

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Мирошников Вадим Володимирович

УДК 620.179.14

**ПРИЛАДИ МАГНІТНОГО КОНТРОЛЮ
ДЕФЕКТІВ, ВИКЛИКАНИХ ВОДНЕВОЮ КОРОЗИЄЮ
ВИРОБІВ ТА КОНСТРУКЦІЙ
(Теорія, розрахунок, використання)**

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків-2003

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Східноукраїнському національному університеті імені Володимира Даля Міністерства освіти і науки України, м. Луганськ

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Яковенко Валерій Володимирович,
Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, завідувач кафедри електротехніки і систем діагностики,
м. Луганськ

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Поджаренко Володимир Олександрович,
Вінницький національний технічний університет, завідувач кафедри метрології та промислової автоматики

доктор технічних наук, професор
Гурин Анатолій Григорович,
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", завідувач кафедри електроізоляційної та кабельної техніки, м. Харків

доктор технічних наук, доцент
Сахацький Віталій Димитрович,
Українська інженерно-педагогічна академія,
професор кафедри автоматики та радіоелектроніки, м. Харків

Провідна установа: Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", кафедра "Прилади та системи неруйнівного контролю", Міністерство освіти і науки України, м. Київ

Захист дисертації відбудеться 8 січня 2004 року о 14 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.64.050.09 у 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 "28" листопада 2003р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Горкунов Б. М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вугільноводневе паливо є основним джерелом енергії минулого 20-го сторіччя й залишається таким у 21 віці. Поряд із зростаючим обсягом здобування нафти та газу розвивається ядерна енергетика, а також воднева енергетика як найбільш перспективний та оперативний варіант заміни вугільноводневого палива.

В процесі транспортування, переробки та зберігання нафти й газу постійно на металеві елементи трубопроводів, хімічних реакторів, сховищ діє водень та його сполуки, які інколи мають високу температуру та тиск. Одним з елементів, які виділяються в процесі ядерної реакції, є водень, що чинить руйнівний вплив на металоконструкцію реакторів. Отримання, зберігання та транспортування чистого водню потребує особливих заходів безпеки - це стосується й контролю металу, який знаходиться в безпосередньому контакті з воднем.

Наслідки руйнування стінок металоконструкцій техногенно небезпечних об'єктів під впливом водню можуть привести до локальних чи навіть до глобальних катастроф. Надійна та довгострокова експлуатація таких об'єктів без належного неруйнівного контролю не уявляється можливою, що знайшло своє відображення в Законі України "Про об'єкти підвищеної небезпеки" від 18.01.2001 року № 2245-111. Таким чином, існує актуальна задача контролю металоконструкцій, які працюють у середовищі, що містить водень, і вирішення цієї задачі дозволить надійно їх експлуатувати та уникнути техногенних катастроф.

Переважає більшість металоконструкцій, які працюють у середовищі, що містить водень, є феромагнітним матеріалом. Великі габаритні розміри й довгий строк експлуатації подібних об'єктів накладають специфічні вимоги на операції їх контролю. Припустимим методом контролю є безперервний моніторинг технічного стану таких об'єктів з зовнішньої сторони з охопленням великої площі контролю без пошкодження стінок об'єкта. Є чисельні дослідження, які встановлюють зв'язок між механічними характеристиками феромагнітних матеріалів й параметрами їх магнітного стану. Тому, здійснення подібного моніторингу в теперішній час можливо за допомогою магнітного методу, як найбільш чутливого до структурних змін в металі, та тому що він має простоту реалізації та високу стійкість до перешкод від впливу зовнішніх факторів.

Використання для вирішення задачі моніторингу безпосередньо на контролюємих функціонуючих об'єктах великої кількості існуючих засобів й методів контролю магнітних характеристик феромагнітних матеріалів таких, як коерцитиметри, феритометри та ін., неприпустимо у зв'язку із специфікою контролюємого об'єкта й особливостями параметрів, які потребують контролю. Пояснюється це наступним:

- первинні вимірювальні перетворювачі повинні довгий час (2-3 роки) та в умовах перепаду температур знаходитися на об'єкті контролю (наприклад, на хімічному реакторі) із збереженням у заданих межах метрологічних характеристик;

- необхідно контролювати не тільки магнітні характеристики матеріалу, але й можливі дефекти у вигляді порушення суцільності металу водночас;

- первинні вимірювальні перетворювачі не мають можливості переміщатися по поверхні контролюємого об'єкта, що позбавляє можливості знаходити дефекти за зміною магнітного поля розсіяння при просуванні перетворювача;

- значні відстані (сотні метрів) від місця встановлення первинних вимірювальних перетворювачів до пристрою обробки інформації та управління системою контролю.

Тому для створення засобів моніторингу технічного стану техногенно небезпечних об'єктів необхідно вирішити ряд наукових та технічних задач з адаптації відомих методів та засобів магнітного контролю до умов контролю об'єкта з вищенаведеними специфічними особливостями.

Ця задача повинна вирішуватися на підставі наукових експериментальних та теоретичних досліджень, які стануть основою розробки систем контролю. До цих досліджень належать наступні:

- визначення змін параметрів первинних вимірювальних перетворювачів у часі при перепадах температури оточуючого середовища при довгостроковому їх функціонуванні;

- розробка методів та засобів контролю вимірювальних перетворювачів й корекції їх характеристик на основі компенсаційних схем;

- дослідження кореляційного зв'язку між змінами структури металу та виникненням у ньому необоротних руйнівних процесів з магнітними характеристиками металу й магнітними полями розсіяння;

- розробка системи та її структури первинних вимірювальних перетворювачів, яка дозволяє в статичному режимі реєструвати не тільки структурні зміни у феромагнітному матеріалі, але й ознаки порушення його суцільності;

- розробка системи передавання інформації від об'єктів контролю до пристроїв обробки інформації та підготування методів та алгоритмів її остаточної обробки.

Вартість розробки та виготовлення таких систем буде значною, але все ж таки вона буде меншою за вартість сучасних методів контролю, які полягають в зупинці технологічного процесу, для вирізання з контролюємої оболонки реакторів зразків для їх лабораторних досліджень.

Тому розробка теорії, методів, засобів і приладів магнітного контролю для використання останніх в автоматизованих системах контролю техногенно небезпечних конструкцій, які містять водень, є актуальною науково-технічною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Робота виконувалась згідно з державною науково-технічною програмою пріоритетного розвитку за такими напрямками: охорона оточуючого природнього середовища; перспективні інформаційні технології, прилади комплексної автоматизації, системи зв'язку, що пройшли конкурс Міністерства освіти та науки України: держбюджетні теми ГН-67-92 (№ ДР 0194U015296), ГН-104-95 (№ ДР 0195U007048), наказ у Східноукраїнському національному університеті (СНУ) №1901 від 10.01.95р., ГН-37-98 (№ ДР 0198U002854) наказ СНУ №39-01 від 31.01.98р., ГН-11-00 (№ ДР 0101U003280) наказ СНУ №21-01 від 14.01.2000р., а також у рамках госпдоговірних робіт.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є розробка теоретичних основ систем магнітного контролю структурних та фізико-механічних властивостей феромагнітного матеріалу, працюючого в середовищі, що містить водень, техногенно небезпечних об'єктів, і які базуються на теоретичному узагальненні відомих результатів та дослідженні нових підходів до вирішення сформульованої задачі.

Об'єкт дослідження - неруйнівний магнітний контроль дефектів водневої корозії феромагнітних стінок промислових об'єктів, які знаходяться у робочому стані.

Предмет дослідження - методи та створення на їх основі приладів на базі багатоелементних ферозондових перетворювачів для безперервного магнітного контролю діючих промислових об'єктів, стінки яких мають підповерхневі дефекти, викликані водневою корозією.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження базуються на розв'язанні задач, які встановлюють кореляційні зв'язки дефектів, викликаних водневою корозією, з магнітними властивостями металу й методах розрахунку двомірних магнітних задач поведінки магнітного поля в об'ємі та на поверхні стінки об'єкта контролю; числових методах вирішення систем лінійних та нелінійних алгебраїчних рівнянь, які побудовані на основі аналізу та експериментальних даних роботи багатоелементних ферозондових перетворювачів у слабкому магнітному полі на феромагнітній поверхні, що зазнає водневу корозію; методах добору та обробки первинної інформації теорії магнітного контролю, математичного й фізичного моделювання у задачах обробки сигналів великої кількості ферозондів на працюючому промисловому об'єкті.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішувалися такі задачі:

- розробка на основі аналізу літературних джерел математичної моделі фізичних процесів у феромагнітних металах при контакті їх з воднем, яка дозволяє встановити можливість магнітного контролю оболонок крупногабаритних об'єктів;

- створення методу числового аналізу магнітних статичних полів розсіяння намагнічених областей оболонок при варіюванні параметрів петлі гістерезису матеріала та при утворенні несучільностей у металі;

- проведення експериментальних досліджень для визначення характеру змін функції перетворення вимірювальних перетворювачів на основі ферозондів при тривалій їх експлуатації та при перепадах температури;

-теоретичні дослідження первинних вимірювальних перетворювачів на основі ферозондів для оцінки взаємного впливу півелементів ферозондів один на одного, уточнення функції перетворення ферозондів у залежності від навантаження та внутрішнього опору генератора збудження;

- розробка методу та засобів статичного визначення магнітних характеристик матеріалу та несучільностей в ньому на основі матричних перетворювачів;

- експериментальна перевірка основних теоретичних посилянь, розробка пристроїв контролю та системи обробки інформації вимірювальних перетворювачів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Шляхом аналізу фізичних процесів, які відбуваються у феромагнітних металах при контакті їх з воднем, встановлено, що існує можливість контролю фізико-механічних властивостей металу магнітним способом, які є основою розробки теоретичних основ та технічних пристроїв контролю оболонок техногенно небезпечних конструкцій.
2. Запропоновано методи та їх числова реалізація теоретичного розрахунку магнітних полів розсіяння намагнічених ділянок оболонки об'єкта при зміні магнітних характеристик матеріалу під впливом водню та при появі в ньому несучільностей, що дало можливість здійснити одночасний контроль структури та дефектів феромагнітного матеріалу.
3. Розроблено метод та пристрої для його реалізації статичного контролю несучільностей в металі, викликаних водневою корозією, шляхом схемного сканування поверхні оболонки матричним вимірювальним перетворювачем, що дало можливість реалізувати систему довгострокового контролю об'єктів.
4. Шляхом експериментальних досліджень визначено зміни функції перетворення ферозондів при довгостроковій їх експлуатації в умовах контролю хімічних реакторів, що дає можливість обґрунтовано вибрати їх часовий та енергетичний режими роботи та розробляти необхідні схеми компенсації зміни їх параметрів, що забезпечує необхідні метрологічні характеристики вимірювальних приладів.
5. Отримала подальший розвиток теорія ферозондових вимірювальних перетворювачів, яка дає можливість оптимізувати їх параметри в умовах функціонування в матричних перетворювачах без погіршення метрологічних характеристик, що поширює область їх використання в магнітній дефектоскопії.
6. Розроблена система збирання та обробки інформації вимірювальних перетворювачів, розподілених в просторі на базі комп'ютерної техніки, що визначає можливість

функціонування системи моніторингу технічного стану техногенно небезпечних об'єктів у часі та просторі.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що створені прилади магнітного контролю, які дозволяють контролювати технічний стан стінок об'єктів, що містять водень та знаходяться в процесі експлуатації. Виготовлені прилади використовуються на техногенно небезпечних об'єктах, нафто- та газопроводах, хімічних і ядерних реакторах, сховищах вуглеводнів та відпрацьованого ядерного палива, що дозволяє контролювати і прогнозувати надійність та довгостроковість роботи стінок металоконструкцій даних об'єктів без їх зупинки та вирізання контрольних зразків.

