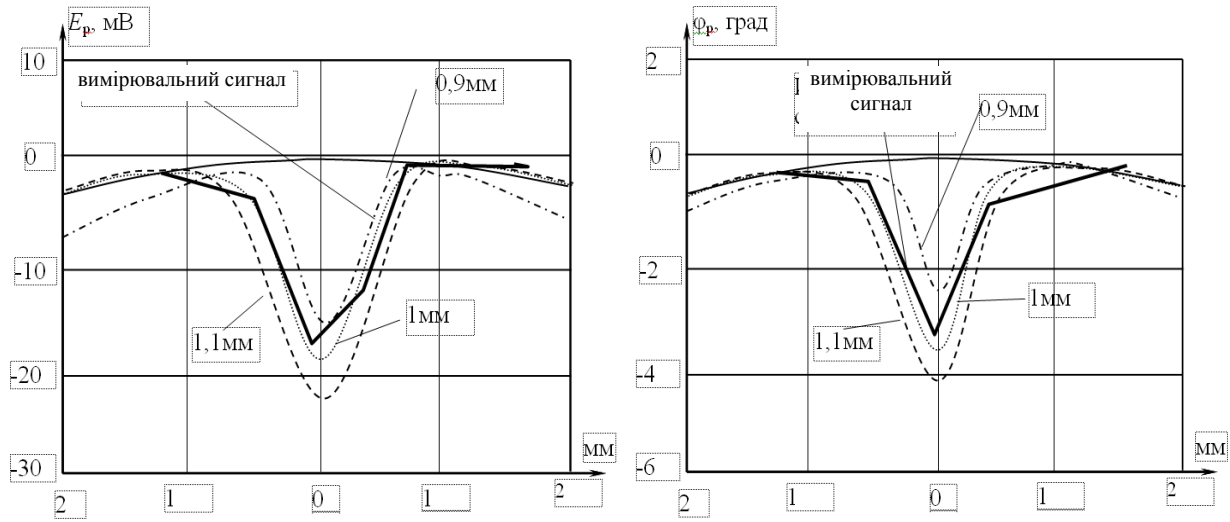
На результати експериментів, які представлені у вигляді безперервної ломаної лінії, накладено розрахункові залежності амплітуди та фази вихідного сигналу ВСП, за отриманими формулами для розроблених моделей системи ВСП-ОК з дефектами.



Перевірка адекватності розроблених моделей системи ВСП-ОК показала, що результати експериментів (суцільна ломана лінія на графіках) за характером та значеннями близькі до розрахункових величин амплітуди і фази сигналу ВСП.

У роботі розроблено метод ідентифікації розміру дефекту, заснований на порівнянні вимірних значень інформаційних параметрів (амплітуда та фаза) сигналу ВСП з ОК за наявності в ньому дефекту з сімейством розрахункових характеристик очікуваних реакцій ВСП на змодельований дефект.

На рис. 5 наведено порівняння експериментально отриманих (суцільна ломана лінія) залежностей амплітуди та фази вихідного сигналу ВСП з ОК за наявності дефекту шириною 1 мм із відповідними розрахунковими функціональними залежностями (штрихові лінії) амплітуди та фази вихідного сигналу перетворювача для змодельованої системи ВСП-ОК з аналогічним дефектом.



фазы вихідного сигналу ВСП з результатами контролю

В якості критерію порівняння використано метод найменших квадратів відхилення відповідних теоретичних і експериментальних залежностей:

$$(E_{рт} - E_{ре})^2 \rightarrow \min \quad (7)$$

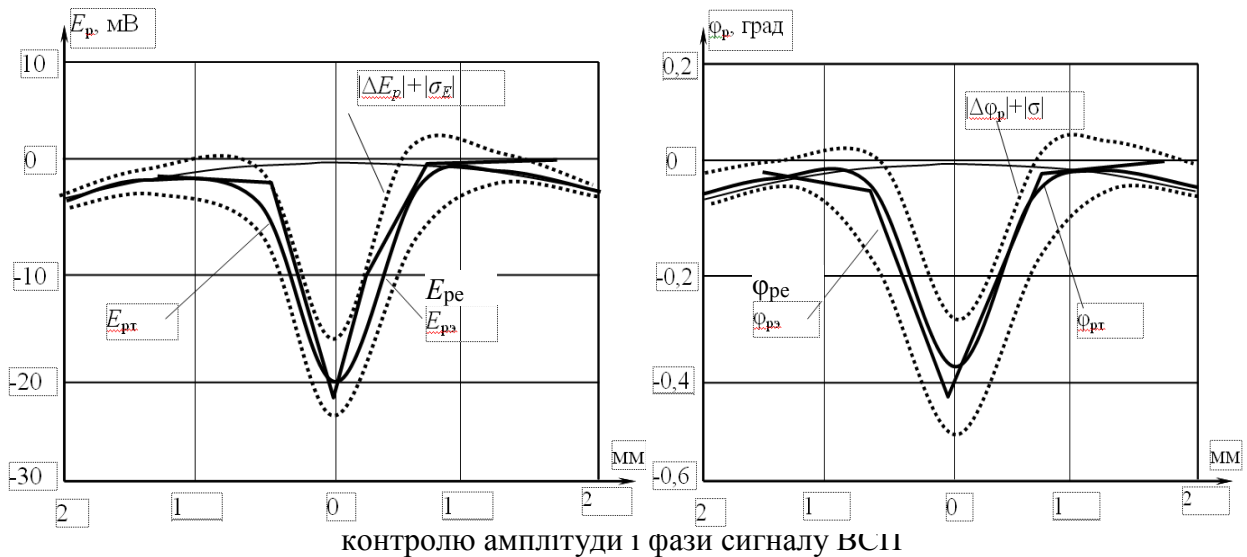
$$(\phi_{рт} - \phi_{ре})^2 \rightarrow \min \quad (8)$$

