

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

**Остапущенко Дмитро Леонідович**

**УДК 620.179.14**

**ОПТИМІЗАЦІЯ ОПЕРАЦІЇ НАМАГНІЧУВАННЯ В МАГНІТНІЙ  
ДЕФЕКТОСКОПІ ВИРОБІВ СКЛАДНОЇ ФОРМИ**

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

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

**Харків – 2010**

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі медичної і біологічної фізики, медичної інформатики, біостатистики Луганського державного медичного університету Міністерства охорони здоров'я України, м. Луганськ.

- Науковий керівник доктор технічних наук, професор  
**Гальченко Володимир Якович**,  
Луганський державний медичний університет, завідувач кафедри медичної і біологічної фізики, медичної інформатики, біостатистики.
- Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Сучков Григорій Михайлович**,  
Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, в.о. завідувача кафедри приладів і методів неруйнівного контролю;
- доктор технічних наук, професор  
**Хандецький Володимир Сергійович**,  
Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара, завідувач кафедри електронних обчислювальних машин.

Захист відбудеться “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2010 р. о \_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21, електротехнічний корпус, ауд. № 92.

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

Автореферат розіслано “\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2010 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

С.М. Глоба

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Одним із найпоширеніших методів виявлення дефектів у феромагнітних виробках є магнітна дефектоскопія. Інформацію щодо стану об'єкта контролю в цьому випадку одержують у результаті аналізу конфігурації магнітного поля поблизу його поверхні, що формується під впливом намагнічуючого поля на об'єкт. Ефективність контролю в цілому значною мірою визначається обраною схемою та режимом намагнічування об'єкта. Інтенсивність поля розсіювання дефекту, яке виникає внаслідок того, що дефект перешкоджає проходженню магнітного потоку в об'ємі виробу, який контролюється, істотно залежить від форми, розмірів і орієнтації дефекту щодо силових ліній магнітного поля та його розподілу, просторовий характер якого, у свою чергу, визначається формою об'єкта контролю, магнітними властивостями матеріалу та конфігурацією намагнічуючого поля. Намагнічування може здійснюватися широким спектром пристроїв при різних значеннях їх робочих параметрів, що створюють поля з найрізноманітнішою топографією. Вибір на користь того чи іншого з них у кожному конкретному випадку треба здійснювати виходячи з умов надійного виявлення характерних для даного об'єкта контролю дефектів. У випадку об'єктів контролю складної геометричної форми характер їхніх полів практично неможливо передбачити, а їх дослідження без залучення обчислювальної техніки та спеціальних інформаційних технологій, що дозволяють здійснити чисельний аналіз при різних умовах намагнічування без побудови досить дорогих дослідних зразків магнітних систем і проведення великого обсягу вимірювань, стає практично неможливим.

Усе це обґрунтовує актуальність розв'язку науково-практичної задачі подальшого розвитку магнітного методу неруйнівного контролю за рахунок забезпечення максимальної інтенсивності полів розсіювання дефектів суцільності в об'єктах контролю складної геометричної форми за допомогою оптимізації операції намагнічування шляхом вибору виду, способу та режиму намагнічування.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконана на кафедрі медичної і біологічної фізики, медичної інформатики, біостатистики Луганського державного медичного університету відповідно до НДР Міністерства охорони здоров'я України "Розробка інформаційних моделей оптимізації магнітних систем діагностичної магніторезонансної медичної апаратури" (ДР № 0108U004344), де здобувач є відповідальним виконавцем.

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи полягає в удосконаленні магнітного методу дефектоскопічного контролю об'єктів складної геометричної форми за рахунок забезпечення максимальної інтенсивності полів розсіювання дефектів суцільності у результаті оптимізації операції намагнічування.