Розроблені прилади впроваджені:

- у вигляді магнітних давачів корозійного контролю на реакторі Р-201 устаткування отримання О-П-кислорів ВО “Киришиннефтеоргсинтез” (Ленінградська область);
- у вигляді магнітних ферозондових давачів потоку водню на НВО “Леннефтехим” (м. Санкт-Петербург);
- у вигляді магнітного дефектоскопу для контролю труб діаметром до 219мм на Молодечненському заводі легких металоконструкцій (Республіка Беларусь);
- у вигляді ферозондового дефектоскопу для контролю вісей колісних пар у процесі виробництва на ВО “Вагонобудування” (м. Стаханов).

Особистий внесок здобувача полягає в наступному: виконана постановка мети наукових досліджень та сформульовані задачі створення математичних та розрахункових моделей ферозондових перетворювачів. Запропоновано числові моделі полів розсіяння дефекту та розроблено підхід до створення приладів магнітного контролю конструкцій, що містять водень, на базі ферозондового магнітореєстраційного каналу.

Спільно з співробітниками науково-дослідної лабораторії “Технічної електродинаміки” кафедри “Прилади” здійснені розрахунки за розробленими моделями, проведені лабораторні випробування розроблених магнітних приладів та виготовлені їх дослідно-промислові зразки.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались на: V міжнародній науково-технічній конференції “Проблемы развития локомотивостроения” (Алушта, 1995р.); VI Міжвузівській науково-технічній конференції країн СНД “Современные методы и средства электромагнитного контролю и их применение в промышленности” (Могильов, 1995р.); на Другій міжнародній конференції “Водородная обработка материалов” (Донецьк, 1998 р.); на XV Symposium Electromagnetic phenomena in nonlinear circuits (Poznan-Liege, 1998); 4 спеціалізованій конференції та виставці “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання” (Івано-Франковськ, 1999р.); Третій міжнародній конференції “Водородная обработка материалов” (Донецьк, 2001 р.); міжнародній

науково-технічній конференції "Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії" (Львів, 2002р.); Другій Промисловій науково-технічній конференції "Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях" (Київ, 2002р.); XVI російській науково-технічній конференції "Неразрушающий контроль и диагностика" (Санкт-Петербург, 2002 р.); 4-й Національній науково-технічній конференції і виставці "Неруйнівний контроль та технічна діагностика-2003" (Київ, 2003г.); Другій науково-технічній конференції "Приладобудування 2003: стан і перспективи" (Київ, 2003р.); на науково - технічних конференціях Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля (м. Луганськ).

Публікації: основні результати дисертації опубліковані у 43 наукових працях, з них 1 монографія, 1 патент, 8 статей у наукових журналах, 20 статей у збірниках наукових праць та 13 у працях науково-технічних конференцій.

Структура та обсяг дисертації: дисертаційна робота складається з вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел та 3 додатків. Повний обсяг дисертації складає 426 стор.: 3 ілюстрації за текстом, 153 ілюстрації на 95 стор., 1 таблиця по тексту, 7 таблиць на 4 стор., 267 найменувань використаних літературних джерел на 24 стор., 3 додатки на 111 стор.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині обґрунтована актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з науковими держбюджетними темами Міністерства освіти і науки України, сформульовані мета та основні задачі теоретичних і експериментальних досліджень, наукова новизна та практична цінність отриманих результатів. Наведені дані про впровадження результатів роботи, особистий внесок автора та публікації.

У першому розділі проаналізовані фізичні процеси водневої корозії та можливість використання для її контролю існуючих методів та приладів магнітного контролю на базі індукційних магніточутливих елементів.

Детальний аналіз процесів, які протікають у хімічних реакторах, трубопроводах, сховищах вуглеводних компонентів (нафто-, орто- параксилолів, природнього газу, бензина та ін.) показує, що в процесі експлуатації вищенаведених об'єктів через їх стінки встановлюється стаціонарний потік водню $10^{-6} \dots 10^{-7}$ моль/с·м². Це веде до поступового руйнування стінки об'єкта контролю, тобто спостерігається процес водневої корозії. Можна виділити три основні стадії водневої корозії та типи дефектів суцільності, які утворюються в металі (флокени та блістирінг). На першій інкубаційній стадії відбувається зневуглецювання металу, яке супроводжується

різким збільшенням неметалевої фази (карбіду). Друга фаза водневої корозії супроводжується збільшенням внутрішніх напруг у металі, викликаних високим тиском скупчування продуктів розпадання (метану та молекулярного водню) у несучільностях по межах зерна металу. Та третя значна стадія водневої корозії - розвиток мікрodefektів суцільності у мікротріщини та їх просування до зовнішньої стінки об'єкта. На всіх трьох стадіях корозії відбувається поступова втрата міцності металу, а її прискорюючими факторами є додаткові механічні і температурні навантаження.

Розглянуто основні методи контролю процесів водневої корозії, які базуються на експериментальних дослідженнях контрольних зразків, вирізаних з реальних об'єктів.

Показано, що в процесі водневої корозії змінюється структура металу, що веде за собою незворотні зміни магнітних властивостей металу. Розвиток неметалевої фази в інкубаційний період веде до зміни магнітної проникності матеріалу. Внутрішні напруги в металі, які виникають під дією метану та молекулярного водню, приводять до зміни коерцитивної сили металу (рис.1), а розвиток тріщини змінює поле розсіяння на поверхні стінки об'єкта контролю. На основі аналізу літературних джерел встановлені однозначні кореляції між фізико-механічними властивостями сталі стінки об'єкта контролю та його магнітними властивостями.

Проведено огляд та аналіз існуючих приладів магнітного контролю на предмет їх використання для реєстрації магнітних аномалій в металі, викликаних водневою корозією.

Наведені дані досліджень показують, що сьогодні немає практичних методів контролю водневої корозії, які можливо використовувати на діючих промислових об'єктах. Магнітний метод контролю є найбільш інформативним і він забезпечує надійність та достовірність отриманої інформації. Для реалізації цього методу потребується розробити новий клас приладів магнітного контролю.

У другому розділі розроблено концепцію магнітного методу контролю стінок конструкцій, що містять водень. В силу безперервного протікання процесу водневої корозії та тривалості даного процесу, зареєструвати зміни магнітних властивостей металу стінки контролюємого об'єкту під впливом водню можливо тільки при тривалому знаходженні перетворювача на поверхні об'єкту контролю. Це дозволяє накопичувати дані про зміни магнітних властивостей металу впродовж тривалого часу з одного встановлення перетворювача. Для створення інформаційного магнітного поля перетворювач має кілька намагнічувальних котушок, розташованих по периметру перетворювача (рис.2). Задача намагнічувальних котушок - створити в об'ємі перетворювача однорідне магнітне поле, в якому розташована матриця феромодуляційних чутливих елементів, за допомогою якої знімається топографія вертикальної складової поля розсіяння контролюємої ділянки.

Для створення однорідного поля в об'ємі, який займає давач, вирішено задачу синтезу намагнічувальної котушки. Намагнічувальна котушка складається з трьох секцій, кожна з яких замінюється нескінченно тонкою котушкою. Використовуючи метод дзеркальних зображень, ми маємо 6 тонких котушок, виконаних з дротів одного й того ж перетину, але з різним струмом.

Згідно формули Біо-Савара-Лапласа, знаходимо індукцію $\bar{B}_j^{(1)}(x, y, z)$ одиничного витка із струмом в об'ємі V_m . Потім шукаємо точки $i_j^{(1)}$, в яких буде виконуватися

$$\text{умова } \left\| \bar{B}(x, y, z) - \sum_{j=1}^N i_j^{(1)} B_j^{(1)}(x, y, z) \right\| = \min .$$

Рис.1. Основні зони водневої корозії металу та зміни його коерцитивної сили:

- 1-початковий метал;
- 2- початкова зона знеуглецьовування;
- 3-зона підвищених внутрішніх напруг;
- 4 - зона мікротріщин;
- 5 – зона макродефектів.

Рис. 2. Спрощена схема магнітного перетворювача для контролю стінок конструкцій, що містять водень:

- 1-стінка реактора;
- 2 – намагнічувальна котушка;
- 3 – матриця феромодуляційних чутливих елементів.

Ця задача зводиться до вирішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь, в результаті вирішення якої отримуємо сукупність струмів $i_1^{(1)}, i_2^{(1)}, \dots, i_N^{(1)}$ та магнітне поле цих струмів

$B_N^{(1)2}(x, y, z)$ з похибкою $\eta_N^{(1)} = \|\bar{B} - \bar{B}_N^{(1)}\| / \|\bar{B}\|$. Потім за знайденими значеннями струмів

визначаються розміри котушок у першому наближенні з врахуванням коефіцієнтів заповнення.