де $E_{рт}$, $E_{ре}$, $\phi_{рт}$, $\phi_{ре}$ – відповідні розрахункові та експериментальні значення амплітуди і фази вихідного сигналу ВСП з ОК.

При виконанні критерію (7), (8) шляхом перебору всіх можливих значень, виноситься судження про близькість розміру дефекту (у цьому випадку ширина) до однієї або декількох розрахункових залежностей, після чого приймається рішення щодо відповідності розміру дефекту числовому значенню. На результат порівняння будуть істотно впливати як похибки моделювання, так і апаратні похибки вимірювання амплітуди і фази вихідного сигналу ВСП у процесі реального контролю параметрів дефектів.

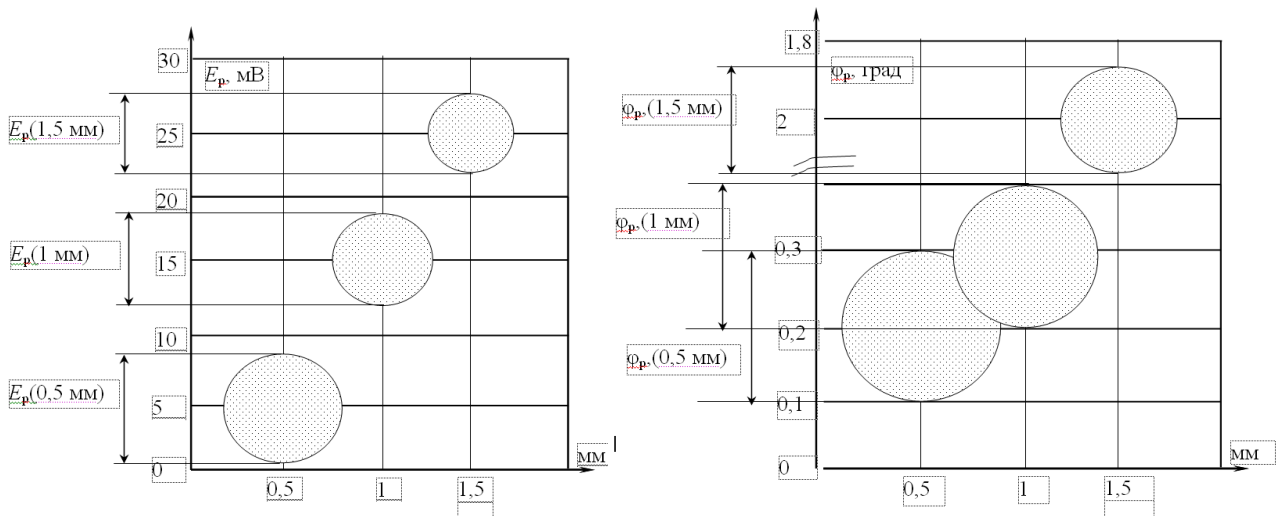
У роботі проведена оцінка похибок моделювання вихідного сигналу ВСП від дефекту за методом обробки результатів опосередкованих вимірювань. Також виконано обробку результатів багаторазових вимірювань для оцінки випадкових похибок вимірювань вихідного сигналу ВСП на контрольних зразках зі штучно сформованими дефектами.

Для випадку контролю дефекту шириною 1 мм на рис. 6 показано зони невизначеності прийняття рішень, які виникають при порівнянні амплітуди та фази змодельованого і вимірюваного сигналів від дефекту, які обумовлені проявом похибок розрахунку та виміру.



