

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**Хомяк Юрій Валентинович**



УДК 620.179.14

**ВИХРОСТРУМОВИЙ ДЕФЕКТОСКОП З КОМПЕНСАЦІЄЮ**  
**ВПЛИВУ СТАНУ ПОВЕРХНІ ФЕРОМАГНІТНИХ МЕТАЛОВИРОБІВ**

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

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

**Харків – 2013**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі приладів і методів неруйнівного контролю Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Сучков Григорій Михайлович,**  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
завідувач кафедри приладів і методів  
неруйнівного контролю

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Сахацький Віталій Дмитрович,**  
Українська інженерно-педагогічна академія,  
професор кафедри радіоелектроніки і комп'ютерних  
систем

кандидат технічних наук, доцент  
**Хорошайло Юрій Євгенійович,**  
Харківський національний університет  
радіоелектроніки, професор кафедри проектування та  
експлуатації електронних апаратів

Захист відбудеться «30» \_\_\_\_\_ 05 \_\_\_\_\_ 2013 р. о 14-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 при Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

Автореферат розісланий «26» \_\_\_\_\_ 04 \_\_\_\_\_ 2013 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



С.М. Глоба

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Для оцінки технічного стану відповідальних об'єктів і вузлів на різних стадіях виробництва і експлуатації у багатьох галузях промисловості широко застосовуються методи неруйнівного контролю якості.

Особливе місце серед великої кількості методів і засобів неруйнівного контролю металевих виробів займають вихрострумові методи. Для здійснення сучасної вихрострумової дефектоскопії застосовують широку номенклатуру серійних приладів. Але в кожному окремому випадку має місце специфіка (структура і властивості об'єкта контролю, його форма і конструкція і т.п.), яка обумовлює необхідність додаткових досліджень і розробку спеціалізованих засобів контролю на додаток до традиційних. Особливо це стосується дефектоскопії виробів, які мають складну поверхню. При цьому важливою проблемою є відображення форми і розмірів виявлених дефектів у виробках, які знаходяться як в експлуатації, так і при їх виготовленні, тобто потрібний перехід від дефектоскопії до дефектометрії.

Головною вимогою до сучасних дефектоскопів є можливість виконувати контроль різноманітних виробів як за формою, так і за властивостями. Найбільш розповсюдженими об'єктами, які потребують визначення якості, є феромагнітні металовироби. При проведенні контролю доцільно враховувати температуру металу і довкілля. Дефектоскоп повинен мати можливість оцінювання еквівалентних геометричних розмірів виявлених дефектів з відображенням результатів візуально і на слух.

При практичному застосуванні вихрострумових дефектоскопів важливим параметром є значення відношення сигнал-шум. Окрім амплітуди корисного сигналу з вихрострумового перетворювача, ця характеристика обумовлена індустриальними електромагнітними завадами, характеристиками схем виміру, втратами в кабелі, що з'єднує датчик і прилад. Тому обґрунтування вихрострумового методу контролю та реалізуючого його засобу, які забезпечують виявлення та визначення характеристик дефектів феромагнітних металовиробів за наявності поверхні з високою шорсткістю, є актуальною науково-практичною задачею, яка визначає напрям дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана на кафедрі приладів і методів неруйнівного контролю НТУ «ХПІ» у рамках держбюджетних НДР МОН України «Дослідження можливості створення прототипів приладів неруйнівного контролю нового покоління з використанням енерго- і ресурсозберігаючих технологій» (№ДР 0111U002280), «Розробка методів і макетів приладів для неруйнівного контролю якості виробів зі зменшеними витратами енергії і матеріалів» (№ДР 0113U000444); госпдоговірних тем: «Розробка сучасних методів і засобів ультразвукового, вихрострумового і магнітного контролю» (ПП «ДДП», м. Миколаїв), «Ремонт, налаштування, калібрування і перевірка двох приладів ПФ-2М» (ПАТ «Харківський підшипниковий завод»,

м. Харків) та пошукових НДР кафедри: «Розробка вихрострумowego дефектоскопа для контролю металовиробів зі зменшеним впливом якості поверхні на результати контролю», «Розробка середньочастотного формувача прямокутних імпульсів ТТЛ рівня з регулюванням у діапазоні 0,1...6 МГц з електронним управлінням» (План НДР НТУ «ХП», м. Харків) в яких здобувач був керівником, відповідальним виконавцем і виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи – підвищення ефективності вихрострумової дефектоскопії при контролі феромагнітних металовиробів з шорсткою поверхнею та різними електромагнітними властивостями металу.

Для досягнення мети поставлені задачі:

- провести аналіз існуючих методів і засобів електромагнітної дефектоскопії і дефектометрії, виявити їх недоліки і визначити коло завдань з їх вдосконалення;

- розробити і дослідити фізико-математичну модель взаємодії вихрострумowego перетворювача (ВСП) з об'єктом контролю без дефекту та з дефектом, розробити метод вихрострумowego контролю, який дає змогу компенсувати вплив властивостей поверхні на результат контролю;

- теоретично і експериментально дослідити чинники, які впливають на достовірність роботи вихрострумowych дефектоскопів і встановити допустимі межі їх змін;

- розробити вдосконалений ВСП для засобів вихрострумової дефектоскопії;

- на основі розробленого ВСП і результатів досліджень розробити засоби вихрострумової дефектоскопії з можливістю контролю феромагнітних металевих об'єктів із складною поверхнею і оцінити їх можливості.

*Об'єкт досліджень* – процес взаємодії електромагнітного поля з металевим об'єктом, у результаті якого формується сигнал, який несе інформацію про наявність і параметри дефектів поверхні.

*Предмет досліджень* – параметри вихрострумової дефектоскопії електропровідних феромагнітних виробів і матеріалів.

**Методи досліджень.** Теоретичні положення дисертаційної роботи базуються на положеннях електротехніки, диференціальному і інтегральному численні, які використані при побудові фізико-математичної моделі взаємодії електромагнітного поля з електропровідним виробом, і розрахунках встановлення зв'язку між інформативними параметрами вихрострумowego контролю з дослідженими характеристиками дефектів поверхні; методах оцінки і обробки первинної інформації як функції параметрів вихрострумowego контролю. При побудові вихрострумowych перетворювачів і дефектоскопа використані методи схемо- і системотехніки.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше на основі реєстрації сигналів, обумовлених просторовим спотворенням вектора напруженості електромагнітного поля вихрових струмів, сформованого поверхневим дефектом, розроблено метод вихрострумової дефектоскопії електропровідних феромагнітних виробів,

який дозволяє ефективно контролювати метал при значній шорсткості та змінах електромагнітних характеристик поверхні (патент України №73445 U);

– вперше експериментально доведено, що для забезпечення максимального виявлення дефектів типу тріщина робочу зону ортогонального вихрострумowego перетворювача необхідно орієнтувати під кутом  $40^{\circ}$ ... $50^{\circ}$  відносно напрямку найбільшого розвитку тріщини;

– отримала подальший розвиток фізико-математична модель взаємодії ортогонального вихрострумowego перетворювача з електропровідним виробом за наявності поверхневих дефектів, що дало можливість визначати орієнтацію дефекту типу тріщина і його форму;

– експериментально встановлено, що ефективно виявлення дефектів поверхні феромагнітних металовиробів забезпечується при частоті живлення ортогонального вихрострумowego перетворювача в діапазоні 20–60 кГц.

**Практичне значення одержаних результатів** для контролю якості промислових металовиробів полягає у розробці та виготовленні модифікацій ортогональних вихрострумowych перетворювачів для виявлення поверхневих дефектів і оцінки їх параметрів.