Визначивши параметри першого наближення сукупності тонких котушок, знаходимо поле

$B^{(1)}(x, y, z)$, яке створюється цими котушками у шукаємому об'ємі з похибкою

$\eta^{(1)} = \|\bar{B} - \bar{B}^{(1)}\| / \|\bar{B}\|$. Якщо ця похибка перевищує похибку $\eta_N^{(1)}$, то необхідно виконати друге

наближення, розташовуючи нескінченно тонкі прямокутні витки зверху тонких котушок першого

наближення та перерозподіляючи знайдені в них струми за перетинами тонких котушок. Перетин тонких котушок вибирається з припустимої, відносно нагріву, щільності струму. Ітераційний процес припиняється після n-го кроку, коли настає наближена об'єктивна рівність $\eta^{(1)} \approx \eta_N^{(1)}$. За запропонованою методикою в об'ємі $0,03 \times 0,07 \times 0,065 \text{ м}^3$ синтезовано однорідне магнітне поле з вектором індукції $B=0,1 \text{ Тл}$ з похибкою, яка не перевищує $\eta=6\%$.

Далі представлена математична модель підповерхневого дефекту в стінці об'єкта контролю, викликаного впливом водню. Обґрунтована можливість заміни ряду мілких близько розташованих дефектів одним дефектом прямокутної форми.

При виборі математичної моделі поля дефекту водневої корозії реального об'єкта використовувались наступні припущення: функція намагніченості локалізована в обмеженій області; область намагнічування має прямокутну геометричну форму; область, в якій розташована точка нагляду, необмежена; магнітне поле дефекту вважається плоскопаралельним. Враховуючи зроблені припущення, математичну модель дефекта будуємо на векторному нелінійному інтегральному рівнянні Фредгольма II-го роду.

При розбитті дослідної області на елементарні площинки, в межах кожної з яких вважаємо, що рівняння Фредгольма II-го роду зводиться до інтегрального рівняння

$$\bar{H}_i = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^N \oint \frac{(\bar{M}_j \cdot \bar{1}_n) \cdot \bar{1}_{ji}}{r_{ji}} \cdot dl_j. \quad (1)$$

Для зменшення порядку системи рівнянь (1), джерела поля виносяться на контур намагнічуючої області. При цьому спрощується розрахунок поля та процес розбиття області на елементарні площинки

$$\bar{H}(N) = -\frac{1}{2\pi} \int_L \frac{[\bar{M}(S) \cdot \bar{1}_n] \bar{1}r}{r_{SN}} dl_S + \frac{1}{2\pi} \int_L \frac{[\bar{H}(S) \cdot \bar{1}_n] \bar{1}r}{r_{SN}} dl_S - \frac{1}{2\pi} \int_L \frac{[H(S) \cdot \bar{1}_n] \bar{1}r}{r_{SN}} dl_S \quad (2)$$

Надалі, при проведенні чисельних експериментів оцінюється ефективність двох запропонованих моделей.

Рівняння (1) і (2) вирішуються ітераційним способом сумісно з рівнянням магнітного стану матеріала $\bar{M} = (1/\mu_0)\bar{B} - \bar{H}$ за алгоритмом $\bar{M}^{(k+1)} = \bar{M}^{(k)} + [1 - S^{(k)}] \bar{H}^{(k)}$, де $S^{(k)}$ - параметр, який визначається із залежності $B(H)$ контролюємого матеріала. При розрахунку залежності $B(H)$ використовуються два методи: перший - апроксимація граничної та часткових петель гістерезиса кусочно-лінійним способом та другий - шляхом порівняння напруженості, яка створюється намагніченим матеріалом з напруженістю, лінійно залежною від коерцитивної сили $H_T = \alpha_T \cdot H_c$, яка називається напруженістю зрушення. Якщо $H < H_T$, величина намагніченості у точці, що розглядається, зостається незмінною. При $H > H_T$ відбувається обертання вектору \bar{M} та зміна

його модуля, після чого встановлюється нове значення намагніченості $\bar{M}^{(k+1)} = \bar{M}^{(k)} + (\bar{H}^{(k)} - \alpha_0 \bar{H}_C)$. Використання двох методів апроксимації кривої гістерезису у другому квадранті дозволило: встановити коректність початкової моделі, знайти коефіцієнти α_t та α_0 , які початково вибиралися емпірично. Це дало можливість використовувати при розрахунку виключно просту модель обліку нелінійної залежності $M(H)$.

При розрахунку полів розсіяння дефектів, які викликані водневою корозією, використовувались такі геометричні моделі підповерхневих дефектів: прямого, нахилоного та зубчастого. Розрахунки проводились для таких товщин стінок об'єктів контролю: 3,2мм (стінка трубки теплообмінника), 7,0мм (товщина стінки нафто- та газопроводної труби), 15мм (стінка сховища вуглеводневого палива), 30мм (стінка хімічного реактора) - на відстані 0,5мм від поверхні (рис.3). Мінімальна початкова величина розкриття дефекту 100мкм, що приблизно 2-4 діаметра зерна мілкозернистої сталі, а початкова розрахункова глибина дефекту 0,1мм, що відповідає глибині знеуглецевування, з якої починається інтенсивний розвиток тріщини. Розрахунок проводився в залишковому магнітному полі $H_0=1000A/m$, а також у застосованих полях з $H_0=5000A/m$ і $H_0=10000A/m$. Результати розрахунків за розробленими моделями були перевірені на добре прорахованому поверхневому прямокутному дефекті. З метою проведення розрахунків полів розсіяння дефектів у реальному масштабі часу (їх робить мікроконтролер, вбудований у прилад), одержані спрощені математичні залежності поля дефекту від його геометричних розмірів. Одержання цих залежностей здійснювалося методом ортогонального композиційного планування другого порядку для двох факторів, якими є глибина h та розкриття $2b$ дефекту. Облік решти параметрів дефекту і намагніченості ділянки контролю здійснюється за допомогою коректуючих функцій, тоді напруженість поля розсіяння визначиться як $H_m = M_0 F_k F(2b, h)$, де F_k - коректуюча функція, яка залежить від коерцитивної сили, початкової намагніченості, кута нахилу, заглиблення, шорсткості стінки дефекту; $F(2b, h)$ - базова функція.

У результаті розрахунку для підповерхневого дефекту одержана залежність

$$H_m = M_0 F_k(x_3, x_4) (0,287 \cdot 10^{-2} x_1 + 0,114 \cdot 10^{-2} x_2 + 0,095 \cdot 10^{-2} x_1 x_2 + 0,108 \cdot 10^{-2} x_1^2 + 0,026 \cdot 10^{-2} x_2^2),$$

де x_1, x_2, x_3, x_4 - кодовані значення величин $2b, h, H_c, d$.

Для нахилоного дефекту одержана наступна спрощена залежність $H_m = M_0 F_k(x_3, x_4) \times (0,642 \cdot 10^{-2} + 0,587 \cdot 10^{-3} x_1 + 0,065 \cdot 10^{-3} x_2 + 0,18 \cdot 10^{-2} x_1 x_2 + 0,165 \cdot 10^{-2} x_1^2 + 0,0078 \cdot 10^{-2} x_2^2)$, де x_1, x_2, x_3, x_4 - кодовані значення величин $2b, h, H_c, \text{tg } \alpha$.

Розрахунок поля для дефектів з зубчастою стінкою дало можливість одержати спрощену залежність $H_m = M_0 F_k(x_3, x_4) (0,406 \cdot 10^{-2} + 0,712 \cdot 10^{-2} x_1 + 0,093 \cdot 10^{-3} x_2 + 0,084 \cdot 10^{-2} x_1 x_2 + 0,144 \cdot 10^{-2} x_1^2 + 0,0083 \cdot 10^{-2} x_2^2)$, де x_1, x_2, x_3, x_4 - кодовані значення величин $2b, h, H_c, t$.

Отримані значення полів розсіяння дефектів за спрощеними залежностями співпадають із значеннями розрахованими по моделям (1) та (2). Розбіг з відомими роботами Аркад'єва В.К., Зацепіна М.М., Мужичького В.Ф., Новікова І.А. не перевищує 5-7%, що підтверджує коректність отриманої математичної моделі поля дефекта.

У третьому розділі проведені теоретичні дослідження роботи магніточутливого пристрою для контролю дефектів, викликаних водневою корозією. У якості основного магніточутливого пристрою використовується лінійка ферозондів. Почергова комутація вихідних сигналів ферозондів створює ефект лінійної розгортки, що дає можливість реєструвати не тільки величину напруженості магнітного поля, але й його топографію. Основним елементом пристрою є двоелементні ферозонди, теорія яких у теперішній час достатньо повно розроблена. Однак при побудові матричних перетворювачів виникає ряд проблем, котрі пов'язані із специфікою фізичних процесів, які відбуваються в двохелементних ферозондах. Першою проблемою є близьке розташування півелементів, яке веде до їх взаємного впливу і у результаті до зниження чутливості ферозондів. Другою проблемою є облік впливу активного опору, який розташований у ланцюгу збудження ферозонда, на його функцію перетворення, а саме, активного опору навитки збудження та вихідного опору генератора.

Максимальна відстань між ферозондами у матриці визначається теоремою Котельникова. Якщо поле розсіяння намагніченої ділянки має ширину спектру $\Delta\alpha$, то максимальна відстань буде дорівнювати $\Delta X_M = \pi/2\alpha_b$, де α_b - найвища частота спектру функції $H(X)$. Спектральна функція Фур'є для нормальної складової напруженості магнітного поля з урахуванням її парності

$$X(\alpha) = 2 \int_0^{\infty} H_y(X) \cos(\alpha X) dX .$$
 Для розрахованих полів розсіяння максимальна відстань між

ферозондами не повинна перевищувати 12мм, а саме на такій відстані існує взаємний вплив ферозондів один на одного. Для оцінки цього впливу розглядається розподілення поля в осередках ферозонду, з урахуванням взаєморозташування їх півелементів. Оскільки осереддя півелементів мають кінцеву довжину, то в них виникає розмагнічуюче поле. Це поле тим менше, чим більше такий показник осереддя, як відношення квадрату їх довжини до площі перетину.

Основною характеристикою ферозонда служить функція перетворення, яка є дійсним числом та, поряд із залежністю від частоти і амплітуди напруженості збудження, залежить від магнітної проникності осереддя та від площі його перетину. Встановлено, що геометричні розміри осереддя чи їх диференційна магнітна проникливість є основними параметрами, які визначають метрологічні характеристики ферозонда.