Для досягнення поставленої мети вирішено наступні задачі:

- провести аналіз особливостей магнітного методу неруйнівного контролю, виявити основні фактори, що впливають на ефективність його проведення, а також проаналізувати сучасні методи математичного моделювання операції намагнічування і просторових статичних магнітних полів феромагнітних об'єктів у задачах неруйнівного контролю;
- побудувати математичну модель взаємодії намагнічуючого поля з об'єктом контролю довільної геометричної форми з урахуванням можливої наявності де-

фектів різних типів, нелінійності магнітних характеристик матеріалів і реальної конфігурації полів намагнічуючих пристроїв;

- для випадків контролю об'єктів із дефектами обмежених розмірів і довільної форми розробити інформаційне забезпечення, що реалізує математичну модель, а також обчислювальну технологію його використання;
- розробити методику оптимізації операції намагнічування шляхом вибору виду, способу та режиму намагнічування об'єктів контролю складної геометричної форми з метою забезпечення найбільшої інтенсивності полів розсіювання дефектів;
- застосувати методику для оптимального вибору характеристик намагнічуючих пристроїв реальних засобів контролю;
- розробити електричні принципи схеми універсальних програмувальних джерел живлення намагнічуючих пристроїв магнітопорошкових дефектоскопів, які дозволяють забезпечити рекомендовані режими намагнічування при контролі феромагнітних об'єктів складної форми.

*Об'єкт дослідження* – процес контролю виробів складної геометричної форми при магнітній дефектоскопії.

*Предмет дослідження* – операція намагнічування об'єктів складної форми, а також пристрої, що її реалізують.

*Методи досліджень.* Всі теоретичні аспекти дисертаційної роботи ґрунтуються на макроскопічній теорії магнетизму, диференціальному та інтегральному обчисленні, векторному аналізі та теорії поля, теорії інтегральних рівнянь, які використані при побудові математичної моделі взаємодії намагнічуючого поля з об'єктом контролю; чисельних методах і сучасних об'єктно-орієнтованих інформаційних технологіях, які застосовані при розробці інформаційного забезпечення.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у наступному:

- вперше розроблено повнофункціональну інформаційну модель із підвищеними апроксимаційними можливостями й обчислювальну технологію її використання, що дозволяють, на відміну від існуючих, з єдиних методологічних позицій кількісно вирішувати задачі аналізу просторового розподілу полів розсіювання поверхневих і підповерхневих дефектів суцільності довільної форми та обмеженої довжини з урахуванням нелінійних магнітних характеристик матеріалів і реальних умов намагнічування конкретного об'єкта контролю складної форми та кінечних розмірів;
- вперше теоретично проаналізовано поля дефектів типу зміщення кромки для прямошовної електрозварної труби, що дозволило здійснити їхню диференціацію та ідентифікацію;
- вперше проведено дослідження локально-циркулярного намагнічування безперервного круглого прокату з дефектами суцільності та врахуванням нелінійності магнітних властивостей матеріалу, в результаті якого показано, що використання багатополусної магнітної системи, як складової частини приладів контролю прокату в потоці стану, дозволяє отримати поля розсіювання дефектів більшої напруженості у порівнянні з використанням тороїдальної намагнічуючої системи;
- дістав подальший розвиток магнітний метод дефектоскопічного контролю об'єктів складної геометричної форми внаслідок оптимізації операції намагнічування за рахунок вибору виду, способу та режиму намагнічування об'єкта, яка

базується на проведенні серії розрахунків із різними варіантами намагнічування об'єктів контролю з дефектами суцільності, розташованими в найбільш складних для виявлення місцях, та вибору найкращого з варіантів, який забезпечує максимальний рівень напруженості полів розсіювання;

- для чисельного моделювання процесів намагнічування об'єктів полями високої напруженості при контролі способом прикладеного поля розроблено ефективну обчислювальну схему глобально збіжного ітераційного процесу розв'язку систем нелінійних рівнянь з великим числом невідомих, засновану на методі Ньютона та комплексі заходів, що дозволяють розширити область його збіжності.