Розроблено і виготовлено вихрострумовой дефектоскоп для виявлення поверхневих дефектів і оцінки їх параметрів, результати контролю якого незначно залежать від властивостей поверхні якісного виробу (патент України №55471 U).

Вихрострумовой дефектоскоп з ортогональним ВСП пройшов успішне випробування в умовах ПАТ «МК «Азовсталь» (м. Маріуполь).

Результати дисертаційної роботи впровадженні на ТОВ «Практика-М12» (м. Харків) та в навчальному процесі на кафедрі приладів і методів неруйнівного контролю НТУ «ХПІ» при виконанні дипломних робіт бакалаврів і спеціалістів.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати роботи отримані здобувачем самостійно. Серед них: розробка генератора для досліджень вихрострумowego перетворювача, який дозволяє плавно регулювати частоту, шпаруватість пакетів імпульсів і їх пікову потужність; проведення аналізу можливості підвищення ефективності вихрострумowego контролю; моделювання вихрострумowego перетворювача як індуктивно пов'язаних коливальних контурів; результати досліджень модифікованого вихрострумowego перетворювача; результати досліджень частотних характеристик накладного ортогонального вихрострумowego перетворювача; дослідження раціональної частоти збуджувального струму накладного вихрострумowego перетворювача, при якій досягається максимальне значення сигнал-шум; розробка засобів вихрострумowego контролю, що дозволяють визначати тип дефекту, який виявляється, з оцінкою його глибини; теоретичний аналіз роботи накладного трансформаторного вихрострумowego перетворювача; основні принципи побудови вузлів і блоків вихрострумowego дефектоскопа його розробка та результати дослідження створеного приладу.

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Основні результати

дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: VII Міжнародній конференції «Неруйнівний контроль і технічна діагностика в промисловості» (Москва, 2008); VII і IX Міжнародних науково-технічних конференціях «Приладобудування: стан і перспективи» (Київ 2008, 2010); XVI, XVII і XVIII Міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2008, 2009, 2010); III науково-практичній конференції «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (Івано-Франківськ, 2011).

**Публікації.** Основні положення дисертації опубліковані в 16 наукових працях, у тому числі: в 6 у фахових виданнях України, 2 патентах України, 8 – у матеріалах конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації становить 168 сторінок, з них: основний текст – 122 сторінки, 54 рисунки до тексту, 18 рисунків на 11 сторінках; 3 таблиці до тексту, 3 додатки на 7 сторінках; 197 найменувань використаних джерел на 24 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність вибраної теми, сформульовано мету та основні задачі дисертаційної роботи, наведено дані про її зв'язок з науковими програмами, викладено наукову новизну і практичне значення досліджень, особистий внесок здобувача, вказано відомості щодо апробації результатів дисертації, їх публікації та впровадження.

У **першому розділі** виконано аналіз методів і засобів вихрострумowego контролю матеріалів і виробів. Використано накопичений у даному напрямку науки і техніки світовий досвід, в який зробили свій внесок наукові школи під керівництвом: В.О. Троїцького, В.Т. Володарського, О.М. Карпаша, І.С. Кісіля, С.М. Маєвського, І.П. Білокура, В.В. Мірошникова, В.М. Учаніна, Р.М. Джали, Й.І. Стенцеля і вчені: В.В. Ключев, Б.В. Артем'єв, В.Т. Бобров, В.Ф. Мужичий, П.М. Шкатов, В.Г. Герасимов, В.Ф. Гамалій, М.М. Зацепін, Г.М. Сучков, В.П. Себко, В.Я. Раєвський, П.І. Беда, Ю.К. Федосенко, Ю.М. Шкарлет, А.С. Бакунов, В.С. Соколов, В.В. Дякін, Satish S. Udpa, Fr. Förster, T. Theodoulidis, John R. Bowler, N. Harfield, H. Hoshikawa та багато інших.

Проаналізовано відомі методи і засоби вихрострумowego контролю виробів і матеріалів, які дають можливість підвищити ефективність вихрострумовой дефектоскопії і дефектометрії. На підставі огляду науково-технічної та патентної літератури, аналізу і узагальнень досліджень за вибраним напрямком визначено основні невирішені задачі та обґрунтовано вибраний напрямок досліджень.

У **другому розділі** наведено результати теоретичних досліджень, спрямованих на обґрунтування фізико-математичної моделі процесу взаємодії провідника зі струмом з провідним виробом без дефекту та у випадку наявності

дефекту поверхні типу тріщина. Розроблено модель трансформаторного вихрострумowego перетворювача, на роботу якого не суттєво впливають нерівності поверхні та зміни фізичних характеристик металу. Проведено модельні дослідження розробленого перетворювача. Встановлено міри впливу різних факторів, які можуть визначати результати неруйнівного контролю вихрострумowym перетворювачем.

На першому етапі вихрострумовой перетворювач представлено як систему контурів з трансформаторним зв'язком. Суть фізико-математичної моделі відображена на рис.1.

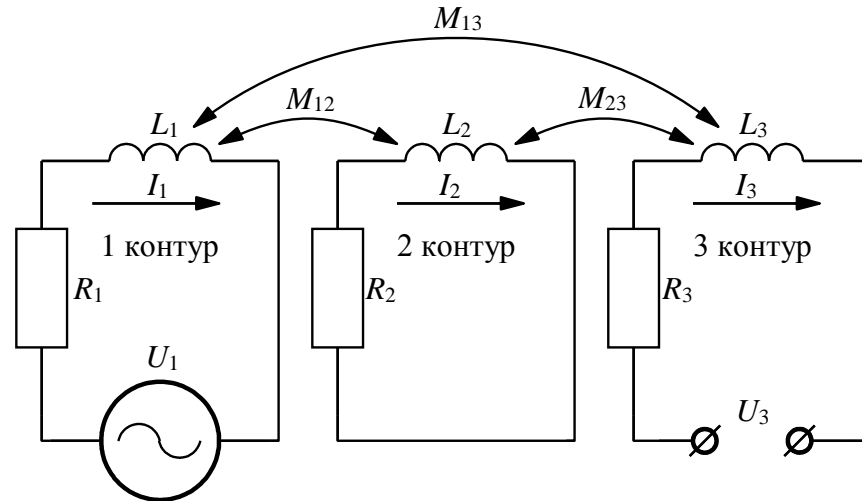


Рис.1. Еквівалентна схема узагальненого накладного трансформаторного вихрострумowego перетворювача

На перетворювача відповідно;  $U_1$  – напруга, прикладена до збуджуючої обмотки;  $R_2$ ,  $L_2$ ,  $I_2$  – еквівалентні електричні параметри досліджуваного зразка;  $R_3$ ,  $L_3$ ,  $I_3$  – параметри приймальної котушки;  $U_3$  – сигнал перетворювача;  $M_{12}$ ,  $M_{23}$ ,  $M_{13}$  – взаємні індуктивності між 1-м і 2-м, 2-м і 3-м, 1-м і 3-м контурами відповідно. Використавши закони Кірхгофа, враховуючи, що приймальна котушка приєднана до високоімпедансного входу підсилювача, отримано

$$\dot{U}_3 = \dot{I}_1 \left( j\omega M_{13} + \omega^2 \frac{M_{12} M_{23}}{R_2 + j\omega L_2} \right). \quad (1)$$

Член  $j\omega M_{13}$  є значним за величиною і не залежить від властивостей об'єкта контролю, а є лише характеристикою перетворювача. Члени  $M_{12}$  і  $M_{23}$  суттєво залежать від шорсткості поверхні та фізичних властивостей матеріалу. Тому визначені величини повинні бути виключені за умови відсутності поверхневих дефектів. Але за вказаної умови, члени  $M_{12}$  і  $M_{23}$  мають з'являтися, якщо на поверхні металу виникне дефект. Указане фізико-технічне протиріччя може бути вирішено за умови, що робоча лінійна частина вихрового струму буде змінювати напрямок течії при появі дефекту. Виникає просторове спотворення електромагнітного поля, сформованого

вихровим струмом по відношенню до такого ж поля у відсутності дефекту. Сигнал, обумовлений спотворенням електромагнітного поля, необхідно реєструвати. Характеристики прийнятого сигналу будуть залежати від параметрів дефекту, незначно будуть залежати від шорсткості та фізичних властивостей металу. Розроблений принцип вирішується конструкційно, розмістивши збуджувальну та приймальну котушки ВСП робочими ділянками ортогонально одна до одної при умові, що збуджувальна робоча ділянка буде лінійною.