У якості осереддя ферозонду використовувався аморфний метал 2НСР чи 10КНСР. При прямокутній формі осереддя його товщина складала 10мкм і 25мкм при ширині до 2мм, а діаметр циліндричних осереддь дорівнював 0,3мм та 0,8мм. Для цих форм осереддь знаходилась залежність

розподілу напруженості складових магнітного поля вздовж осереддя з урахуванням впливу вимірювальної навитки та навитки збудження.

При проведенні числового розрахунку поля в осереддях ферозонду, розрахункова модель будується при наступних припущеннях: вихрові струми в осередді рівні нулю; вектори $\bar{M}, \bar{H}, \bar{B}$ - колінійні; навитки котушок замінюються шарами струму; об'єм осереддя розбивається на елементарні об'єми (ЕО) і в кожному ЕО приймаємо, що $\bar{M} = const$. При цих припущеннях напруженість в точці нагляду визначається від кожної ЕО з урахуванням поля навитки збудження. Як модель використовується система нелінійних інтегральних рівнянь, яка приводиться до системи нелінійних алгебраїчних рівнянь

$$\bar{H}_i = [C_{ji}] \bar{M}_j + \bar{H}_{bi} + \bar{H}_{измi}; \quad \bar{M}_j = M(\bar{H}_j), \quad (3)$$

де $\bar{H}_{bi}, \bar{H}_{измi}$ - вектори напруженості поля збудження і вимірюемого поля відповідно. Далі рівняння записується як в прямокутній системі координат для осередь прямокутного перетину, так і в циліндричній системі координат для осередь круглого перетину. Враховуючи, що аморфний метал осередь ферозонда має вузьку прямокутну петлю гістерезису, залежність $M(\bar{H}_j)$ апроксимується кусково-лінійною функцією. Потім проводиться розрахунок коефіцієнтів симетричної матриці $[C_{ji}]$ для кожної з трьох компонент магнітного поля. При розрахунку поля збудження струм у котушці збудження замінюємо на поверхневу щільність струму та інтегрування ведемо за чотирма гранями котушки збудження.

В результаті отримано формули для розрахунку складових напруженості трьохмірного магнітного поля в осередді ферозонду.

Враховуючи характер роботи ферозонду на поверхні металу, підданій водневій корозії, яка полягає в малому прирощуванні вимірюемого поля, коли $H_{изм} \ll H_b$, то ферозонд можна розглядати як лінійний пристрій з періодично змінним значенням магнітної проникності $\mu(t)$. При цьому допущенні, для розрахунку функції перетворення ферозонда необхідна залежність $\mu_c = f(\mu, 2B)$, де $2B$ - довжина осереддя ферозонду. Тому для різних параметрів осередь знайдено розподіл складової магнітної індукції вздовж вісі осереддя. Так на межі розділу осереддя-повітря дотична складова індукції має розрив $B - B_e = \mu_0 \cdot \tau$, де B, B_e - дотична складова індукції в осередді та у повітрі, τ - щільність поверхневого струму. Тоді дотична складова індукції зв'язана з щільністю поверхневого струму виразом $B = D \cdot \tau$. Для визначення щільності поверхневого струму стрижень розбиваємо на циліндричні ділянки довжиною Δy_j , в кожній з яких тече струм $i_j = \sigma_j \cdot \Delta y_j$. Функція індукції в осередді подається як сума індукцій вимірюемого $B_{изм}$ та зв'язаного $B_{св}$ струмів. З урахуванням індукції, яка створюється на вісі котушки збудження з нескінченно тонким шаром струму, отримано інтегральне рівняння відносно поверхневої щільності зв'язаного струму

$$\sigma_i = \frac{B_{uzm}}{D} + \lambda \int_{-B}^B \sigma_j \cdot K(i, j) \cdot dy_j, \quad (4)$$

яке вирішується методом послідовного наближення, а рішення шукається у вигляді ряду $\sigma = \sigma_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (\lambda)^n \cdot \sigma_n$, спадаючої геометричної прогресії. Визначивши перший член прогресії, знаменник та суму членів ряду прогресії, знаходимо індукцію на вісі осереддя

$$B = B_{uzm} + \frac{\mu_0}{4\pi} \sigma(y_i) \cdot R(y_i). \quad (5)$$

В результаті числових розрахунків були визначені залежності $B_y(y)$, $M_y(y)$, $H_{py}(y)$, де y – координата, співпадаюча за напрямком з віссю осереддя ферозонда. Встановлено, що ці залежності у великій мірі залежать від параметрів котушки струму збудження ферозонду. Тому для котушок, у яких довжина менше довжини осереддя, втрачає смисл такий параметр, як коефіцієнт розмагнічування, оскільки він стає залежним від відношення довжин котушки та осереддя. Значення максимальної величини магнітної проникності та індукції насичення мало впливають на розподілення поля вздовж осереддя. Дані, отримані при аналізі розподілу полів векторів \bar{M} та \bar{H}_p вздовж осереддя, приводять нас до висновку, що методом зменшення похибки при розрахунку функції перетворення ферозонда є використання у розрахунках функції перетворення безпосередньої залежності $B_y(y)$. Експериментами встановлено, що поздовжня складова вектору індукції складає в середньому вздовж осереддя 90-95 % від модуля вектора індукції при значеннях $l^2/S > 40-50$. При менших значеннях β вага складових вектора індукції, не співпадаючих з віссю осереддя, зростає, що викликає необхідність використовувати для розрахунку поля в осередді рівняння (3), а не (4). Для оцінки коректності моделей поля в осередді розраховується коефіцієнт розмагнічування осередь і результати порівнюються с даними, одержаними іншими дослідниками.

При створенні поля підмагнічування перетворювача за допомогою постійних магнітів осереддя ферозонду знаходиться у полі постійних магнітів, а також у полі розсіяння феромагнітної поверхні. Для визначення магнітного поля у такій магнітній системі використовується метод дзеркальних зображень, при якому просторове інтегральне рівняння для трьохмірного магнітного поля зводиться до системи алгебраїчних рівнянь

$$\bar{H}_i = \frac{1}{4\pi} \left[\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K (\bar{M}_j \cdot \bar{n}_{kj}) \int_{\Delta S_{kj}} \frac{\bar{R}_i - \bar{R}_j}{|\bar{R}_i - \bar{R}_j|^3} dS_j \right] + \bar{H}_{ei}. \quad (6)$$

Зовнішнє поле \bar{H}_{ei} є полем дзеркального зображення постійного магніта, а для дзеркального зображення полем зовнішнього джерела буде поле постійного магніту. Тому до системи рівнянь (6) додається функція, характеризуюча зв'язок між намагніченістю та напруженістю поля $H=N(M)$ у другому квадранті петлі гістерезису постійного магніта,

виконаного з матеріалу ніобій-залізо-бор. Для кожного елементарного об'єма постійного магніту початкова намагніченість дорівнює $\bar{M}^{(0)} = \bar{I}_y \frac{1}{\mu_0} B_r$, де B_r - залишкова індукція магніту, а для дзеркального зображення магніта вектор залишкової намагніченості вважається рівним $\bar{M}_3 = -\bar{I}_y \frac{\mu-1}{\mu+1} M_r$. Після визначення векторів намагніченості у кожному елементарному об'ємі дзеркального зображення магніта, розрахунок вектора намагніченості знову ведеться за тим же алгоритмом в об'ємі магніта, але не при нульовому значенні \bar{H}_e , а при напруженості зовнішнього поля, яке створює дзеркальне зображення. Після визначення вектора намагніченості у магніті і його дзеркального зображення, розрахуємо поле зовні постійного магніту на лінії розташування осередь ферозонда.

Четвертий розділ присвячено розрахунку ферозондового магніточутливого елемента, працюючого у слабких магнітних полях на поверхні масивних феромагнітних тіл у складі багатоелементних перетворювачів.

Визначається нижній поріг чутливості ферозонда, увімкненого за схемою градієнтміра. Максимальне значення величина $H(x)$ приймає при $x=x_m$, тобто у точці де найбільша швидкість зміни функції $H(x)$ (рис.4). Чи іншими словами, зменшення величини напруженості поля на відстані Δx можна оцінити коефіцієнтом $K=H_m(\Delta x)/H_0$. З графічних залежностей $K=f(\Delta x, \beta)$ випливає, що необхідний поріг чутливості ферозонду повинен знаходитись у межах $|H_0| \leq 1-3 \text{ А/м}$. З розглянутих раніше видів збудження ферозондів і способів обробки його вихідного сигналу, найбільш придатним для реєстрації полів у зазначеному діапазоні є режим збудження ферозонду синусоїдальним струмом та виділення інформаційного сигналу у вигляді амплітуди другої гармоніки, а також імпульсне однополярне збудження.

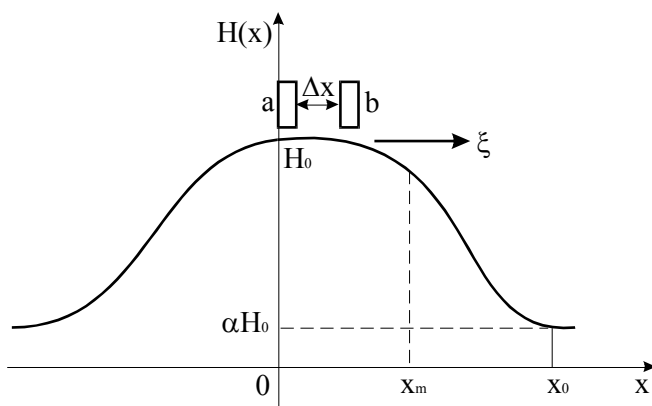


Рис. 4. Тангенціальна складова напруженості поля дефекту від переміщення ферозонду

Для контролю дефектів, викликаних водневою корозією, використовують-ся відносно невеликі по довжині ферозонди (4-7мм) та незважаючи на це не можна вважати, що напруженість поля вздовж ферозонда однакова і дорівнює напруженості поля в точці.

Відомі рекомендації з вибору довжини осереддя ферозонда зводяться до того, що довжину ферозонда необхідно вибрати як можна меншою настільки, наскільки дозволяє технологія виготовлення ферозонду. Однак при цьому зменшується чутливість ферозонду за рахунок зменшення проникності його осередь. Тому розроблено механізм визначення раціональної довжини ферозонда, при якій зберігається реакція ферозонда на поля розсіяння дефектів та необхідна величина функції перетворення.