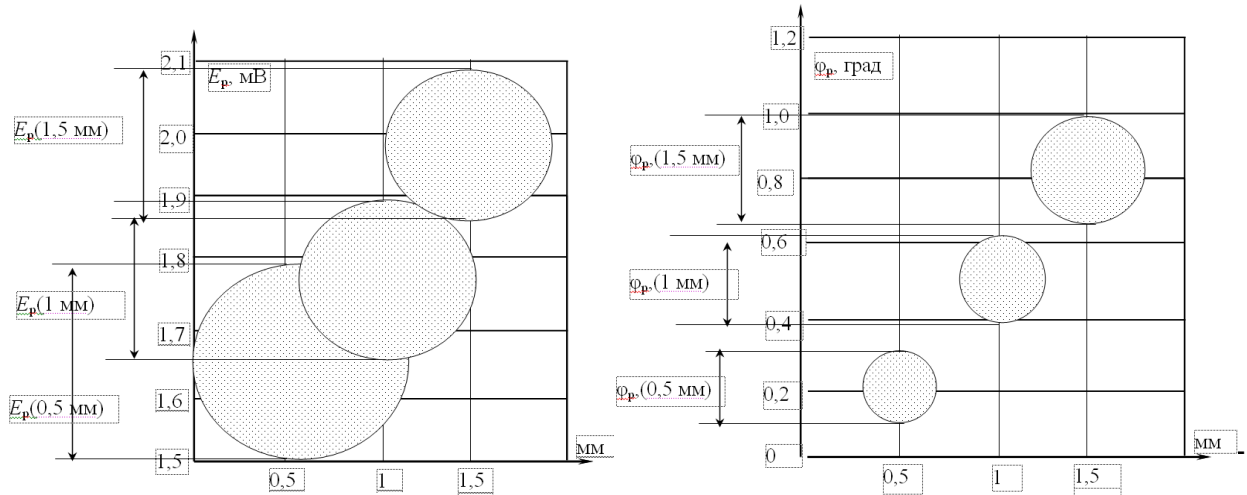
На основі поведінки вихідних сигналів ВСП від різних типів і розмірів дефекту, а також з урахуванням методу ідентифікації та метрологічних характеристик ВСП, побудовано картину розпізнавання розміру дефекту на прикладі контролю ширини дефекту амплітудним і фазовим методом.

На рис. 7 показано області припустимих значень амплітуди та фази вихідного сигналу ВСП під час контролю ширини дефекту (0,5; 1; 1,5 мм) при фіксованій глибині 1 мм і перпендикулярному розташуванні поздовжньої вісі дефекту відносно вісі зразка.



Як видно з рис. 7, у випадку амплітудного методу області припустимих значень сигналу ВСП не перетинаються, тому в цьому випадку можна стверджувати про здатність розрізняти ці дефекти з ймовірністю 0,95 (на підставі довірчої ймовірності 0,95 розподілу похибок під час моделювання та вимірювання сигналів ВСП). У випадку реалізації фазового методу, на підставі рис. 7 можна зробити висновок про невизначеність під час контролю дефектів шириною 0,5 мм і 1 мм, через взаємно-пересічні області значень сигналів ВСП.

Графічне подання отриманих результатів для випадку контролю глибини дефекту наведено на рис. 8.



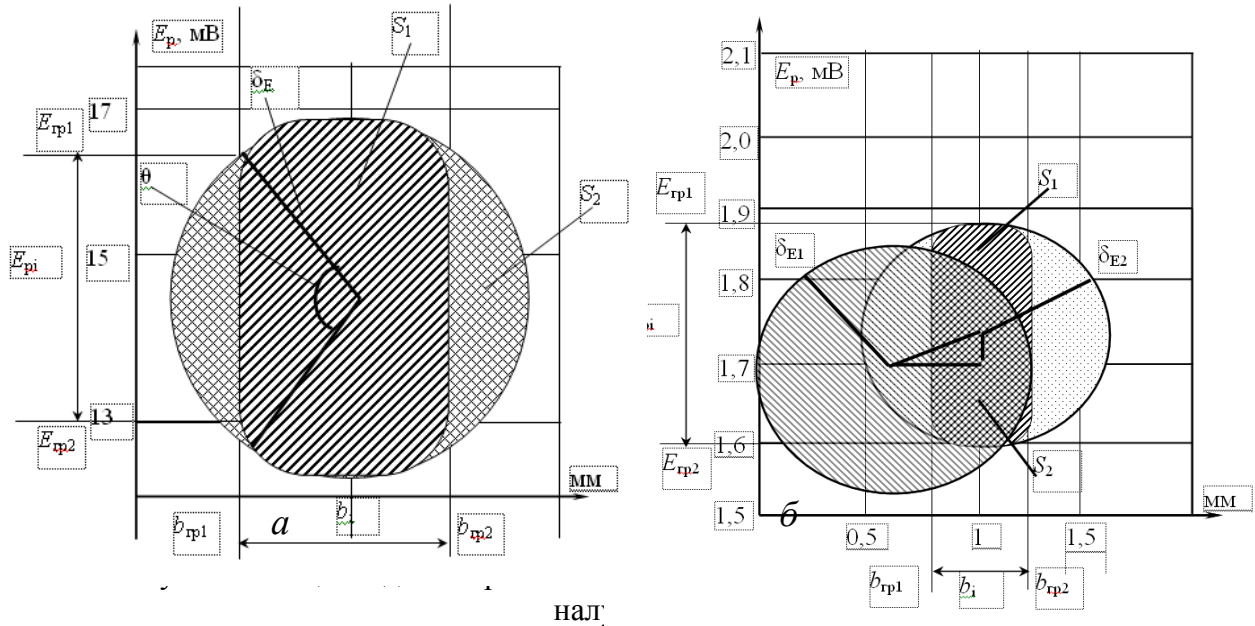
Оскільки амплітуда та фаза вихідного сигналу ВСП є функціями від параметра дефекту, то рішення про попадання дефекту в задані границі допуску приймаються на підставі:

$$E(b_{zp1}) \leq E(b_i) \leq E(b_{zp2}) ; \tag{11}$$

$$\varphi(b_{zp1}) \leq \varphi(b_i) \leq \varphi(b_{zp2}) , \tag{12}$$

де b_{zp1} , b_{zp2} – нижня та верхня границі допуску на контрольований параметр.