Оскільки збуджувальне електромагнітне поле наводить ЕРС на інші ділянки ВСП, то на другому етапі шляхом розв'язання рівнянь Максвела для провідників ВСП ортогонального типу (рис.2), розташованого над поверхнею металу і живленим високочастотним струмом, отримано вираз для прийнятої ЕРС

$$\dot{e} = \int_1^2 \dot{E}_{1y} dy + \int_2^3 \dot{E}_{1z} dz + \int_3^4 \dot{E}_{1y} dy + \int_4^1 \dot{E}_{1z} dz, \quad (2)$$

де  $\dot{E}_{1y}$ ,  $\dot{E}_{1z}$  – складові електричного поля над поверхнею металевого зразка, які виникають від збуджувального струму.

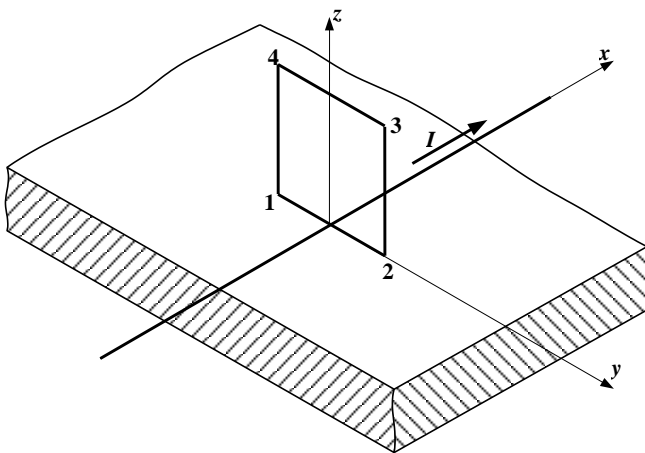


Рис.2. Провідник збудження з перпендикулярною до нього виміральною обмоткою

Аналіз виразу (2) показує, що прийнятий сигнал не буде залежати від властивостей матеріалу виробу і прошарку між перетворювачем і поверхнею металу. При скануванні поверхні виробу додатковий прийнятий сигнал відносно завади буде нести інформацію тільки про появу та параметри дефекту.

На третьому етапі розглянуто фізико-математична модель накладного трансформаторного ортогонального ВСП при орієнтації його робочої зони відносно тріщини під довільним кутом (рис.3). Шляхом розрахунків взаєміндуктивностей різних ділянок ВСП отримано вирази для нормованої величини амплітуди сигналу перетворювача, кінцевий узагальнений вигляд якої

$$\frac{U}{U_{\max}} = \frac{(M_{12} \cdot M_{23})}{(M_{12} \cdot M_{23})_{\max}} = f(a, b, c, a_1, b_1, x, y, z, \varphi), \quad (3)$$



де  $U/U_{\max}$  – нормована амплітуда сигналу ВСП;  $a, b, c, a_1, b_1$  – геометричні параметри ВСП та дефекту;  $x, y, z, \varphi$  – координати ВСП відносно дефекту (див. рис.3.). Отримані аналітичні вирази для знаходження (3) дають

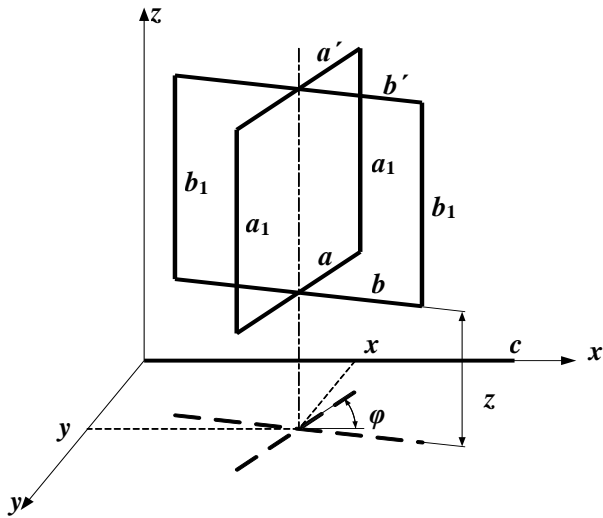


Рис.3. Модель взаємодії ВСП з тріщиною

можливість розрахувати залежності прийнятого сигналу ВСП від основних чинників, які впливають на результати контролю. котушок ВСП призводять до зміщення максимумів сигналу на діаграмі спрямованості для кутів орієнтації дефекту до  $\pm 5^\circ$ ; розміри робочих ділянок збуджувальної і вимірювальної котушок ортогонального ВСП не повинні перевищувати розмірів дефектів, що можливо для протяжних тріщин; розміри вертикальних ділянок збуджувальної і вимірювальної обмоток ортогонального ВСП визначаються робочими зазорами.

Аналіз указаних залежностей показав наступне. Ортогональний ВСП має діаграму чутливості, яка дозволяє визначити орієнтацію дефекту. Сигнал набуває максимальних значень при кутах орієнтації дефекту  $\varphi = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$  і  $315^\circ$ ; зміни співвідношення розмірів робочих ділянок збуджувальної і вимірювальної котушок ВСП призводять до зміщення максимумів сигналу на діаграмі спрямованості для кутів орієнтації дефекту до  $\pm 5^\circ$ ; розміри робочих ділянок збуджувальної і вимірювальної котушок ортогонального ВСП не повинні перевищувати розмірів дефектів, що можливо для протяжних тріщин; розміри вертикальних ділянок збуджувальної і вимірювальної обмоток ортогонального ВСП визначаються робочими зазорами.

Запропоновано також ускладнену модель роботи ВСП у випадку наявності на поверхні виробу нерівностей різної величини (рис.4). Аналіз структури поверхні приводить до висновку про те, що вона має вигляд впорядкованої, рівномірно розподіленої по поверхні об'єкта контролю (ОК) сітки вихрових струмів. Сумарний вплив струмів сітки на сигнал ортогонального ВСП практично дорівнює нулю. Дефект, присутній на поверхні зразка, порушує таку однорідність. Показано, що змодельований системою струмів вплив поверхні ОК практично не викликає збільшення сигналу завади. Поява ж дефекту при скануванні шорсткої поверхні металу викликає появу сигналу, аналогічного сигналу від ОК з дефектом на гладкій поверхні.