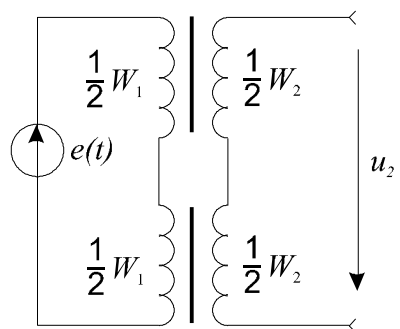
Розроблена математична модель процесу утворення вихідного сигналу ферозонда при імпульсному однополярному збудженні, яка менш ідеалізована та зручна для практичних розрахунків. Розрахункова модель будується на аналітичному визначенні середнього значення відносної магнітної проникності осереддя ферозонду. При цьому роблять такі припущення: дія вихрових струмів враховується шляхом зміни внутрішнього опору генератора збудження; крива намагнічування осередь ферозонду апроксимується функцією арктангенсу.

Ланцюг збудження ферозонду лінеаризується наступним чином: знаходиться максимальне значення напруженості магнітного поля в осереддях ферозонду, необхідне для утворення вихідного сигналу $H_m = B_s / (\mu_0 m)$, визначається середнє значення відносної магнітної проникності осередь при змінній напруженості поля збудження від 0 до H_m . Знаючи середнє значення магнітної проникності осереддя, розраховується індуктивність ланцюга збудження. Вихідна напруга u_2 на неробочому ході при дії імпульсу збудження визначається різницею похідниць потокозчеплення вихідних навиток ферозонду

$$\psi_{a2} = \psi_{m2} \cdot \operatorname{arctg} \sigma(H + \Delta H);$$

$$\psi_{b2} = \psi_{m2} \cdot \operatorname{arctg} \sigma(H - \Delta H) .$$

Згідно з принциповою схемою ферозонда, наданою на рис. 5, з впливом імпульсу збудження



$$e(t) = \begin{cases} E_m, & \text{при } 0 < t \leq \tau_H; \\ 0, & \text{при } t > \tau_H, \end{cases}$$

перехідний процес для напруженості поля збудження при малих значеннях поля, що вимірюється $\Delta H \ll H_m$ описується такою математичною залежністю

Рис. 5. Електрична принципова схема ферозонду.

$$H = H_0 \left(1 - e^{-\frac{R}{L_1} t} \right), \text{ при } \tau_H \geq t > 0 ;$$

$$H = H_0 \left(-e^{-\frac{R}{L_1} t} + e^{-\frac{R}{L_1} (t - \tau_H)} \right), \text{ при } t > \tau_H ,$$

де $H_0 = \frac{E_m W_1}{R \cdot l}$; R - активний опір ланцюга збудження.

З урахуванням перехідних процесів, що протікають у ланцюзі збудження фєрозонду під час дії імпульсу збудження та після його завершення, отримано вирази для визначення амплітуди вихідних імпульсів фєрозонда при мінімальній тривалості імпульса збудження.

Для перевірки правомочності лінеаризації ланцюга збудження розроблена математична модель, яка враховує нелінійність залежності $V=B(H)$. Модель будується на основі другого закону Кірхгофа для вхідного ланцюга у вигляді рівняння

$$\frac{d\psi_{a1}}{dt} + \frac{d\psi_{b1}}{dt} + H \cdot q = e(t)$$

яке вирішується відносно H . Функція перехідного процесу в ланцюзі збудження апроксимується неповним кубічним поліномом $H=c_1 t+c_2 t^2+c_3 t^3$.

Розрахунки були проведені для фєрозонда з довжиною осереддя $l = 5, 6, 7$ мм при останніх рівних параметрах $S=0,025 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; $w_1 = 150$; $w_2 = 100$; $R=15$ Ом, матеріал осередь 2НСР, з амплітудою $E_m=20\text{В}$ та тривалістю імпульса збудження $\tau_H=10^{-6}\text{с}$. Результати розрахунків за двома моделями (суцільна лінія - лінійна модель, рис. 6, 7) показують, що максимальні значення вихідних імпульсів збігаються, що вказує на припустимість використання лінійної моделі вхідного ланцюга з усередненим значенням магнітної проникності.

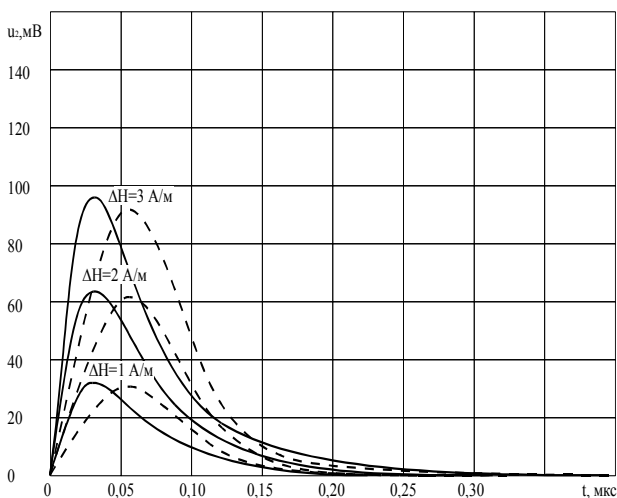


Рис. 6. Вихідний сигнал фєрозонда при довжині осередь $l=5$ мм.

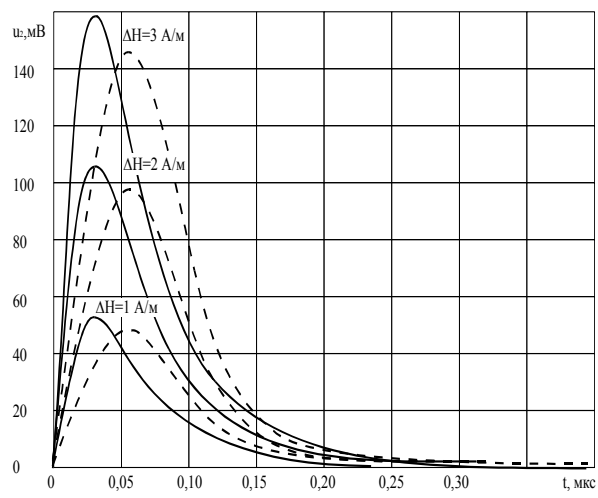


Рис. 7. Вихідний сигнал фєрозонда при довжині осередь $l=7$ мм.

Для запобігання "дзвону" вихідного сигналу ферозонда на неробочому ході він навантажується опором 50-2000 Ом. Вплив цього опору на функцію перетворення ферозонда здійснюється за допомогою розгляду енергетичного режиму ферозонда.

Енергія магнітного поля в осередках півелементів ферозонду в режимі утворення вихідного сигналу дорівнює

$$W_{Ma} = \frac{1}{2} \int_{V_a} B_s(H + \Delta H) dV, \quad W_{Mb} = \frac{1}{2} \int_{V_b} B_s(H - \Delta H) dV,$$

де $V_a, V_b = V$ - об'єм осередків півелементів.

Визначивши реактивну потужність частки енергії, за рахунок якої формується вихідний сигнал ферозонду, знайдено вихідний опір ферозонду. При опорі навантаження R_2 , вихідне напруження навантаженого ферозонду дорівнює $U'_{m2} = \frac{U_{m2} R_2}{\sqrt{x_{L2}^2 + R_2}}$.

Отримані числові результати за даною формулою відрізняються на 5-7% від експериментальних даних.

Аналіз роботи ферозонда при синусоїдальному збудженні при тих же прийнятих припущеннях, що й при імпульсному збудженні, та з урахуванням того, що вхідний ланцюг ферозонда має нелінійну індуктивність, проводиться методом гармонічного балансу. Результати розрахунку показують, що амплітуда другої гармоніки складає не більше 10% від усього сигналу і, для ефективного виділення сигналу на другій гармоніці, окрім сигналу, необхідно підбирати амплітуду поля збудження. Беручи до уваги низький поріг чутливості ферозондів, необхідний для реєстрації процесів водневої корозії, слід враховувати усі фактори, що впливають на роботу ферозонда. Одним з таких вагомих факторів є зміни магнітної проникності осередків ферозондів при їх взаємному впливі один на одного. Для осередків, розташованих на відстані співвимірному з їх геометричними розмірами (рис.8), запропонована наступна формула розрахунку проникності форми осередків

$$m = m_0 + \frac{2}{\pi} (m_\infty - m_0) \arctg \frac{x^*}{k}, \quad (7)$$

похибка якої не перевищує 1,5%.

Коректується також функція перетворення ферозонду, що працює у складі багатоелементного матричного перетворювача. На рис. 9 показано результати розрахунків залежності вихідного сигналу одиничного ферозонда при переміщенні над дефектом (пунктирна лінія) та ферозонда, який знаходиться в оточенні 10, 6 та 4 ферозондів у матриці. З графіків видно, що найбільш різка зміна коефіцієнта перетворення спостерігається при $\alpha < 1$ і залежить від того, скільки осередків оточують ферозонд.

Температура ферозонда, який знаходиться на поверхні стінки реактору, змінюється в залежності від температури оточуючого середовища та температури стінки реактору. Зміна температури осереддь ферозонду веде до зміни його функції перетворення, тому для її коректування отримано аналітичні залежності зміни вихідного сигналу ферозонда від його температури.

Теплова модель ферозонда містить чотири ізотермічні зони, у яких джерела тепла розподілені рівномірно у всьому об'ємі. Між сусідніми ізотермічними зонами проходить теплообмін за законом Ньютона. Тепловим джерелом P_1 вимірювальної навитки можна знехтувати, у порівнянні з потужністю теплових джерел навитки збудження P_2 , компенсаційної навитки P_3 та осереддя P_4 - визначених втратами на перемагнічування та вихрові струми. На основі закону Кірхгофа для теплового ланцюга та закону збереження енергії для ділянок ланцюга створена система рівнянь, що описують теплові процеси ферозонда. Ця система вирішується відносно температури осереддя t_4 , $t_4 = K_1 P_2 + K_2 P_3 + K_4 t_c$, де $K_1 - K_4$ функції теплових провідностей ізотермічних зон, t_c - температура оточуючого середовища. Знаючи залежність температури осереддя ферозонду від частоти поля збудження та довжини ферозонду визначається робоча частота ферозонда з урахуванням зміни температури оточуючого середовища. Розрахунки показали, що зміна температури осереддя на 80°C визиває зміну вихідного сигналу ферозонда не більше ніж на 4-6%, що знаходиться у межах похибки роботи ферозонду.