**Практичне значення одержаних результатів.** Операція намагнічування є невід'ємною складовою при проведенні неруйнівного магнітного контролю, такого як дефектоскопія, коерцитиметрія, структуроскопія, товщинометрія, технічна діагностика об'єктів. В теперішній час для об'єктів контролю простої форми існують рекомендації щодо проведення їх ефективного намагнічування. При здійсненні ж дефектоскопічного контролю виробів складної форми важливе значення має визначення схеми та параметрів операції намагнічування об'єкту, що забезпечують надійне виявлення дефектів суцільності. Запропонований у дисертаційній роботі підхід до оптимізації операції намагнічування надає можливість при його використанні в практиці проектування намагнічуючих пристроїв дефектоскопів та при проведенні контролю, варіюючи умови намагнічування виробу, обґрунтовано здійснити вибір виду, способу та режиму намагнічування.

Розроблено електричні принципові схеми універсальних програмувальних джерел живлення намагнічуючих пристроїв магнітопорошкових дефектоскопів, які дозволяють забезпечити виконання рекомендацій щодо режимів намагнічування феромагнітних об'єктів складної форми. Такі вузли є необхідною складовою багатьох сучасних приладів магнітного контролю.

Результати дисертаційної роботи у вигляді методики вибору виду, способу та режиму намагнічування виробів складної геометричної форми при неруйнівному контролі магнітним методом, а також реалізуючого даний метод програмного забезпечення впроваджено на підприємстві “ХК «Луганськтепловоз»” (м. Луганськ).

Результати досліджень використовувались при проектуванні магнітопорошкового дефектоскопа з комбінованим циркулярним і полюсним намагнічуванням, впровадженого на підприємстві “ХК «Луганськтепловоз»” (м. Луганськ) і призначеного для контролю болтів діаметром 20.5 мм і довжиною 82-168 мм, виготовлених зі сталі 40Х ГОСТ 4543-71, які застосовуються для кріплення деталей у вузлах моторно-редукторних блоків тепловоза 2ТЕ116У, що підтверджується відповідним актом упровадження.

Створене в роботі програмне забезпечення використовується в навчальному процесі Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Луганськ) студентами зі спеціальності “Прикладна фізика” при вивченні курсів “Електрика і магнетизм”, “Чисельні методи в прикладній фізиці”, а також у науково-дослідній роботі студентів (довідка-сертифікат № ПН-37-8-3-09 від 8.07.2009 р.).

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні наукові результати дисертаційної роботи, які винесено на захист, отримано здобувачем особисто, а саме: розроблено математичну модель взаємодії намагнічуючого поля з об'єктом контролю та створено реалізуюче її інформаційне забезпечення; розроблено обчислювальну технологію засто-

сування інформаційного забезпечення у випадку контролю об'єктів складної форми, а також із поверхневими й підповерхневими дефектами суцільності, проведено обчислювальні експерименти; запропоновано оптимізацію операції намагнічування шляхом вибору виду, способу та режиму намагнічування об'єктів контролю й проведено демонстрацію використання цього підходу на конкретних прикладах; запропоновано використання розробленого інформаційного забезпечення у випадку просторової неоднорідності магнітних властивостей матеріалу об'єкта контролю; запропоновано використання розробленої інформаційної моделі для формування навчальних вибірок при вирішенні зворотної задачі дефектоскопії засобами розпізнавання образів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідалися й обговорювалися на: V науково-практичній конференції “Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2007)” (Дніпропетровськ, 2007 р.); науково-практичній конференції “Актуальні проблеми прикладної фізики” (Луганськ, 2007 р.); XII міжнародній виставці та конференції “Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности” (Москва, 2008 р.); XVIII Всеросійській науково-технічній конференції з міжнародною участю “Неразрушающий контроль и техническая диагностика” (Нижній Новгород, 2008 р.); міжнародній конференції “Сварка и родственные технологии – в третье тысячелетие” (Київ, 2008 р.); VII міжнародній науково-технічній конференції “Приладобудування 2008: стан і перспективи” (Київ, НТУУ «КПІ», 2008 р.); XIV міжнародній науково-технічній конференції студентів й аспірантів “Радиоэлектроника, электротехника и энергетика” (Москва, 2008 р.); міжнародній науково-технічній конференції “Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы ИИ-2008” (пос. Кацівелі, АР Крим, 2008 р.); II Всеукраїнській науково-практичній конференції “Актуальні проблеми прикладної фізики” (Кременчук, КДПУ ім. М. Остроградського, 2008 р.); міжнародному симпозиумі “Проблеми вдосконалювання електричних машин й апаратів. Теорія й практика (SIEMA' 2009)” (Харків, 2009 р.); XVIII щорічній міжнародній конференції й виставці “Современные методы неразрушающего контроля и технической диагностики” (Ялта, 2009 р.); III Всеукраїнській науково-практичній конференції “Актуальні проблеми прикладної фізики” (Луганськ, 2009 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 15 друкованих працях, серед яких 7 статей у наукових фахових виданнях ВАК України.