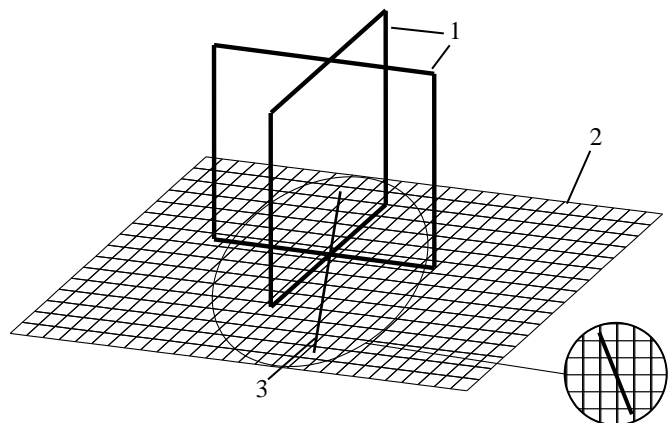


Рис.4. Модель взаємодії ВСП з шорсткою поверхнею зразка: 1 – обмотки ВСП; 2 – електропровідна сітка, що імітує шорстку поверхню; 3 – дефект

У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень розробленого вихрострумowego методу та накладного трансформаторного ортогонального ВСП.

Розроблено експериментальний стенд, функціональну схему якого показано на рис.5: 1 – збуджувальна обмотка ВСП; 2 – вимірювальна обмотка ВСП; G – генератор; PV1, PV2 – мілівольтметри; P3 – вимірювач різниці фаз; P4 – осцилограф; R1 – шунт. Використано зразки з різних матеріалів з моделями дефектів, виготовлених електро-

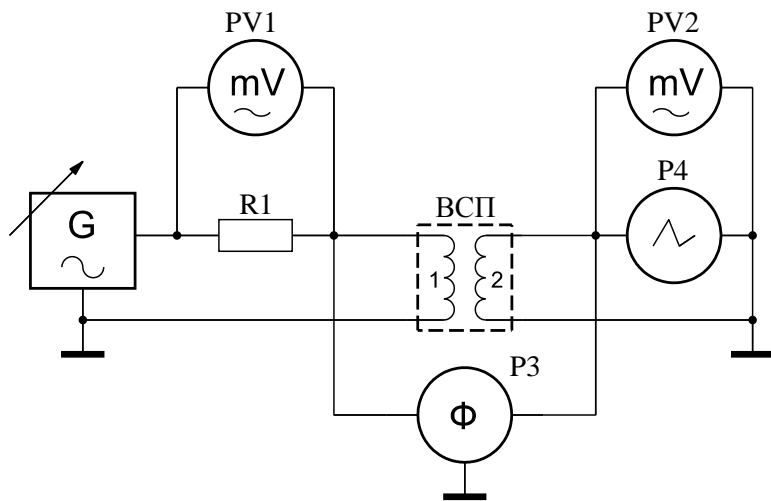


Рис.5. Блок-схема стенда для досліджень

ерозійним способом, природними дефектами, відібраними на ПАТ «МК «Азовсталь», та стандартний зразок СОП2353.08 (шорсткість поверхонь з моделями дефектів  $Ra = 1,25$  та  $Rz = 160$ ). Попередні дослідження впливу дефекту на сигнал ВСП показали, що амплітудний метод контролю суттєво ефективніший, ніж фазовий. Тому в подальшому використано тільки амплітудний метод. Проаналізовано вплив частоти на відношення амплітуд сигнал-шум при різних глибинах дефектів (рис.6), орієнтації робочої зони ВСП відносно тріщин (рис.7), положення ВСП відносно тріщин (рис.8, рис.9), глибини дефектів при раціональній частоті (рис.10); від величини прошарку між ВСП і металом (рис.11). Досліджено також вплив перекосів. Розраховано максимальну швидкість сканування поверхні ВСП при раціональних параметрах контролю.

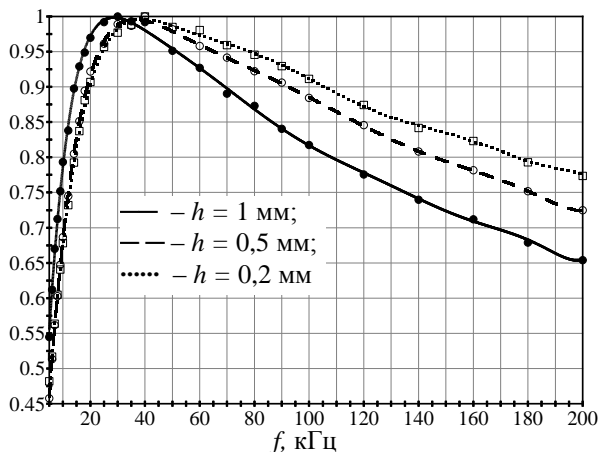


Рис.6 Залежність нормованого значення відношення сигнал-шум від частоти

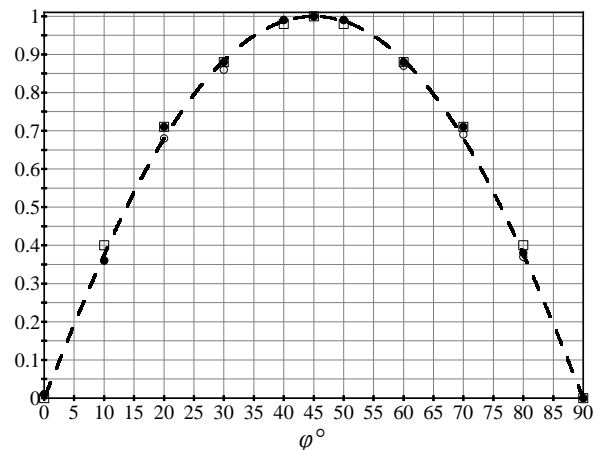


Рис.7. Залежність нормованого значення сигналу ВСП від кута  $\varphi$  (див. рис.3.)

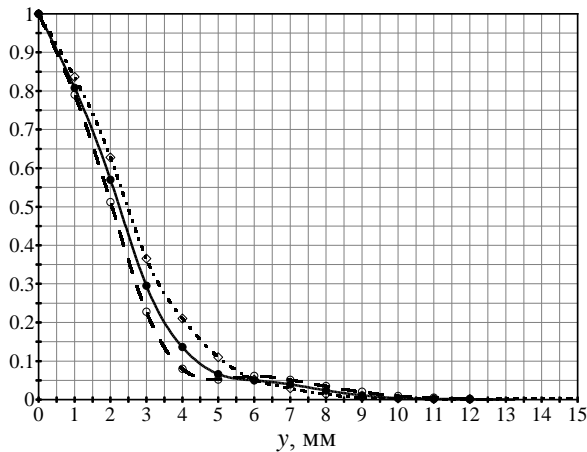


Рис.8. Залежність нормованого значення сигналу ВСП від координати  $y$  (див. рис.3.)