В п'ятому розділі наведені результати експериментальних досліджень: зміни коерцитивної сили сталі під впливом водню; полів розсіяння підповерхневих дефектів; параметрів магнітної системи ферозонду (коефіцієнту розмагнічування осереддь та розподілу індукції вздовж вісі осереддя), які підтверджують коректність розроблених математичних моделей у попередніх розділах.

Дослідження зміни коерцитивної сили проводились на вакуумному устаткуванні, а контрольна пластина з сталі 20 нагрівалася до 500°C для прискорення процесу її наводнювання. Ступінь наводнювання пластини визначався за числом молекул водню, які пройшли крізь неї при постійному тиску останнього. Для реєстрації цих молекул використовувався мас-спектрометр МХ-7303. Процес наводнювання супроводжується вимиванням вуглецю зі сталі, що веде до зміни коерцитивної сили сталі на 61% при зменшенні вмісту вуглецю в контрольній пластині на 1%.

Для дослідження полів дефектів, викликаних водневою корозією, остання замінювалась міжкристалічною корозією, яку отримували кип'ятінням контрольного зразка в сірководокислому розчині мідного купоросу. Матеріал контрольних зразків Сталь 20 та 30ХМЛ, які мають однакові коефіцієнти розчинності водню, а за воднестійкістю та коерцитивною силою - різко відрізняються.

Після намагнічування контрольних зразків проводилось сканування їх поверхні блоком ферозондових перетворювачів з шагом 1мм. Аналіз магнітовимірювального каналу у діапазоні

3-200А/м показав, що його похибка не перевищує 1,5-2%, а розбіг теоретичних даних розрахунку полів розсіяння дефектів та експериментальних даних не перевищує 5-7%.

Розподілення індукції вздовж осереддя ферозонду визначалося за допомогою балістичної установки БУ-3. У якості магніточутливого елемента використовувався мініатюрний давач Холу (розміри 0,5x0,15мм), який пересувався вздовж осереддя з шагом 0,05мм. Живлення давача Холу здійснювалось змінним струмом частотою 2кГц. Використання схеми компенсації залишкового напруження дозволило вимірювати напруженість поля у поверхні осереддя з похибкою не більше 2%.

У шостому розділі наведені розроблені схеми приладів контролю водневої корозії та конструкції первинних перетворювачів для різних об'єктів контролю. На базі розробленої схеми компенсації початкового розбалансу ферозонда (патент України 39325А) при імпульсному збудженні побудовані магнітовимірювальні канали для матричних перетворювачів. Принцип компенсації початкового розбалансу ферозонда засновано на зсувенні нульової точки ферозонду на середину його робочого діапазону, який у свою чергу визначається різницею максимального вихідного напруження й напруження розбалансу ферозонда. Для зменшення числа з'єднувальних дротів навитка компенсації живиться від імпульсів збудження через амплітудний детектор.

Розроблений принцип компенсації дозволив досягнути порога чутливості ферозонду з імпульсним збудженням близького до порога чутливості ферозонду, що працює на другій гармоніці.

Імпульсний режим роботи ферозонду дозволив використовувати прості схеми збудження та обробки вихідного сигналу з великої кількості ферозондів. Він забезпечує високу стійкість до перешкод за рахунок великої імпульсної потужності вихідного сигналу.

Для досягнення високої стабільності імпульсів збудження у широкому температурному діапазоні та при роботі на велику кількість ферозондів використовувався програмний метод формування напруги збудження, реалізований на ПІС - контролері. Також на ПІС - контролері побудована схема збирання та попередньої обробки вихідних сигналів ферозонду. Використання керуючих мікроконтролерів дозволило проводити попередню обробку, зберігання та передавання інформації безпосередньо із давача. При цьому контролер "пакує" та готує інформацію до передавання, виконує функцію диспетчера живлення та забезпечує коректировку функції перетворення ферозонду за тестовими сигналами у діапазоні температур -40°C $+125^{\circ}\text{C}$ та у часі на $2 \cdot 10^{-7}\text{В}/1000\text{ч}$.

Розроблено конструкцію первинного перетворювача (рис. 10), який встановлюється на стінці контролюемого реактору. З допомогою магнітно-пружинних притискачів, які самоцентруються, (рис.11) перетворювач надійно утримується на поверхні об'єкта контролю. Розрахована мінімально припустима відстань від магнітного притискача до перетворювача, коли

магнітне поле притискача не впливає на роботу перетворювача. Сумісно з перетворювачем в корпусі знаходиться схема збудження та обробки вихідних сигналів, яка живиться від автономного джерела.

Враховуючи неможливість проведення експериментів на діючому хімічному реакторі, кожний елемент конструкції приладів магнітного контролю пройшов випробування і працює у складі магнітних дефектоскопів, які використовуються у промисловості на етапі виробництва окремих вузлів та деталей.

Розглянуто питання надійності роботи приладів, проводиться аналіз вірогідності отриманої інформації, а також наведені результати експлуатації розроблених приладів на працюючих промислових підприємствах.

Рис.10. Плита давачів:

1 - основина (стеклотекстоліт); 2 - рознім збудження; 3 - ферозонд;
4 - рознім вихідних сигналів; 5 - компаунд; 6 - навитка підмагнічування.

Рис. 11. Загальний вигляд магнітного давача для встановлення на стінці хімічного реактору:

1 - електронний блок; 2 - ребро жорсткості; 3 - притискач магнітно-пружинний, який самоцентрується.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних і експериментальних досліджень дано узагальнення і нове вирішення науково-технічної проблеми проведення неруйнівного магнітного контролю стінок промислових об'єктів, підпадаючих під дію водню. Показано, що здійснення безперервного магнітного моніторинга об'єкта контролю, який знаходиться у робочому стані, дозволяє виявляти внутрішні дефекти водневої корозії на початкових стадіях та простежити динаміку їх розвитку. Для реалізації цих можливостей розроблено нове покоління приладів магнітного контролю на базі багатоелементних ферозондових перетворювачів, які дозволяють вирішувати актуальні задачі неруйнівного контролю і технічної діагностики техногенно небезпечних об'єктів.

У рамках розробки даного підходу отримані такі основні результати:

1. Встановлено кореляційні зв'язки між дефектами, викликаними водневою корозією на її різних стадіях, та магнітними властивостями металу об'єкта контролю. Показана циклічність зміни

коерцитивної сили на початкових стадіях водневої корозії, що дозволяє здійснювати її контроль до моменту утворення підповерхневих макродефектів.

2. Побудована геометрична модель підповерхневого дефекта, яка враховує особливості утворення та розвитку дефектів у водневому середовищі. На основі розробленої геометричної моделі дефекта проведені розрахунки полів розсіяння, а також одержані експериментальні дані полів розсіяння від реальних дефектів, які підтверджують коректність запропонованої геометричної моделі.

3. Розроблено дві математичні моделі розрахунку полів розсіяння підповерхневих дефектів водневої корозії. Запропоновано ітераційний метод і розроблено алгоритм для рішення нелінійних векторних інтегральних рівнянь, на яких базуються дані моделі. Шляхом перетворення залежності магнітного поля від вектору намагніченості можна винести джерела магнітного поля на поверхню області та звести задачу з розрахунку магнітного поля у нелінійному середовищі до вирішення системи нелінійних інтегральних рівнянь.

4. Використавши метод ортогонального композиційного планування другого порядку для двох факторів і метод коректуючих функцій, отримані спрощені залежності для розрахунку максимального значення поля розсіяння дефекту, що дозволяє в реальному масштабі часу визначати основний параметр дефекту - його глибину, за динамікою розвитку якого можна судити про залишковий ресурс працюючого обладнання.

5. Для створення інформаційного магнітного поля на поверхні промислового об'єкта в зоні контролю, запропоновано метод синтезу однорідного магнітного поля для прямокутних котушок, що забезпечує потрібну однорідність поля у заданому об'ємі розташування магніточутливих елементів. Так неоднорідність поля для індукції $B=0,1$ Тл не перевищує 5-6%, що є достатнім для забезпечення вірогідності контролю.

6. Розроблена конструкція магніточутливого пристрою на базі багатоелементних ферозондів та визначена максимально можлива відстань між ними, при якій не відбувається втрата інформації. Використання багатоелементного магніточутливого пристрою дозволило здійснити електронне сканування на поверхні об'єкта контролю, що забезпечує безперервний довгостроковий контроль, коли пристрій знаходиться у статичному режимі. При нерухомому розташуванні магніточутливого пристрою досягається максимальна чутливість ферозондів, а це в свою чергу дозволяє реєструвати структурні зміни в металі, які приводять до зміни поля розсіяння на 1-3А/м, що відповідає початковій фазі водневої корозії.

7. Проведено аналіз розподілу поля вздовж осереддя ферозонда з урахуванням розташування навиток на осередді ферозонда, а також з урахуванням взаємного впливу ферозондів один на одного. Одержані залежності, які дозволяють коректувати функцію перетворення ферозонда, працюючого в багатоелементному перетворювачі. Це забезпечує заданий

поріг чутливості при створенні матричних ферозондових перетворювачів при їх роботі в слабких магнітних полях, якими є поля дефектів, викликаних водневою корозією.

8. Проведено аналіз роботи ферозонда при гармонічному збудженні на другій гармоніці та при імпульсному збудженні. При цьому вперше враховувався внутрішній опір генератора збудження та опір навантаження з нелінійною індуктивністю, а також розраховується опір навантаження, що запобігає "дзвону" вихідного ланцюга ферозонду. Отримані значення функції перетворення ферозонду у залежності від геометричних розмірів, поля збудження, зовнішнього поля, що вимірюється, дозволяють зробити висновок про можливість використання імпульсного режиму збудження для реєстрації малих магнітних полів при потрібному порозі чутливості, який було визначено на рівні 1-3А/м.