На рис. 9 а показано область $S = S_1 + S_2$ можливих значень амплітуди сигналу ВСП для дефекту шириною 1 мм.



Імовірність попадання параметрів дефекту в задані границі допуску визначається співвідношенням:

$$P\{b_{zp1} \leq b_i \leq b_{zp2}\} = \frac{S_1}{S} 0.95 , \tag{13}$$

де S_1 – площа фігури, обмежена внутрішніми границями допуску контрольованих параметрів дефекту та областю припустимих значень сигналу ВСП.

Помилка першого роду α або ймовірність прийняття рішення про невлучення розміру дефекту в задані границі допуску:

$$\alpha = 1 - P\{b_{cp1} \leq b_i \leq b_{cp2}\} = \frac{S_2}{S} 0.95, \quad (14)$$

У випадку взаємно-пересічних зон припустимих значень сигналів ВСП, наведених на рис. 9 б у комбінації із установленим замовником допуску на контрольований параметр дефекту, виникає помилка другого роду β , що полягає у попаданні в заданий допуск (фігура S_1) сигналів, які належать до іншої області значень S_2 :

$$\beta = \frac{S_2}{S_1} 0.95. \quad (15)$$

Достовірність контролю розміру дефекту визначимо у вигляді:

$$P = 1 - \frac{\alpha + \beta}{2}. \quad (16)$$

Для перевірки можливості ідентифікації характерних розмірів дефектів і методу оцінки достовірності контролю в роботі проведено розрахункові та експериментальні дослідження на двох зразках з дефектами типу локальна тріщина і типу радіальна проточка, виготовлених з алюмінієвого сплаву та феромагнітної сталі. Експерименти проводилися для різних значень частоти зондувального електромагнітного поля. Контроль і ідентифікація розмірів дефекту проводилися на штучних дефектах шириною і глибиною 1 мм відповідно. Результати дослідження зведені в таблицях 1, 2.

Таблиця 1 – Результати дослідження сталевго зразка з визначення ширини дефекту амплітудним методом

f , кГц	Сигнал від дефекту 1 мм E_p , мВ	Допуск, $\pm 0,1$ мм			Допуск, $\pm 0,2$ мм		
		P , %	α , %	β , %	P , %	α , %	β , %
20	32,5	92,5	15	0	94,5	11	0
15	23,9	90	17	3	93	10	4
10	15,8	87	19	7	90	12	8

Таблиця 2 – Результати дослідження сталевго зразка з визначення ширини дефекту фазовим методом

f , кГц	Сигнал від де-	Допуск, $\pm 0,1$ мм	Допуск, $\pm 0,2$ мм
-----------	----------------	----------------------	----------------------

	фекту 1 мм φ_p , град	P , %	α , %	β , %	P , %	α , %	β , %
20	0,78	87	9	17	87	5	21
15	0,63	89	10	12	87	8	18
10	0,3	90	11	9	88	9	15
5	0,4	90	17	3	90	11	9
1	0,45	87,5	25	0	89,5	21	0

Результати контролю феромагнітного зразка за визначенням ширини дефекту показують, що частота поля та границя допуску істотно не впливає на достовірності контролю і помилку першого роду. Помилка другого роду залежить від частоти електромагнітного поля, причому з ростом частоти для амплітудного методу вона зменшується та в результаті стає близької до нуля, а для фазового методу навпаки.

Аналогічним чином в роботі проведено дослідження для випадку контролю та ідентифікації глибини дефектів. Проаналізовано отримані результати та зроблено висновок, що при контролі глибини дефекту, у випадку фазового методу, можна прийняти практично безпомилкове рішення ($\beta \approx 0$) щодо параметрів дефекту у широкому частотному діапазоні електромагнітного поля.

У четвертому розділі На основі експериментальних досліджень поведінки вихідних сигналів ВСП від різних типів і розмірів дефектів, а також з урахуванням методу ідентифікації та метрологічних характеристик ВСП, побудовано двомірну картину розпізнавання дефектів з різними розмірами в разі спільного виміру амплітуди і фази сигналу ВСП. На рис. 10 показано області припустимих значень зміни різницевої амплітуди E_p і фази φ_p вихідного сигналу ВСП під час контролю дефектів з різними співвідношеннями їх геометричних розмірів і перпендикулярному розташуванні поздовжньої вісі дефекту відносно вісі зразка.