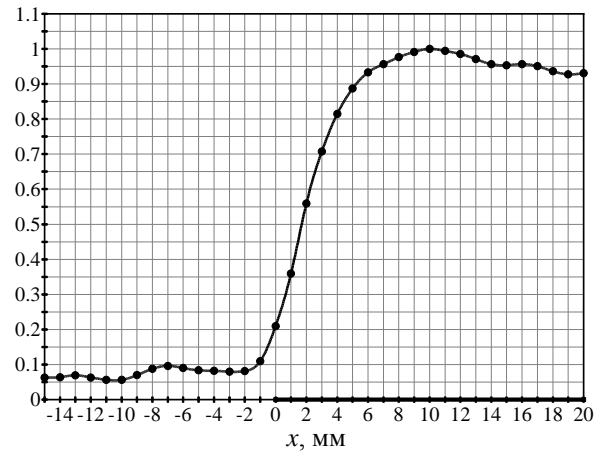
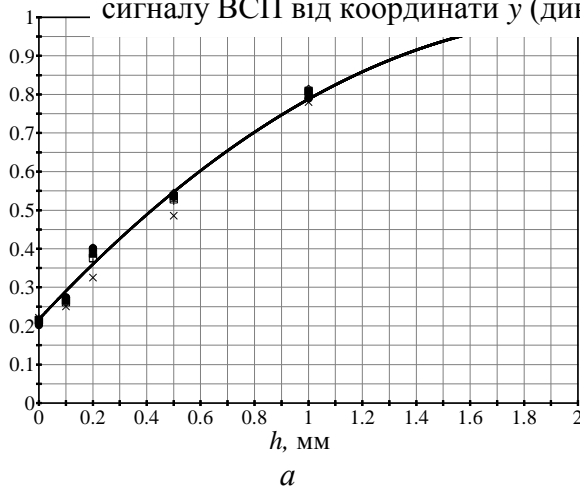
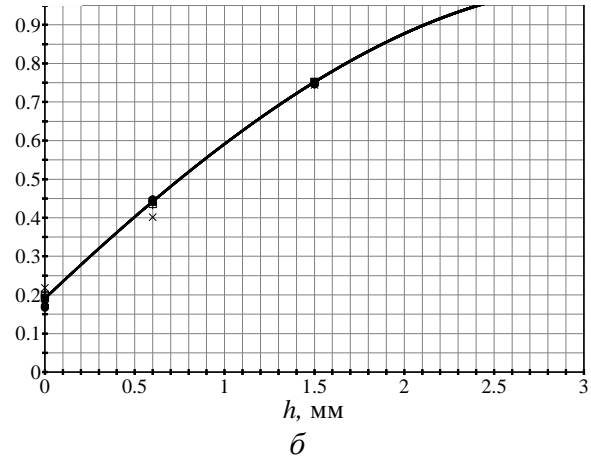


Рис.9. Залежність нормованого значення сигналу ВСП від координати  $x$  (див. рис.3.)



*a*



*б*

Рис.10. Залежність нормованого значення сигналу ВСП від глибини дефектів  $h$ :

*a* – дефекти на гладкій поверхні ( $Ra = 1,25$ );

*б* – дефекти на шорсткій поверхні ( $Rz = 160$ )

відношення сигнал-шум досягається при живленні ортогонального ВСП струмом у діапазоні частот від 20 до 60 кГц, при цьому величина робочої частоти залежить від параметрів конкретного дефекту. Для підвищення ефективності контролю доцільно використовувати струм збудження ортогонального ВСП з частотою  $f = 50 \pm 10$  кГц. Найбільше значення амплітуди сигналу вимірювальної обмотки ВСП відзначається при кутах орієнтації дефекту  $\varphi = 40^\circ \dots 50^\circ$ . У процесі контролю переміщення ВСП необхідно виконувати двічі – другий раз з кутом, зміненим на  $\pm 40^\circ \dots 50^\circ$  щодо положення при першому проході сканування. Такий підхід дозволяє визначати характер дефекту: тріщина чи колоподібний, що має суттєве значення для експлуатації ОК. Для

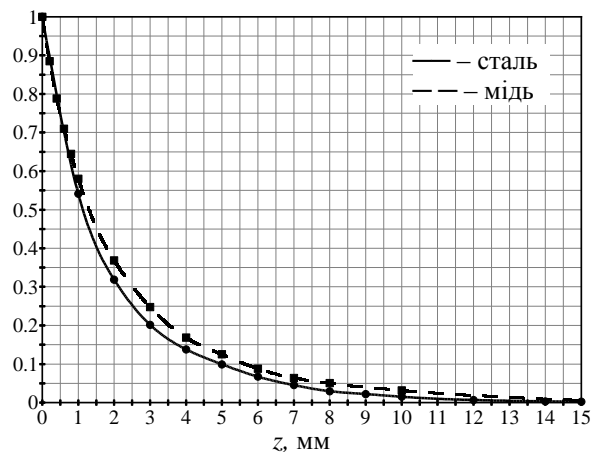


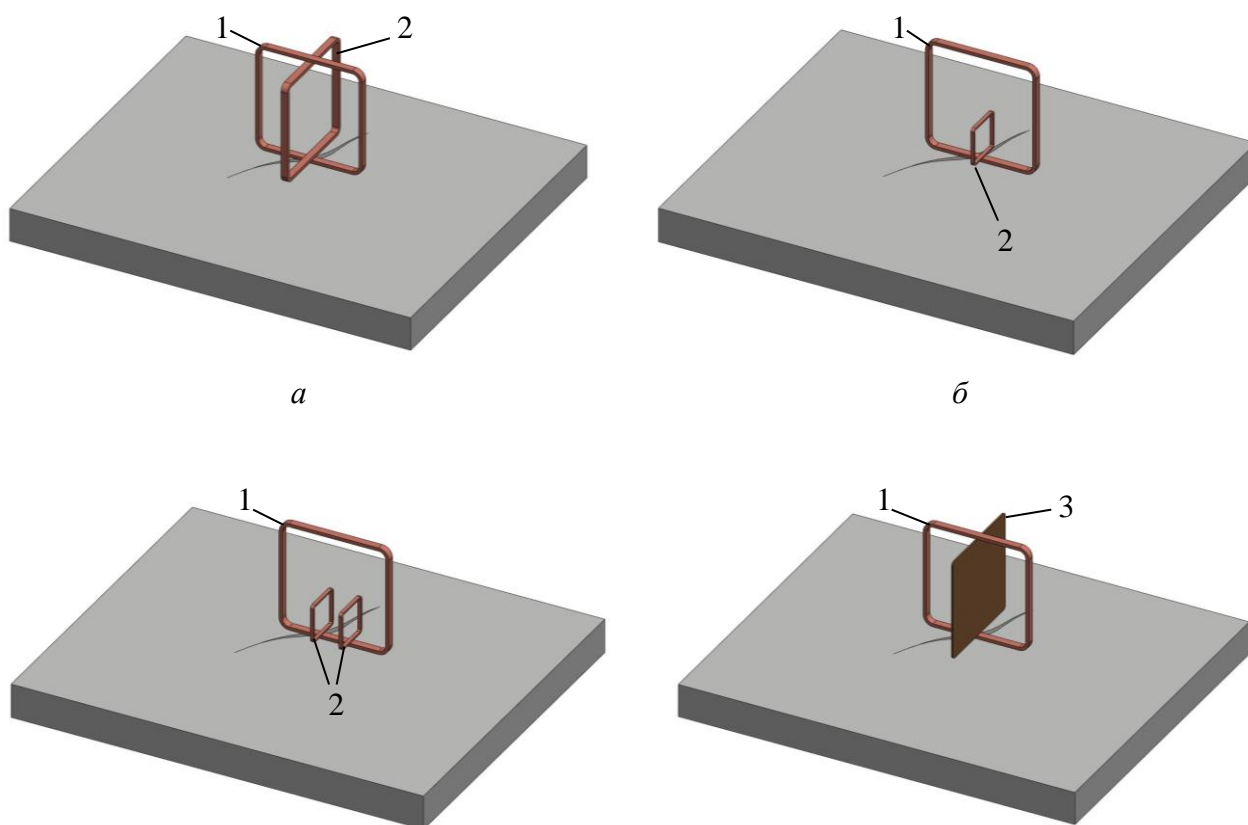
Рис.11. Залежність нормованого значення сигналу ВСП від зазору  $z$  (див. рис.3.)