**Структура та об'єм дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, п'ятих розділів, висновків, додатків, списку використаної літератури. Повний обсяг дисертації становить 198 сторінок; 137 сторінок основного тексту; 75 рисунків: 49 на 37 окремих сторінках, 26 по тексту; 14 таблиць: 5 на 2 окремих сторінках, 9 по тексту; 3 додатка на 7 сторінках; 144 використаних літературних джерел на 16 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступній частині** обґрунтовано актуальність теми дисертації, вказано на зв'язок дослідження з науковими держбюджетними темами Міністерства охорони здоров'я України, сформульовано мету та основні задачі роботи, розкрито наукову новизну, теоретичне й практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** проведено аналіз особливостей магнітного методу неруйнівного контролю. Незважаючи на безсумнівну важливість усіх операцій контролю,

найважливіше значення має операція намагнічування. Від вибору виду, способу та режиму намагнічування істотно залежить конфігурація інформаційного магнітного поля в зоні контролю, а також можливість виявлення того або іншого класу дефектів. Удалий вибір схеми намагнічування об'єкта на етапі проектування магнітної системи пристрою неруйнівного контролю визначає ефективність процесу контролю в цілому.

У зв'язку з цим проведено аналіз стану питання щодо моделювання просторової конфігурації полів об'єктів контролю кінечних розмірів, полів розсіювання дефектів обмеженої довжини, полів об'єктів контролю з поверхневими та підповерхневими дефектами. Існуючі аналітичні моделі полів поверхневих і підповерхневих дефектів не дозволяють повною мірою врахувати особливості геометричної форми об'єкта контролю, які впливають як на магнітний стан речовини поблизу дефекту, так і на конфігурацію інформаційного магнітного поля в зоні контролю, а також нелінійності магнітних характеристик матеріалу. Більш складні й важливі для практики випадки вимагають для своєї розв'язки застосування чисельних методів. При розв'язці задач моделювання процесу намагнічування об'єктів контролю кінечних розмірів, включаючи об'єкти з поверхневими й підповерхневими дефектами, перспективним є використання методу просторових інтегральних рівнянь. Однак існуючі на цей час конкретні реалізації даного методу внаслідок обмежених апроксимаційних можливостей орієнтовані на об'єкти контролю простої форми й не дозволяють повною мірою врахувати специфічні особливості задач, що розглядаються. Актуальним є створення математичної моделі та її повнофункціональної програмної реалізації, які дозволяють у рамках єдиного методологічного підходу здійснювати вирішення широкого класу задач моделювання процесу намагнічування феромагнітних об'єктів складної геометричної форми із врахуванням нелінійних магнітних властивостей матеріалів, що є основою для проектування ефективних пристроїв магнітної дефектоскопії.