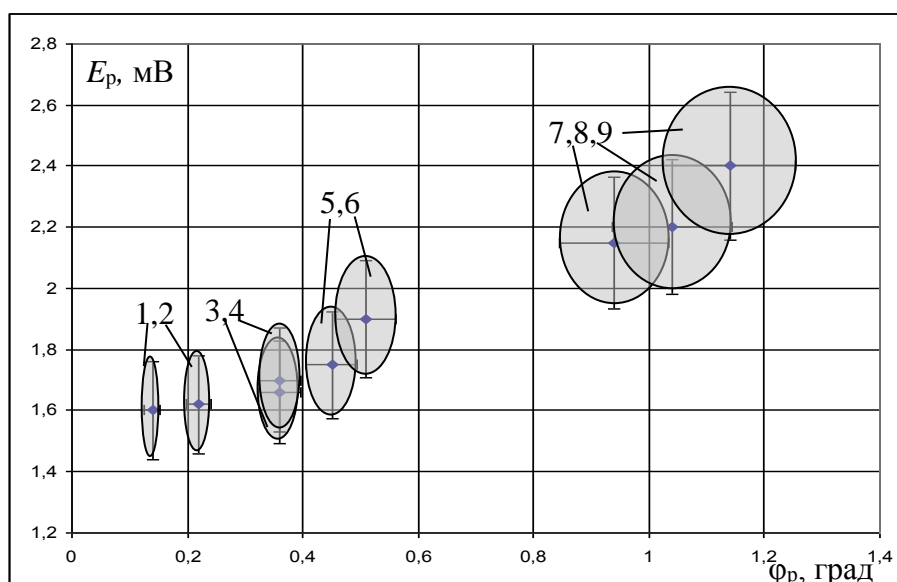


Рисунок 10 – Спільне визначення ширини та глибини дефектів в ОК для частоти зондувального поля $f = 965$ Гц

Аналізуючи отримані залежності двомірного сигналу ВСП (амплітуда та фаза) під час спільного визначення ширини і глибини дефекту з урахуванням зон невизначеності прийняття рішень можна зробити висновки про те, що поряд з можливістю чіткого визначення зазначених параметрів дефекту на різних частотах електромагнітного поля (дефекти типу 1, 2), існують комбінації розмірів ширини та глибини дефекту, при яких неможливо

їх розділення (3, 4). При цьому, дефекти під номерами 5, 6, 7, 8, 9 утворюють пересічні зони невизначеностей, і приймати рішення щодо розміру дефекту необхідно на підставі границь допуску на контрольований параметр і оцінок помилок першого та другого роду за методом, який викладено в третьому розділі цієї роботи.

Для реалізації розробленого методу контролю дефектів, в роботі створено автоматизовану установку на базі однокристальної ЕОМ, яка виконує збір та первинну обробку вимірювальної інформації і передає дані у персональний комп'ютер. На рис. 11 наведена структурна схема розробленого макета автоматизованого пристрою для контролю дефектів у циліндричних феромагнітних виробках.

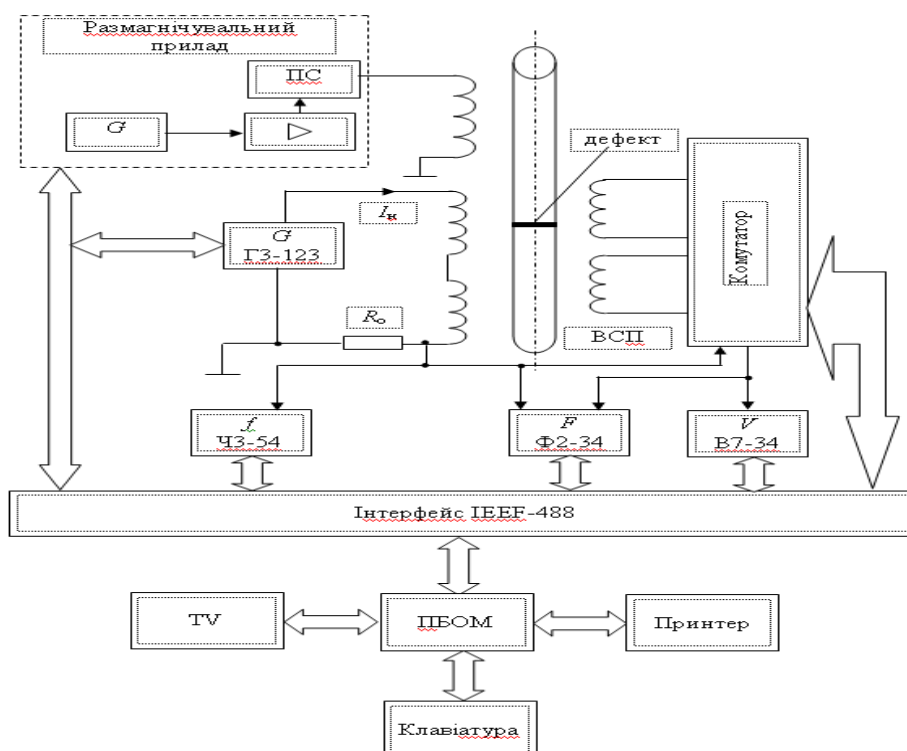


Рисунок 11 – Структурна схема макета автоматизованого пристрою для вихрострумовеого контролю дефектів у циліндричних феромагнітних виробках

Під час проведення дефектоскопії феромагнітних виробів виникають "помилкові" зміни вихідних сигналів ВСП навіть при відсутності в них дефектів, що пов'язано з наявністю в зразку локальних зон намагнічування. Тому проведення процесу розмагнічування зразків є важливим етапом контролю, що дозволяє виключити або в значній мірі зменшити вплив даного ефекту на результат виявлення дефектів у феромагнітних зразках. Для зменшення впливу даного фактора, у роботі побудовано установку для розмагнічування феромагнітних виробів товщиною (радіусом) більше 10 мм, для яких необхідно мати джерело змінного струму з частотою від долів до одиниць Гц та амплітудою, що плавно зменшується від максимального значення (індукції насичення) до нуля за регульований проміжок часу, в залежності від вибраного режиму розмагнічування.