розробленого ортогонального ВСП коливання зазору в межах 0,5 мм викликає зміну корисного сигналу менше ніж на 30 %. Визначено вплив глибини поверхневих дефектів на амплітуду сигналу ортогонального ВСП. У загальному випадку залежність корисного сигналу від глибини дефектів нелінійна і монотонно зростає. При цьому зі збільшенням глибини дефектів зростання кривої сповільнюється.

Отримані експериментальні залежності дозволяють проводити оцінку глибини дефектів як на гладких, так і на шорстких поверхнях ОК. Аналіз отриманих залежностей показав, що вплив на корисний сигнал перекошу ВСП вздовж і впоперек дефекту має однаковий характер. Виявлення дефекту з розкриттям – 0,3 мм і глибиною – 2 мм за рівнем відношення сигнал-шум, рівного 2, може бути здійснене при кутах перекошів ВСП до 12,5°.

У четвертому розділі наведено результати розробки модифікацій ВСП, вихрострумове дефектоскопа та оцінено його метрологічні характеристики.

На основі теоретичних і експериментальних досліджень розроблено модифікації ВСП, варіанти розташування котушок яких наведено на рис.12.



Живлення розроблених ВСП здійснюється імпульсами, з яких формується синусоїдальна складова. Структурна схема розробленого дефектоскопа наведена на рис.13. Він складається з мікроконтролера МК, індикатора І, підсилювача потужності ПП, ВСП, цифрового потенціометра П, амплітудного детектора АД, аналого-цифрового перетворювача АЦП, блока живлення БЖ та клавіатури КЛ. Зовнішній вигляд розробленого дефектоскопа наведено на рис.14.

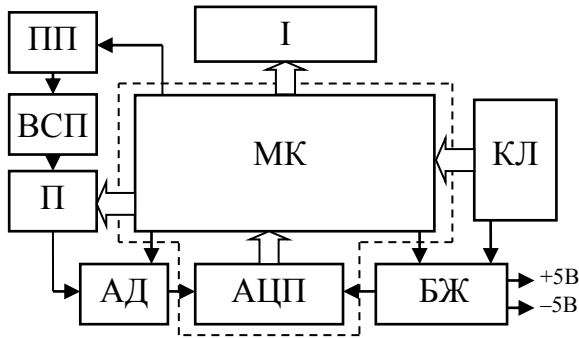


Рис.13. Структурна схема вихрострумowego дефектоскопа



Рис.14. Зовнішній вигляд

робленого вихрострумowego дефектоскопа. Виконано зразок з моделями дефектів у вигляді пазів розмірами: розкриття 0,35 мм, глибина 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15 і 20 мм, зроблених з точністю  $\pm 0,05$  мм. Результати досліджень наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати 5-кратних вимірювань глибини дефектів на контрольному зразку за технологією, яка передбачає настроювання дефектоскопа на критичну глибину

$h_n$ , мм	$h_1$ , мм	$h_2$ , мм	$h_3$ , мм	$h_4$ , мм	$h_5$ , мм	$h_{cp}$ , мм	$\sigma$ , мм	$\Delta h$ , мм	$\delta h$ , %
2	2,0	2,1	1,9	2,0	2,0	2,0	0,07	0,14	7,1
4	4,0	4,1	4,1	4,0	3,9	4,0	0,08	0,19	4,7
6	5,8	5,9	6,0	5,9	6,1	5,9	0,11	0,29	4,8
8	8,1	8,0	8,1	8,2	8,1	8,1	0,07	0,24	3,0
10	10,1	10,6	10,4	10,3	10,1	10,3	0,21	0,72	7,2
12	12,2	11,9	11,5	12,3	11,9	12,0	0,31	0,67	5,6
15	15,7	14,7	15,1	16,0	15,3	15,4	0,51	1,38	9,2
20	20,1	19,5	20,7	19,8	19,7	20,0	0,47	0,97	4,9

Аналіз наведених у таблиці результатів показує, що точність визначення глибини дефектів знаходиться в діапазоні 3...9,2 %.

Заводські випробування розробленого дефектоскопа успішно проведені в умовах виробництва ПАТ «МК «Азовсталь» шляхом контролю поверхні слябів за відсутності зачистки та при частковій зачистці поверхні виробів.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішено науково-практичну задачу щодо обґрунтування вихрострумowego методу контролю феромагнітних металовиробів та створенні на його основі засобів, які забезпечують виявлення та визначення характеристик дефектів за наявності поверхні з високою шорсткістю.

Отримано такі основні наукові та практичні результати.

1. На підставі аналізу існуючих методів і засобів вихрострумовой дефектоскопії і дефектометрії показано, що зменшити вплив властивостей

поверхні металовиробів доцільно за рахунок створення нових і вдосконалення існуючих дефектоскопів з ортогональними перетворювачами.

2. Розроблено фізико-математичну модель ортогонального трансформаторного вихрострумowego перетворювача, аналіз якої дав можливість розробити метод виявлення і оцінки параметрів дефектів поверхні металовиробів, що включає збудження вихрового високочастотного струму і реєстрацію електромагнітного поля в площині, перпендикулярній електромагнітному полю, створеному високочастотним струмом. При цьому сканування поверхні виробу здійснюють з поворотом перетворювача на кут в діапазоні  $\pm 45^\circ \dots 50^\circ$  відносно напрямку вектора збуджувального струму, реєструють реакцію виробу за максимальною величиною прийнятого сигналу, а наявність дефектів у виробі і їх розміри визначають за максимальною величиною амплітуди прийнятого сигналу. Встановлено, що ортогональний ВСП має максимальну чутливість при орієнтації робочої ділянки обмотки перетворювача під кутом, кратним  $40^\circ \dots 50^\circ$  по відношенню до напрямку максимального розвитку тріщини.

3. Досліджено основні фактори, що впливають на результати вихрострумової дефектоскопії із застосуванням ортогональних перетворювачів. Оцінено вплив зазору між ВСП і виробом у межах до 15 мм; довжини тріщини в діапазоні 0,1–100 розмірів ВСП; довжин робочих ділянок перетворювача 5–42 мм; перекосів перетворювача відносно контрольованої поверхні до  $55^\circ$ ; шорсткості поверхні до  $Rz = 320$  мкм. Показано, що для забезпечення ефективного контролю необхідно, щоб зміни зазору не перевищували 0,5 мм, кут перекоосу перетворювача відносно контрольованої поверхні був не більше  $12,5^\circ$ . Експериментально встановлено, що максимальне виявлення дефектів поверхні феромагнітних металовиробів забезпечується при частоті живлення ортогонального вихрострумowego перетворювача в діапазоні 20–60 кГц.

4. Розроблено нові модифікації ортогональних вихрострумowych перетворювачів, в яких робочі ділянки збуджувальних і приймальних котушок виконані ортогональними одна до одної, а неробочі ділянки розташовані на відстані, що виключає взаємний вплив. Для забезпечення роботи нових ортогональних ВСП розроблені схемотехнічні рішення, на підставі яких розроблений і виготовлений зразок вихрострумowego дефектоскопа, який дозволяє виявляти і визначати форму дефекту, оцінювати його глибину в діапазоні 2–20 мм і довжину. Розроблені метод, вихрострумовой перетворювач і дефектоскоп захищені 2 патентами України.

5. Розроблено та виготовлено контрольний зразок з моделями дефектів у вигляді тріщин розкриттям 0,35 мм, глибинами 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15 і 20 мм, виконаними з точністю  $\pm 0,05$  мм для настройки і перевірки параметрів вихрострумowego дефектоскопа. За допомогою контрольного зразка оцінені метрологічні характеристики виготовленого макета дефектоскопа. Показано, що похибка оцінки глибини дефектів при налаштуванні на заданий нормативно-технічною документацією дефект не перевищує 3–9,2 % залежно від глибини моделі дефекту.