**У другому розділі** запропоновано підхід до оптимізації операції намагнічування шляхом вибору виду, способу та режиму намагнічування об'єкта контролю складної геометричної форми з метою створення умов найкращого виявлення характерних для нього дефектів суцільності, що потребує проведення розрахунків інформаційного магнітного поля об'єктів із дефектами при різних режимах контролю. Вибір схеми та режиму намагнічування здійснюється за критерієм досягнення максимальної напруженості полів розсіювання. Даний підхід може бути реалізований лише при наявності інформаційного забезпечення, що дозволяє моделювати процес взаємодії статичних намагнічуючих полів з об'єктами контролю, у загальному випадку, довільної форми, кінечних розмірів, із поверхневими або підповерхневими дефектами суцільності обмеженої довжини й довільної геометрії з урахуванням нелінійних властивостей феромагнетиків і неоднорідної конфігурації полів намагнічування. При цьому система "пристрій намагнічування – намагнічуюче поле – об'єкт контролю – інформаційне магнітне поле – засоби реєстрації" розглядається як єдине ціле, однак необхідно враховувати, що інформаційне магнітне поле є основним носієм даних про властивості об'єкта контролю.

Здійснено постановку задачі дослідження процесу намагнічування феромагнітних об'єктів при їх магнітному контролі з урахуванням усіх зазначених особливостей. Побудована математична модель взаємодії намагнічуючих полів з об'єктами контролю з використанням методу просторових інтегральних рівнянь, відповідно до

якого пряма просторова задача магнітостатики зводиться до розв'язки нелінійного інтегрального рівняння виду

$$\vec{H}(Q) = -\frac{1}{4\pi} \text{grad}_Q \iiint_V \vec{M}(P) \cdot \text{grad}_P \frac{1}{r_{PQ}} dV_P + \vec{H}_0(Q), \quad (1)$$

де  $P$  й  $Q$  – відповідно точки витіку й спостереження, що належать феромагнітному об'єкту контролю  $V$ ;  $\vec{r}_{PQ} = \vec{r}_Q - \vec{r}_P$  – вектор, спрямований із точки  $P$  у точку  $Q$ ;  $r_{PQ}$  – модуль вектора  $\vec{r}_{PQ}$ ;  $\vec{H}$  – напруженість магнітного поля;  $\vec{M}$  – намагніченість феромагнетику;  $\vec{H}_0$  – напруженість магнітного поля, створеного намагнічуючим пристроєм у вигляді системи провідників зі струмом, електромагнітів або постійних магнітів, визначено відповідно до математичної моделі для кожного конкретного його типу. Рівняння (1) розв'язується разом із додатковою залежністю, що описує магнітні властивості речовини  $\vec{M} = F(\vec{H})$ . У теорії потенціалу доведено, що рівняння (1) враховує граничні умови, характерні для задач магнітостатики. Без істотних обмежень на форму об'єкта контролю рівняння (1) може бути розв'язано чисельно, при цьому об'єм об'єкта розбивається на елементарні об'єми, у межах яких можна умовно вважати сталими намагніченість і напруженість поля, тоді неперервне рівняння може бути замінено його дискретним аналогом

$$\vec{H}_i = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N \oiint_{\partial V_j} \frac{(\vec{M}_j \cdot \vec{n}_P) \vec{r}_{PQ_j}}{r_{PQ_j}^3} dS_P + \vec{H}_{i0}, \quad i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

де  $\vec{H}_i$  й  $\vec{M}_i$  – напруженості магнітного поля в центрах елементарних об'ємів  $Q_i$  й їх намагніченості, що зв'язані рівнянням магнітної характеристики  $\vec{M}_i = F_i(\vec{H}_i)$ ;  $\vec{H}_{i0}$  – значення величин намагнічуючого поля в точках  $Q_i$ ;  $N$  – число елементарних об'ємів  $V_i$ ;  $\partial V_i$  – їхня границя. Таким чином, задача чисельного аналізу взаємодії поля намагнічування з феромагнітним об'єктом контролю зводяться до спільного розв'язки системи рівнянь виду:

$$\begin{cases} \mathbf{H} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{M} + \mathbf{H}_0; \\ \mathbf{M} = \mathbf{F}(\mathbf{H}), \end{cases} \quad (3)$$