Для підвищення чутливості амплітудних методів контролю два ідентичних накладних датчика включають за диференціальною схемою. Вимірювальний і компенсаційний перетворювачі розташовувані в поперечному полі поблизу циліндричного виробу. Площини датчиків перпендикулярні напрямку збуджуючого поля і розташовані на однаковій відстані від ОК, причому вимірювальний перетворювач розташовувався над дефектом, а компенсаційний над ділянкою без дефекту. Розроблену схему доцільно використовувати під час контролю виробів, які мають досить великі радіуси при безперервному контролі, як наприклад, під час контролю цілісності броньованої оболонки силових кабелів.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі, на основі аналізу існуючих методів і пристроїв безконтактного контролю параметрів дефектів у металевих виробках та проведенні досліджень в області вихрострумowego контролю, вирішено важливу науково-практичну задачу створення теоретично обґрунтованих методів і пристроїв для виявлення дефектів в деталях матеріалу обладнання циліндричної форми.

1. Розроблено фізико-математичну модель взаємодії циліндричного ОК з вихрострумовим перетворювачем у поперечному магнітному полі, яка заснована на суперпозиції елементарних магнітних полів струмів обмоток ВСП і лінійних вихрових струмів в ОК.

2. Запропоновано лінійну модель обтікання індукованим вихровим струмом поверхневого дефекту в ОК, що дає можливість розрахувати вихідні сигнали накладної та прохідної вимірювальних обмоток ВСП залежно від геометричних розмірів дефекту і його орієнтації у просторі.

3. Проведено експериментальні дослідження з визначення чутливості вихрострумowego перетворювача до різних параметрів дефекту в поперечному магнітному полі та встановлено адекватність розроблених теоретичних моделей системи ВСП-ОК з дефектами.

4. Розроблено метод ідентифікації розміру дефекту на основі порівняння розрахункових і вимірюваних сигналів ВСП від дефекту, з урахуванням похибок моделювання та вимірювання, а також визначено зони невизначеності прийняття рішень за результатами контролю.

5. Розроблено алгоритм і функціональну схему макета автоматизованого лабораторного комплексу для вихрострумowego контролю дефектів, який реалізований з використанням стандартної високоточної вимірювальної апаратури та ПЕОМ. Розроблено спосіб та пристрій для зменшення впливу зміни зазору між перетворювачем і об'єктом контролю на результати динамічного контролю. Оцінено методичну похибку впливу зазору, яка становила не більше 0,1 %. При цьому отримано збільшення чутливості перетворювача у два рази за рахунок відповідного включення вимірювальних обмоток ВСП.

6. Результати роботи впроваджено на АК "Харківобленерго" та в навчальному процесі на кафедрі приладів та методів неруйнівного контролю НТУ "ХП".

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Скопенко В.В. Модель параметричного вихрострумowego перетворювача / Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа, А.А. Авраменко, В.В. Скопенко // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ, 2008. – №21. – С. 9–13.

Здобувачем розроблена модель параметричної системи ВСП-ОК, аналітично знайдено рівняння для визначення складових комплексного опору перетворювача.

2. Скопенко В.В. Вихретоковый преобразователь с поперечным полем для бесконтактного контроля вращающего момента на валу / Б.М. Горкунов, А.А. Авраменко, И.В. Тюпа В.В. Скопенко, // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2008. – №30. – С. 439–440.

Здобувачем запропоновано метод, що дозволяє розширити функціональні можливості для випадку безконтактного визначення обертового моменту.

3. Скопенко В.В. Переменно-частотный вихретоковый преобразователь с поперечным полем / Б.М. Горкунов, А.А. Авраменко, С.Г. Львов, В.В. Скопенко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2008. – №48. – С.144–147.

Здобувачем запропоновано два метода реалізації вихрострумowego перетворювача та показано їх переваги та недоліки.

4. Скопенко В.В. Модель вихретокового преобразователя для контроля цилиндрических образцов в поперечном поле / Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа, В.В. Скопенко, И.Х. Шахин // Технічна електродинаміка. – Київ, 2009. – Тем. вип., ч.5. –С.72–74.

Здобувачем наведено модель вихрострумowego перетворювача з поперечним однорідним полем, що досить точно описує процеси, які відбуваються в намагнічуваному та вимірювальному ланцюзі.

5. Скопенко В.В. Экспериментальное определение дефектов вихретоковым преобразователем с поперечным однородным полем / А.А. Авраменко, Н.Н. Сиренко, В.В. Скопенко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2009. – №14. – С.45–48.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження з виявлення дефектів та показана можливість визначення глибини та ширини дефекту при використанні вихрострумowego перетворювача з однорідним поперечним полем.

6. Скопенко В.В. Моделирование сигнала ВТП от дефектов в слабом поперечном магнитном поле / Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа, В.В. Скопенко, И.Х. Шахин // Технічна електродинаміка. – Київ, 2010. – Тем. вип., ч.1. –С.234–236.