6. Розроблений вихрострумний дефектоскоп з ортогональним ВСП успішно випробуваний в умовах ПАТ «МК «Азовсталь».

Результати дисертаційної роботи використані в навчальному процесі на кафедрі приладів і методів неруйнівного контролю НТУ «ХПІ» при вивченні дисципліни «Вступ до спеціальності», при виконанні дипломних робіт бакалаврів та спеціалістів.

## СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Хомяк Ю.В. Развитие возможностей вихретоковой дефектоскопии / Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк // Методи та прилади контролю якості. – 2006. – № 17. – С.3–7.

*Здобувачем проаналізовані питання дефектоскопії виробів зі складною поверхнею, розроблений та досліджений вихрострумний перетворювач.*

2. Хомяк Ю.В. Улучшение характеристик вихретокового преобразователя за счет включения его обмоток в колебательные контуры / Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – № 35. – С.41–44.

*Здобувачем проведено аналіз можливості підвищення ефективності вихрострумного контролю, запропоновано моделювати вихрострумний перетворювач як індуктивно пов'язані коливальні контури.*

3. Хомяк Ю.В. Теоретическое исследование накладного вихретокового преобразователя с минимальной взаимной индуктивностью / Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – № 48. – С.100–103.

*Здобувачем проведено теоретичний аналіз роботи накладного трансформаторного вихрострумного перетворювача, знайдена залежність вихідного сигналу перетворювача від струму збудження, взаємної індуктивності обмоток та ефективного імпедансу об'єкта контролю, показано, що для підвищення якості вихрострумного контролю взаємна індуктивність обмоток вихрострумного перетворювача повинна бути мінімальною.*

4. Хомяк Ю.В. Разработка элементов вихретокового дефектоскопа / Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – № 14. – С.124–128.

*Здобувачем розглянуто основні принципи побудови вузлів і блоків вихрострумного дефектоскопа, розроблено і виготовлено діючий макет вихрострумного дефектоскопа.*

5. Хомяк Ю.В. Исследование модели накладного ортогонального вихретокового преобразователя / Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк, М.В. Добробаба // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – № 19. – С.113–126.

*Здобувачем досліджена модель для оцінки взаємодії вихрострумного перетворювача з об'єктом, що має поверхневу тріщину, наведені математичні співвідношення для цієї моделі, проведено розрахунки залежностей сигналів вихрострумного перетворювача від його*

*геометричних параметрів і взаємного розташування обмоток та поверхневої тріщини в сталевому зразку.*

6. Хомяк Ю.В. Повышение возможностей вихретокового контроля поверхности непрерывно литых слябов из ферромагнитных сталей / Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк // Дефектоскопия. – Екатеринбург. – 2013. – № 1. – с.78–83.

*Здобувачем розроблено і створено вихрострумний дефектоскоп з оцінкою глибини тріщин на поверхнях металевих заготовок без спеціальної зачистки поверхні.*

7. Пат. 55471 U (Україна), МПК (2009) G 01N 27/90. Накладний вихрострумний перетворювач для неруйнівного контролю / Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (UA). – № u201008320; заяв. 05.07.2010; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23. – 4 с.

*Здобувачем запропонована конструкція накладного вихрострумного перетворювача.*

8. Пат. 73445 U (Україна), МПК G 01N 27/90. Спосіб електромагнітної дефектоскопії електропровідних виробів / Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (UA). - № u201202560; заяв. 03.03.2012; опубл. 25.09.2012, Бюл. №18. – 3с.

*Здобувачем запропоновано спосіб електромагнітної дефектоскопії електропровідних виробів.*

9. Хомяк Ю.В. Разработка генератора для импульсного питания вихретокового преобразователя / Ю.В. Хомяк, Г.М. Сучков // Тези доповідей І Університетської наук.-практ. студентської конференції магістрантів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: У 3 т. Т 2. – 2007. – С.52–54.

*Здобувачем розроблено генератор для досліджень вихрострумного перетворювача, який дозволяє плавно регулювати частоту, шпаруватість пакетів імпульсів і їх пікову потужність.*

10. Хомяк Ю.В. Оптимизация частоты тока, питающего вихретоковый накладной преобразователь / Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк // Збірник тез доповідей VII Міжн. наук.-технічної конф. ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи, 22–23 квітня 2008 р., м. Київ, ПФФ, НТУУ «КПІ». – 2008. – С.216–217.

*Здобувачем показано, що для накладного вихрострумного перетворювача існує раціональна частота збуджувального струму, при якій досягається максимальне значення сигнал-шум.*

11. Работы НТУ «ХПИ» в области НК / Г.М. Сучков, Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа, А.А. Авраменко, А.В. Десятниченко, А.А. Келин, Е.Л. Ноздрачева, Ю.В. Хомяк, В.В. Скопенко, Л.В. Глебова, И. Нестерова, А.А. Тищенко // Тез. докладов 7-й Международной конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности». – Москва. – 2008. – С.191–193.



*Здобувачем розроблені засоби вихрострумowego контролю, що дозволяють визначати тип дефекту з оцінкою його глибини.*

12. Хомяк Ю.В. Исследование частотных характеристик вихретокового преобразователя для оценки качества металлических изделий / Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: матеріали XVI Міжнар. наук.-практ. конф., 4–6 червня 2008 р. Харків: у 2 ч. – Ч. 1 / оргкомітет: Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ (голова). Харків: НТУ «ХП», 2008. – С.446.

*Здобувачем виконані та проаналізовані результати досліджень частотних характеристик накладного ортогонального вихрострумowego перетворювача, що дозволило розширити можливості контролю важливих металевих виробів.*

13. Хомяк Ю.В. Фізична модель впливу тонкої поверхневої тріщини металевого зразка на накладний вихорострумований перетворювач / Ю.В. Хомяк // Анотації доповідей XVII Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – НТУ «ХП» – 2009. – С.529.

*Здобувачем розглянуто фізичну модель взаємодії поверхневого дефекту в металі з обмотками вихрострумowego перетворювача.*

14. Хомяк Ю.В. Развитие модели взаимодействия вихорострумowego перетворювача з металевим зразком, що містить поверхневу тріщину / Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк // Збірник тез доповідей IX Міжн. наук.-технічної конф. ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи, 27–28 квітня 2010 р., м. Київ, ПБФ, НТУУ «КП». – 2010. – С.217–218.

*Здобувачем для опису взаємодії вихрострумowego перетворювача з поверхневою тріщиною запропоновано підхід, заснований на поданні дефекту у вигляді тонкого провідника зі струмом і знаходженні взаємних індуктивностей обмоток перетворювача з цим провідником.*

15. Хомяк Ю.В. Вихорострумований контроль металевих виробів зі складною поверхнею (огляд) / Ю.В. Хомяк // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XVIII Міжнар. наук.-практ. конф., Ч. II (12-14 травня 2010 р., Харків): / за ред. проф. ТОВАЖНЯНСЬКОГО Л.Л. – Харків, НТУ «ХП». – С.196.

*Здобувачем проведено аналіз інформаційних джерел, що стосуються контролю поверхні металовиробів, розглянуті існуючі методи контролю, проаналізовано можливості сучасних дефектоскопів і напрямки їх вдосконалення, розглянуто особливості використання вихрострумowego методу для контролю металовиробів зі складною поверхнею.*

16. Хомяк Ю.В. Вихретоковий контроль поверхності металлоизделий с оценкой глубины дефектов / Ю.В. Хомяк, Н.М. Овчаренко, Е.Б. Марюха // Збірник тез доповідей 3-ї науково-практичної конференції «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання», 29–30 листопада, 2011р., м. Івано-Франківськ. ФЕ і ІВТ, ІФНТУНГ. – 2011. – С.162–164.