9. Розроблена теплова модель роботи ферозонда, що дозволяє коректувати функцію перетворення ферозонда при змінах температури стінки об'єкта контролю та оточуючого середовища. Це є необхідною умовою при довгостроковій (3-5 місяців) експлуатації прилада на об'єкті контролю. Висока температурна стабільність забезпечується вибором у якості осередь ферозонда аморфного металу і раціональної величини поля збудження. Рекомендації щодо температурної стабільності характеристик ферозондів дають можливість при змінах температури на 80°C припускати зміни функції перетворення не більше ніж на 4-6%, що дозволяє контролювати об'єкти з підвищеною температурою такі, як хімічні та ядерні реактори, паропроводи та ін.

10. Розроблено і запатентовано універсальний магнітовимірювальний канал обробки вихідного сигналу ферозонда, що дозволяє відокремитись від перешкоджуючих факторів таких, як розбаланс, дрейф, що особливо важливо при тривалій роботі ферозонда без періодичної тарировки. На його основі побудовані прилади магнітного контролю, забезпечуючі безпечну експлуатацію техногенно небезпечних конструкцій, що містять водень та знаходяться під високими тиском та температурою. Розроблені сучасні методи збирання та передачі інформації з використанням радіоканалу роблять прилади мобільними при експлуатації й забезпечують пріоритет при створенні нового покоління приладів магнітного контролю.

Список опублікованих робіт за темою дисертації:

1. Яковенко В. В., Мирошников В. В., Шведчикова И. А. Теоретические и практические результаты исследований применения магнитных полей в промышленности // Вісник Східноукраїнського державного університету. – Луганськ.-1996. – Ювілейний вип. – С. 108 – 112.

Здобувачеві належить аналіз магнітних приладів, які використовуються для неруйнівного контролю в промисловості.

2.Мирошников В.В., Шевченко А.И. Проектирование дифференциального феррозонда// Вісник Східноукраїнського державного університету. – Луганськ.-1997. –8, №4 – С. 135-140.

Здобувачеві належить формула визначення вихідного сигналу феррозонда.

3. Мирошников В.В. Измерение остаточной намагниченности труб большого диаметра // Вісник Східноукраїнського державного університету. – Луганськ.- 1997. - №4(8). - С. 130-135.

4.Мирошников В.В. Размагничивание и контроль остаточной намагниченности деталей из инструментальной стали // Вісник Східноукраїнського державного університету.– Луганськ.- 1997. - №1(5). - С. 240-243.

Здобувачеві належить розробка алгоритму одночасної обробки інформаційного сигналу за амплітудою та фазою.

5.Мирошников В.В. Феррозонд с повышенной помехоустойчивостью для многоэлементных датчиков // Технічна електродинаміка. - 1999. - №2. - С. 74-76.

6.Мирошников В.В. Феррозондовый матричный преобразователь для контролю протяженных цилиндрических изделий // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. - 1999. - №4. - С. 41-44.

7.Мирошников В.В. Автоматизированная система управления режимом сварки труб // Наукові праці Донецького державного технічного університету. – Донецьк: ДонДТУ - 1999. - С. 203-209.

8.Мирошников В.В. Теория матричного магниточувствительного датчика на основе феррозондов // Вісник Східноукраїнського державного університету. – Луганськ. - 2000. - № 3(25). - С. 197-202.

9.Мирошников В.В. Функция преобразования феррозонда второй гармоники // Вісник Східноукраїнського національного університету. – Луганськ. - 2000. - №9(31,ч. 2). - С. 122-125.

10.Мирошников В.В. Экспериментальное исследование магнитных полей рассеяния дефектов // Вісник Східноукраїнського національного університету. – Луганськ. - 2000. - №10(32). - С. 154-158.

11.Мирошников В.В. Расчет магнитного поля электромагнитного вибропитателя // Вибрации в технике и технологиях. - 2000. - №3(15). - С. 30-31.

12.Мирошников В.В. Багатоелементні феррозондові дефектоскопи як ефективний метод неруйнівного магнітного контролю // Нафтова і газова промисловість. - 2000. - №4. - С. 52-54.

13.Мирошников В.В. Импульсный режим работы феррозонда в приборах магнитного контроля // Технічна електродинаміка. - 2000. - №5. - С. 72-74.

14.Мирошников В.В. Довгостроковий магнітний моніторинг техногенно небезпечних конструкцій // Методи та прилади контролю якості. - 2000. - №5. - С. 41-44.

15. Романенко А.В., Яковенко В.В., Мирошников В.В. Розрахунок магнітної проникності осередь ферозондів при їх взаємному впливі// Методи та прилади контролю якості.-Івано-Франковськ.-2000.-№6.-С.6-8.

Здобувачеві належить проведення порівняльного аналізу розробленої методики з існуючими.

16. Мирошников В., Романенко А. Математическая модель поля магнитного датчика над ферромагнитной поверхностью// Вісник державного університету “Львівська політехніка”.Радіоелектроніка та телекомунікації.-Львів.-2000.-№387.-С.480-483.

Здобувачеві належить алгоритм розрахунку поля в осередях ферозонду.

17. Романенко А.В., Мирошников В.В., Криеренко А.Г. Моделирование магнитного поля в ферромагнитных стержнях// Науковий вісник національної гірничої академії України.-Дніпропетровськ.-2000.-№6.-С.54-57.

Здобувачеві належить модель розрахунку поля в тонких стрижнях.

18. Мирошников В.В., Шевченко А.И. Швець С.Н. Селективный вихретоковый дефектоскоп для контролю труб// Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах”: Збірник наукових праць.-Хмельницький: ТУП,2001.-С.384-385.

Здобувачеві належить алгоритм розрахунку вихідного сигналу перетворювача з урахуванням магнітної проникності об'єкта контролю.

19. Шевченко О.І., Мирошников В.В., Шведчикова І.О. Магнітний ферозондовий контроль осей колісних пар// Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету.-Кременьчуг.-2001.-№2(11).-С.207-209.

Здобувачеві належить розробка принципу знімання та обробки вихідних сигналів перетворювачів, побудованих на базі ферозондів.

20. Мирошников В.В., Швець С.Н., Саид Вард. Магнитный контроль водородосодержащих конструкций // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету.-Кременьчуг.-2001.-№2(11).-С.235-237.

Здобувачем встановлені кореляційні зв'язки процесу корозії та магнітних властивостей металу.

21. Мирошников В.В. Численное моделирование магнитных полей дефектов // Науковий вісник національної гірничої академії України.-Дніпропетровськ. - 2001. - №6. - С. 60-63.

22. Крутов Ю.М., Мирошников В.В., Швець С.Н. Теоретический анализ работы проходного вихретокового преобразователя при контроле тонкостенных полых цилиндров// Вісник Східноукраїнського національного університету. -Луганськ – 2001. – 45, № 11. – С. 212 – 220.

Здобувачеві належить модель утворення вихідного сигналу коли з'являється дефект.

23.Мирошников В.В., Шевченко А.И., Шве́ц С.Н. Феррозондовый магниторегистрационный канал приборов магнитного контролю // Вісник Східноукраїнського національного університету. – Луганськ. - 2002. - №3(49). - С. 142-144.

Здобувачем запропонована схема компенсації початкового розбалансу ферозонда та вказані основні зв'язки.

24.Мирошников В.В. Численный метод расчета коэффициента размагничивания сердечника феррозонда // Вісник СХУ ім. В.Даля. – Луганськ. -2002.-№7.-С. 15-19.

25.Мирошников В.В. Модель дефекта водородосодержащих конструкций // Вісник СХУ ім. В.Даля. – Луганськ. - 2002. - №7. - С. 30-34.

26.Мирошников В.В. Изменение магнитных свойств стали под воздействием водорода // Вісник СХУ ім. В.Даля. – Луганськ. - 2002. - №11. - С. 45-48.

27.Мирошников В.В. Расчет приращения поля дефекта // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. - Донецк: ДГТУ. - 2002. - С. 115-120.

28.Мирошников В.В. Индукционные магниточувствительные элементы. - Луганск: ВНУ, 2001. - 140 С.

29.Мирошников В.В., Кабар С. А. Расчет магнитного поля дефектов в ферромагнитных изделиях // Электромеханика. – 1991. – № 8.

Здобувачеві належить побудова математичної моделі поля розсіяння дефекту.

30.Пат. 39325А Україна, МПК⁷ G 01 N 27/90. Феррозондовый магнитовимірювальний канал / Мирошников В.В., Шевченко О.І., Романенко А.В., Калашникова О.М. (Україна); Східноукраїнський державний університет. - № 2000031600; Заявл. 21.03.2000; Опубл. 15.06.2001. – 3 с.

Здобувач запропонував метод компенсації початкового розбалансу ферозонда шляхом введення точки штучного нуля.

31. Мирошников В.В., Шевченко А.И. Дефектоскоп для оперативного контролю тележек вагонов// Труды V Междунар. научно-технической конф. “Проблемы развития локомотивостроения”.-Алушта.-1995.

Здобувачеві належить спосіб запису одержуємого з ферозондів сигналу.

32. Мирошников В. В., Шевченко А. И., Стеблевский В. А. Дефектоскоп для контролю стоек шасси самолета // Труды VI Межвузовской научно-технической конф. стран СНГ “Современные методы и средства электромагнитного контролю и их применение в промышленности”. – Могилев, 1995.

Здобувач запропонував використовувати багатоелементний перетворювач на базі ферозондів, включених по полемірній схемі.

33. Мирошников В. В., Куракин В. А., Шевченко А. И., Стеблевский В. А. Магнитоизмерительный комплекс для водородофазового анализа сплавов железа // Труды Второй междунар. конф. “Водородная обработка материалов”. - Донецк.- 1998.

Здобувач запропонував конструкцію первинного перетворювача з використанням феромодуляційного магніточутливого елемента.

34.Мирошников В.В., Курцевой Ю.Н., Мирошникова Л.А., Тихонов Н.А. Высокочувствительный вихретоковый дефектоскоп для неразрушающего контролю труб// Труды Второй междунар.конф. “Водородная обработка материалов”-Донецк.-1998.

35.Miroschnikov V. The theory of matrix magnetosensitive sensor on the basis of ferroprobes // XV Symposium Electromagnetic phenomena in nonlinear circuits. – Poznan – Liege. – 1998.