Здобувачем розроблено метод розрахунку вихідного сигналу ВСП з мінімумом затрат часу.

7. Скопенко В.В. Определение поверхностных дефектов в поперечном электромагнитном поле ферромагнитных цилиндрических объектов / И.В. Тюпа, Б.М. Горкунов, А.А. Авраменко, В.В. Скопенко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – №12. – С.202–205.

Здобувачем проведено експериментальні дослідження контролю дефектів циліндричних виробів у поперечному електромагнітному полі.

8. Скопенко В.В. Вихретоковый контроль поверхностных и под-поверхностных деформаций структуры цилиндрических валов / Б.М. Горкунов, В.В. Скопенко, И.В. Тюпа // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – №28. – С. 538–539.

Здобувачем розроблено метод розширення діапазону контролю механічної деформації в поверхневих шарах за рахунок використання амплітудної та фазової функції перетворення ВСП.

9. Скопенко В.В. Вероятностные подходы к определению размеров дефектов вихретоковым методом / Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа, В.В. Скопенко, И.Х. Шахин // Технічна електродинаміка. – Київ, 2011. – Тем. вип., ч.2. –С.231–234.

Запропоновано метод моделювання реакції ВСП на дефект, що спрощує процедуру розрахунку теоретичних залежностей сигналу та процедуру ідентифікації розміру дефекту в реальному масштабі часу.

10. Скопенко В.В. Вихретоковий контроль дефектів циліндричних изделий в поперечном полі / А.А. Авраменко, В.В. Скопенко, И.Б. Горкунова // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2011. – №19. – С.84–87.

Здобувачем розроблено метод підвищення точності контролю при вихрострумівій дефектоскопії виробів за рахунок зменшення впливу зазору між контрольованим виробом та вимірювальною котушкою перетворювача.

11. Скопенко В.В. Принятие решений в задачах электромагнитного неразрушающего контроля / А.А. Авраменко, В.В. Скопенко, И.Б. Горкунова // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2012. – №3. – С.130–135.

Здобувачем запропоновано метод оцінки достовірності контролю з урахуванням систематичних і випадкових похибок розрахунку і вимірювання вихідних сигналів перетворювача.

12. Пат. на корисну модель №61060 (Україна), МПК(2010) G01N27/90 Вихрострумівій спосіб контролю механічних напруг. / Горкунов Б.М., Скопенко В.В., Тюпа І.В., Тищенко А.А.; заявник і власник НТУ"ХПІ" – №u201014286; заяв. 29.11.2010; надрук. 11.07.2011. – Бюл. №13.

Здобувачем запропоновано безконтактний вихрострумівій спосіб контролю механічних напруг, що підвищує надійність контролю.

13. Скопенко В.В. Физическое моделирование вихретокового преобразователя проходного типа / Горкунов Б.М. Тюпа С.Ю., Тюпа И.В., Скопенко В.В. // Metrology and metrology assurance – 2007: 17th National scientific symposium, 10-14 September, 2007: матер. конф. – Sozopol, Bulgaria. – P.121–125.

Здобувачем зроблено вибір математичної моделі трансформаторного перетворювача з циліндричним виробом і отримані математичні вирази, які поєднують інформаційні параметри контролю з вихідними сигналами ВСП.

14. Скопенко В.В. Работы НТУ "Харьковский политехнический институт" в области НК / Г.М. Сучков, Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа, В.В. Скопенко и др. // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: междунар. науч.-техн. конф., 11-13 марта 2008г: тезисы докл. – М.: Машиностроение, 2008. – С.191–193.

Здобувачем розроблено моделі ВСП, що описують поведінку структури поверхневих шарів металевих (магнітних та немагнітних) виробів.

15. Скопенко В.В. Расчетная модель параметрического вихретокового преобразователя / Горкунов Б.М., Тюпа И.В., Авраменко А.А., Скопенко В.В. // Приладобудування: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф., 22-23 квітня 2008г: матер. конф. – К.: ПБФ, НТУУ "КПІ", 2008. – С.218–219.

Здобувачем розроблена модель параметричного вихрострумівій перетворювача з магнітним і немагнітним ОК, яка побудована на основі взаємодії довільно розташованих у просторі кілець зі струмом.

АНОТАЦІЇ

Скопенко В. В. Вихрострумівій перетворювачі для контролю дефектів деталей енергетичного обладнання циліндричної форми. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2012.

Дисертаційна робота присвячена розробці досить простого методу розрахунку вихрострумівій перетворювача з об'єктом контролю для виявлення та визначення параметрів поверхневого дефекту, на основі порівняння сигналів ВСП в реальному масштабі часу, з урахуванням похибок моделювання та вимірювання, і прийняття рішення про результати контролю з розрахованою ймовірністю.