*Здобувачем проведено дослідження розроблених вихрострумowego перетворювача і дефектоскопа для контролю і оцінки глибини поверхневих тріщин феромагнітних металовиробів.*

## АНОТАЦІЇ

**Хомяк Ю.В. Вихрострумний дефектоскоп з компенсацією впливу стану поверхні феромагнітних металовиробів.** – 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, 2013.

Дисертацію присвячено розробці методу та приладу для вихрострумової дефектоскопії електропровідних феромагнітних виробів, які дозволили ефективно контролювати метал при значній шорсткості та змінах електромагнітних характеристик поверхні. Суть методу основана на реєстрації сигналів, обумовлених просторовим спотворенням вектора напруженості електромагнітного поля вихрових струмів, сформованого поверхневим дефектом. Розроблений метод реалізовано в накладному трансформаторному ВСП шляхом виготовлення ортогональних збуджувальної та приймальної котушок.

У роботі обґрунтовано принцип визначення форми дефекту – колоподібний чи тріщина та напрямку найбільшого розвитку дефектів типу тріщина.

Наведені дані отримані під час проведення модельних та експериментальних досліджень у заводських та лабораторних умовах. При дослідженнях встановлено фактори, які впливають на результати контролю новим приладом: орієнтація діаграми чутливості ВСП, прошарок між ВСП і металом, перекося перетворювача, діапазон ефективних частот струму живлення та встановлені діапазони допустимих змін указаних факторів. Визначені особливості використання ортогональних ВСП.

Розроблено та виготовлено кілька типів ортогональних ВСП та дефектоскоп, які пройшли успішні випробування в лабораторних та заводських умовах (ПАТ «МК «Азовсталь»)

*Ключові слова:* дефектоскоп, вихрострумний перетворювач, вихрострумний контроль, поверхневий дефект, ортогональні котушки, електромагнітне поле, шорсткість поверхні, електрофізичні властивості металу.

**Хомяк Ю.В. Вихретоковый дефектоскоп с компенсацией влияния состояния поверхности ферромагнитных металлоизделий.** – 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, 2013.

Диссертация посвящена решению важной для промышленности научно-практической задачи – обоснованию вихретокового метода контроля и средства его реализующего, обеспечивающих выявление и определение характеристик дефектов при наличии поверхности с высокой шероховатостью и изменяющимися электрофизическими свойствами.

В работе выполнен анализ методов и средств вихретокового контроля материалов и изделий. Проанализированы известные концепции обеспечения контроля качества поверхности при наличии шероховатости и колебаний электромагнитных свойств материала. Обоснован принцип обнаружения поверхностных дефектов на фоне помех от шероховатости и изменений свойств материала.

Разработана физико-математическая модель ортогонального трансформаторного вихретокового преобразователя, анализ которой позволил разработать метод выявления и оценки параметров дефектов поверхности металлоизделий, включающий создание вихревого высокочастотного тока и регистрации электромагнитного поля в плоскости, перпендикулярной электромагнитному полю, созданного высокочастотным током. При этом сканирование поверхности изделия осуществляют с поворотом преобразователя на угол в диапазоне  $\pm 40^\circ \dots 50^\circ$  относительно направления вектора возбуждаемого тока, регистрируют реакцию изделия по максимальной величине принимаемого сигнала, а наличие дефектов в изделии и их размеры определяют по максимальной величине амплитуды принимаемого сигнала. Установлено, что ортогональный ВТП имеет максимальную чувствительность при ориентации рабочего участка обмотки преобразователя под углом, кратным  $40^\circ \dots 50^\circ$  по отношению к направлению максимального развития трещины.

Исследованы основные факторы, влияющие на результаты вихретоковой дефектоскопии с применением ортогональных преобразователей. Оценено влияние зазора между ВТП и изделием в пределах 15 мм длины трещины в диапазоне 0,1–100 размеров ВТП; длин рабочих участков преобразователя 5–42 мм; перекосов преобразователя относительно контролируемой поверхности до  $55^\circ$ ; шероховатости поверхности до  $R_z = 320$  мкм. Показано, что для обеспечения эффективного контроля необходимо, чтобы изменения зазора не превышали 0,5 мм, угол перекоса преобразователя относительно контролируемой поверхности был не более  $12,5^\circ$ . Экспериментально установлено, что максимальное выявление дефектов поверхности ферромагнитных металлоизделий обеспечивается при частоте питания ортогонального вихретокового преобразователя в диапазоне 20–60 кГц.

Разработаны новые модификации ортогональных вихретоковых преобразователей, в которых рабочие участки возбуждающих и приемных катушек выполнены ортогональными друг другу, а нерабочие участки расположены на расстоянии, исключающем взаимное влияние. Для обеспечения работы новых ортогональных ВТП разработаны схемотехнические решения, на основании которых разработан и изготовлен образец вихретокового дефектоскопа, позволяющий обнаруживать и

определять форму дефектов, оценивать их глубину в диапазоне 2–20 мм и длину. Разработанный метод, вихретоковый преобразователь и дефектоскоп защищены двумя патентами Украины.

Разработан и изготовлен контрольный образец с моделями дефектов в виде трещин раскрытием 0,35 мм глубинами 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15 и 20 мм, выполненными с точностью  $\pm 0,05$  мм для настройки и проверки параметров вихретокового дефектоскопа. С помощью контрольного образца оценены контрольные характеристики изготовленного макета дефектоскопа. Показано, что погрешность оценки глубины дефектов при настройке на заданный нормативно-технической документацией дефект не превышает 3–9,2 % в зависимости от глубины модели дефекта.

*Ключевые слова:* дефектоскоп, вихретоковый преобразователь, вихретоковый контроль, поверхностный дефект, ортогональные катушки, электромагнитное поле, шероховатость поверхности, электрофизические свойства металла.

**Yu. V. Khomyak. Eddy current flaw detector with compensation of the influence of ferromagnetic metalware surface conditions.** – A manuscript.

Candidate of technical sciences thesis on speciality 05.11.13 – Devices and methods of testing and materials structure determination. – National technical university «Kharkiv polytechnic institute», Kharkiv, 2013.

The dissertation is devoted to the development of a method and device for eddy-current testing of conductive ferromagnetic ware that allow the effective testing of metal with high surface roughness and variations of surface electromagnetic parameters. The essence of the method is based on registration of the signals caused by the spatial distortion of the eddy-current electromagnetic field vector due to surface defects. The developed method is implemented in an eddy-current surfaces probe (ECP) by designing orthogonal exciting and receiving coils.

The paper presents grounds for a principle of determination of the defect shape – either circular or a crack, and the direction of the most probable crack advancement.

The dissertation presents the data obtained through simulation and experiments in plant and laboratory conditions. The study revealed the factors that affect the results of testing by means of the new device: the orientation of the ECP sensitivity diagram, the lift-off between the ECP and the metal, defects of the transformer, the range of effective frequencies of the supply current, and the ranges of possible variations of the given factors. Specific features of orthogonal ECP application are determined.

A few types of orthogonal ECPs and a flaw detector have been designed and manufactured which were successfully tested in laboratory and plant conditions (Azovstal Iron & Steel Works).

*Keywords:* flaw detector, eddy-current probe, eddy-current testing, surface defect, orthogonal coils, electromagnetic field, surface roughness, electrophysical properties of metal.

*Alston*