36.Мирошников В. В., Романенко А. В., Яковенко В. В. Многоэлементный магнитный интеллектуальный датчик в системе диагностики и контролю // Труды 4-й специализированной конф. и выставки “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики промислового обладнання”. – Ивано-Франковськ.-1999.

Здобувач запропонував використовувати в якості джерел магнітного поля та елементів кріплення постійні магніти.

37.Мирошников В.В., Бриченко М.В., Швец С.Н. Магнитный контроль водородосодержащих конструкций // Труды Третьей Междунар.конф. “Водородная обработка материалов” (ВОМ-2001).-Донецк.-2001.

Здобувачеві належить принцип організації безперервного магнітного моніторингу об'єкта контролю.

38. Vadim Miroshnikov, Alexandr Shevchenko, Svetlana Shvets “Computation of defectoscopes magnetizing systems”// Матеріали міжнародної науково-технічної конференції “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії”-Львів:Видавництво національного університету ”Львівська політехніка”.-2002.-С.116-117.

Здобувачеві належить використання ПІС-контролера для збору та передачі даних з перетворювачів.

39. Мирошников В.В., Стеблевский В.А., Швец С.Н. Цифровые вихретоковые дефектоскопы для контролю цилиндрических изделий.//Збірник матеріалів конференції “Ефективність реалізації наукового, ресурсного та промислового потенціалу в сучасних умовах”.-Київ.-2002.

Здобувачеві належить схема настройки й перевірки працездатності дефектоскопа.

40.Мирошников В.В., Романенко А.В., Швец С.Н.. Матричный феррозондовый преобразователь // Материалы XVI российской научно-технической конференции “Неразрушающий контроль и диагностика”.–Санкт-Петербург.–2002.

Здобувач запропонував при розрахунку функції перетворення ферозонда використовувати лінійну модель ланцюга збудження.

41. Мирошников В.В., Кулягіна Г.Л., Абу Шакра Марван. Прилади магнітного контролю працюючих водневміщуючих конструкцій // VIII науково-практична конференція "Університет і регіон".—Луганськ.—2002.

Здобувач запропонував використовувати матричний ферозондовий перетворювач у якості магніточутливого елемента ферозонд з імпульсним збудженням.

42.Мирошников В.В., Швець С.М. Конструкція магнетного приладу безперервного контролю великогабаритних об'єктів.// 4-а Національна науково-технічна конференція і виставка "Неруйнівний контроль та технічна діагностика-2003".-Київ:УТНКТД-2003.

Запропоновано методику синтезу однорідного магнітного поля з допомогою прямокутних котушок.

43.Мирошников В.В., Швець С.Н. Магнітоферозондовий контроль кінців труб// Друга науково-технічна конференція "Приладобудування 2003:стан і перспективи".-Київ:НТУУ "КПІ"-2003.

Розроблено конструкцію первинного магніточутливого елемента та спосіб його збудження.

АНОТАЦІЇ

Мирошников В.В. Прилади магнітного контролю дефектів, викликаних водневою корозією виробів та конструкцій. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 - прилади і методи контролю та визначення складу речовин. - Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". Харків, 2003.

Дисертацію присвячено актуальним питанням створення теоретичних основ та практичній реалізації нового класу приладів безперервного магнітного контролю діючих техногенно небезпечних об'єктів, які підлягають водневій корозії. Для цих цілей на поверхні об'єкта контролю закріплюється магнітний перетворювач з матрицею магніточутливих елементів. За результатами аналізу полів розсіяння, визначено робочий діапазон магніточутливих елементів - ферозондів. Враховуючи матричний спосіб їх розташування, розраховується розподіл індукції вздовж вісі осереддя з урахуванням довжини навиток ферозонду та взаємного впливу осередь одне на одного. При розрахунку функції перетворення, враховувались внутрішній опір генератора збудження, опір навантаження і групове розташування ферозондів. Проведено аналіз теплового режиму роботи ферозонда та враховано вплив температури на його функцію перетворення. Все це забезпечує створення нового покоління приладів магнітного контролю, які спроможні тривалий час

працювати на поверхні промислових техногенно небезпечних об'єктів, які підлягають водневій корозії.

Ключові слова: неруйнівний контроль, магнітна дефектоскопія, воднева корозія, матричний ферозондовий перетворювач, синтез магнітного поля, імпульсний режим збудження.

Мирошников В.В. Приборы магнитного контроля дефектов, вызванных водородной коррозией изделий и конструкций. - Рукопись

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.13 - приборы и методы контроля и определения состава вещества. - Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт". Харьков, 2003.

Диссертация посвящена актуальным вопросам создания теоретических основ и практической реализации нового класса приборов непрерывного магнитного контроля действующих техногенно опасных объектов, подвергающихся водородной коррозии. В диссертации на основе теоретических и экспериментальных исследований разработан единый подход к решению научно-технической проблемы магнитного контроля дефектов, вызванных водородной коррозией (ВК). Разработанная концепция магнитного контроля стенок химических объектов предполагает установку на внешней стороне стенки объекта контроля стационарного магнитного преобразователя с матрицей магниточувствительных элементов, находящихся в однородном магнитном поле. Для создания однородного магнитного поля используется система из трех прямоугольных катушек, расположенных по периметру преобразователя. Проведенный синтез магнитного поля в объеме, занимаемом магнитным преобразователем, позволил определить число витков и плотность тока в катушках, что обеспечило получение однородного магнитного поля с вектором индукции $B=0,1\text{Тл}$ с погрешностью, не превышающей 6%.

Для определения рабочего диапазона и порога чувствительности магниточувствительного элемента преобразователя исследовались поля рассеяния дефектов, вызванные ВК. Анализ дефектов ВК и динамики их развития позволили заменить ряд мелких, близко расположенных дефектов одним прямоугольным дефектом с усредненной площадью. Расчет поля рассеяния подповерхностного дефекта базируется на решении векторного нелинейного уравнения Фредгольма II-го рода, которое в дальнейшем сводится к системе интегральных уравнений. Для уменьшения порядка системы интегральных уравнений источники поля выносятся на контур намагничивающей области. Предложенные две модели решаются итерационным способом совместно с уравнением магнитного состояния материала стенок ОК. По разработанным моделям были просчитаны поля рассеяния от прямого, наклонного и зубчатого дефекта и сопоставлены с

известными теоретическими и экспериментальными исследованиями. Полученное расхождение не превышает 5-7%, что подтверждает корректность полученных математических моделей поля дефекта.

Используя метод ортогонального композиционного планирования второго порядка для двух факторов (глубины h и раскрытия дефекта $2b$), получены упрощенные математические зависимости, что позволяет использовать их в реальном масштабе времени при расчете поля дефекта в действующем приборе.

По результатам анализа полей рассеяния дефектов, вызванных ВК, в качестве магниточувствительного элемента преобразователя используется линейка феррозондов, позволяющая получить не только величину напряженности магнитного поля, но и его топографию в области контроля.

Чтобы не потерять информацию о полях рассеяния в соответствии с теоремой Котельникова, рассчитывается минимальное расстояние между феррозондами. Проведенный спектрально-частотный анализ нормальной составляющей напряженности поля рассеяния дефекта позволил установить, что это расстояние равняется 12мм. На таком расстоянии наблюдается взаимное влияние полей сердечников феррозонда друг на друга. Для учета этого влияния и корректировки функции преобразования феррозонда проведен численный расчет распределения поля по длине сердечника, выполненного из аморфного металла с учетом расположения обмоток возбуждения и измерительной обмотки. Результаты расчетов показывают, что для феррозондов у которых длина обмотки возбуждения меньше длины сердечника, теряет смысл коэффициент размагничивания. Значения максимальной магнитной проницаемости и индукции насыщения сердечника также мало влияют на распределение поля по его длине. Поэтому при расчете функции преобразования феррозонда необходимо использовать непосредственно значение индукции и ее распределение по длине сердечника.

Матричный характер расположения феррозондов в преобразователе потребовал учета влияния на их функцию преобразования внутреннего сопротивления генератора возбуждения и сопротивления нагрузки. Учет этих влияний позволил дальше развить теорию феррозондовых преобразователей, работающих в слабых магнитных полях (1-3А/м), а также выбрать рациональную длину феррозонда для регистрации полей рассеяния дефектов ВК.

Проведенный тепловой расчет феррозонда обеспечил получение корректирующих функций, позволяющих корректировать функцию преобразования феррозонда при изменении температуры на 80°C. Для обработки выходного сигнала феррозонда разработан и запатентован магнитоизмерительный канал с точкой искусственного нуля, что позволяет отстроиться от таких мешающих факторов, как разбаланс и дрейф выходного сигнала феррозонда.

Вся схема предварительной обработки выходного сигнала феррозондов построена на базе ПС-контроллера, который формирует и генерирует напряжение возбуждения, а также обеспечивает сбор и передачу информационных сигналов феррозондов на базовый компьютер.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, магнитная дефектоскопия, водородная коррозия, матричный феррозондовый преобразователь, синтез магнитного поля, импульсный режим возбуждения.

Miroshnikov V.V. Devices of a magnetic control of defects aroused by hydrogen corrosion of articles and constructions. – Manuscript

The thesis for a doctor's degree achievement in speciality 05.11.13 - devices and methods of control and determination of substances composition. - National Technical university "Kharkov polytechnic institute". Kharkov, 2003.

The thesis is devoted to actual problems of creation of theoretical bases and practical realization of the new class of devices of a continuous magnetic control of technically-genetic dangerous acting objects exposed to hydrogen corrosion. For these purposes the magnetic transducer with a matrix of magnetic-sensitive elements is fixed on the surface of the checking object. According to the results of analysis of extraneous fields, the operating range of magnetic-sensitive elements - ferroprobes is determined.

The allocation of an induction along core axis with allowing for the length of a ferroprobe winding, matrix method of their location and mutual influence of cores on each other is being calculated. The internal resistance of the generator of excitation, resistance of a load and group location of ferroprobes was taken into account while calculating of the transfer function. The analysis of a calorific mode of a ferroprobe has been carried out and the temperature effect on its transfer function has been taken into account. All this ensures the creation of a new generation of magnetic control devices which are capable to operate for a long time on the surface of industrial technically-genetic dangerous objects, exposed to hydrogen corrosion.

Keywords: non-destructive control, magnetic-field testing, hydrogen corrosion, matrix ferroprobe transducer, synthesis of a magnetic field, pulsed operation of excitation.