В дисертаційній роботі розроблено фізико-математичну модель взаємодії вихрострумівій перетворювача з циліндричним об'єктом контролю з поверхневим дефектом,

яка заснована на розрахунку суперпозиції елементарних струмів обмоток ВСП та індукованих вихрових струмів в дефектній та бездефектній зонах поверхні циліндричного об'єкту. Експериментальні дослідження підтвердили адекватність розроблених моделей. Розроблено метод ідентифікації розміру дефекту, заснований на порівнянні модельного та вимірювального сигналу ВСП від дефекту. Виконано аналіз похибок розрахунку модельного сигналу від дефекту та випадкових похибок вимірювального сигналу ВСП від реального дефекту. Розроблено метод оцінки достовірності контролю дефектів та визначення похибок першого та другого роду. Для реалізації розробленого методу визначено алгоритм вимірювальних і розрахункових процедур і розроблено макет автоматизованого пристрою вихрострумове контролю параметрів дефектів.

Ключові слова: прилади неруйнівного контролю, вихрострумівий контроль, поверхневий дефект, ідентифікація параметрів дефекту, достовірність контролю, ферромагнітні та неферромагнітні матеріали.

Скопенко В. В. Вихретоковые преобразователи для контроля дефектов деталей энергетического оборудования цилиндрической формы. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2012.

Диссертационная работа посвящена разработке достаточно простого метода расчета вихретокового преобразователя с объектом контроля для выявления и определения параметров поверхностного дефекта, на основе сравнения сигналов ВТП в реальном масштабе времени, с учетом погрешностей моделирования и измерения, и принятие решения о результатах контроля рассчитанной вероятностью.

На основе предложенной физико-математической модели взаимодействия вихретокового преобразователя с цилиндрическим объектом в диссертационной работе разработан метод бесконтактного обнаружения и контроля основных геометрических параметров дефектов в металлических изделиях. Данная модель основана на суперпозиции электромагнитных полей элементарных токов в намагничивающей и измерительной обмотках ВТП, а также индуцированных линейных вихревых токов в протяженном цилиндрическом объекте контроля.

Для дефектной и бездефектной зон контроля поверхности цилиндрического объекта получены аналитические выражения, описывающие изменение амплитуды и фазы выходного сигнала измерительной обмотки ВТП. Экспериментальные исследования, проведенные на реальных образцах с искусственными дефектами, подтвердили адекватность разработанных моделей системы ВТП-ОК. В работе разработаны однопараметровый (амплитуда или фаза) и двухпараметровый (амплитуда и фаза) методы вихретокового контроля геометрических параметров дефектов.

Предложен метод идентификации размера дефекта, основанный на сравнении смоделированного и измерительного сигнала ВТП от дефекта. Выполнен анализ погрешностей расчета смоделированного сигнала от дефекта и случайных погрешностей измерительного сигнала ВТП от реального дефекта. Предложен метод оценки достоверности контроля геометрических параметров дефектов с учетом погрешностей первого и второго рода как для однопараметрового так и для двухпараметрового метода контроля. Для реализации разработанного метода определен алгоритм измерительных и расчетных процедур. Разработан действующий макет автоматизированной установки с вихретоковым преобразователем для обнаружения и контроля параметров дефектов, в протяженных цилиндрических изделиях, размещенных в однородном поперечном электромагнитном поле.

Для надежного обнаружения и контроля геометрических параметров дефектов при исследовании ферромагнитных изделий разработано и изготовлено устройство для маг-

нитной подготовки ферромагнитных образцов при проведении вихретокового контроля дефектов в случае, когда предварительная история исследуемого образца неизвестна. В этом случае исключаются ложные срабатывания устройства от локально намагниченных областей объекта контроля, тем самым повышается надежность обнаружения дефектов.

Разработан способ и устройство для уменьшения влияния изменения зазора между измерительными обмотками преобразователя и объектом контроля на результаты динамического контроля. Оценена методическая погрешность влияния зазора, которая для нашего случая составила не более 0,1%. При этом получено увеличение чувствительности преобразователя при тех же режимах контроля в два раза за счет соответствующего включения измерительных обмоток преобразователя.

Ключевые слова: приборы неразрушающего контроля, вихретоковый контроль, поверхностный дефект, идентификация параметров дефекта, достоверность контроля, ферромагнитные и неферромагнитные материалы.

Skopenko V. V. Eddy current converters for control of parts of power equipment defects cylindrical shape. – A manuscript.

Dissertation for scientific degree of candidate of technical sciences in specialty 05.11.13 – Instruments and methods of control and composition determination of substances. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2012.

The dissertation is devoted to development rather simple method of calculation of eddy current transducer with the object of control for the detection and determination of parameters of surface defect on the basis of comparison signals ECT in real time, taking into account the errors of modeling and measurement, and the decision on inspection results of the calculated probability.

In the thesis developed physical and mathematical model of the interaction of eddy current transducer with a cylindrical object with a surface defect control is based on calculating the superposition of elementary current windings ECT and induced eddy currents in the defective and defect-free surface areas of cylindrical object. Experimental studies have confirmed the adequacy of the developed models. The method of identifying the size of the defect, based on a comparison of model and measurement signal ECT from defect. The analysis of errors of calculation model of the defect signal and random errors of the measuring signal ECT the real defect. A method for assessing the reliability of the control defects and determine the errors of the first and second kind. To implement the measurement and calculation procedures in the developed design automated installation control unit of magnetic defects and sample preparation control.

Key words: devices for nondestructive control, eddy current testing, surface defect, identification of defect, reliability of control, ferromagnetic and nonmagnetic product.