де

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \vec{H}_1 \\ \vec{H}_2 \\ \dots \\ \vec{H}_N \end{pmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{pmatrix} \vec{M}_1 \\ \vec{M}_2 \\ \dots \\ \vec{M}_N \end{pmatrix}, \quad \mathbf{H}_0 = \begin{pmatrix} \vec{H}_{10} \\ \vec{H}_{20} \\ \dots \\ \vec{H}_{N0} \end{pmatrix} \quad \text{і} \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1N} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{N1} & A_{N2} & \dots & A_{NN} \end{pmatrix}$$

відповідно вектор-стовпці напруженості магнітного поля й намагніченості елементарних об'ємів, напруженості намагнічуючого поля в центрах ваги елементарних об'ємів;  $\mathbf{A}$  – матриця, що враховує вплив елементарних об'ємів одне на одного;



$$\mathbf{M} = \mathbf{F}(\mathbf{H}) = (\vec{M}_1, \vec{M}_2, \dots, \vec{M}_N)^T = (F_1(\vec{H}_1), F_2(\vec{H}_2), \dots, F_N(\vec{H}_N))^T$$

– нелінійний оператор, що дозволяє врахувати магнітні властивості речовини.

Після вирішення системи нелінійних рівнянь (3) і знаходження значень  $\vec{M}_i$  поле в довільній точці  $Q$  простору може бути розраховано по формулі

$$\vec{H}(Q) = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^N \oiint_{\partial V_j} \frac{(\vec{M}_j \cdot \vec{n}_P) \vec{r}_{PQ}}{r_{PQ}^3} dS_P + \vec{H}_0(Q).$$

Даний підхід дозволяє з єдиних позицій розглянути моделювання для об'єктів контролю з поверхневими й підповерхневими дефектами, проводити аналіз просторової топографії магнітного поля в обмежених та необмежених, однозв'язних і багатозв'язних розрахункових областях. Для опису нелінійних магнітних характеристик ферромагнітних матеріалів, з яких виготовляються об'єкти контролю, запропоновано використання ряду відомих аналітичних залежностей, вибір конкретної з яких здійснюється з міркувань наявності інформації щодо магнітних властивостей та форм їх представлення. Для випадку ізотропного ферромагнетика виведено формули, які спрощують розрахунок елементів матриці Якобі для нелінійного оператора, що зв'язує намагніченість речовини в точці зі значенням напруженості магнітного поля. Проаналізовано основні особливості побудови математичних моделей намагнічуючих пристроїв, що дозволяють визначати просторовий розподіл їхнього поля. Проведено аналіз існуючих моделей.

**У третьому розділі** реалізовано методику чисельного аналізу інформаційного магнітного поля об'єктів контролю довільної геометричної форми, що намагнічуються різноманітними джерелами, на основі побудованої математичної моделі взаємодії намагнічуючих полів з об'єктами контролю.

Для побудови дискретної геометричної моделі об'єкта контролю, етапи проведення якої показані на рис. 1, запропоновано використання алгоритмів побудови адаптивної сітки дискретних елементів, яка складається з тетраєдрів. Використання адаптивної дискретизації дозволяє більш точно описати форму об'єкта контролю, що особливо важливо у випадку наявності дефектів суцільності, а також знайти компроміс між обчислювальними витратами й необхідною точністю моделювання.

а) геометрична модель                      б) дискретизація поверхні                      в) дискретизація об'єму

Рис 1. Послідовні етапи побудови дискретної геометричної моделі ферромагнітного об'єкта

При складанні системи нелінійних рівнянь (3), що є дискретним аналогом нелінійного інтегрального рівняння (1), на етапі обчислення коефіцієнтів матриці впливу запропоновано використання адаптивних квадратурних алгоритмів, зокрема квадратурного алгоритму, заснованого на формулі Ньютона-Котеса восьмого порядку, що дозволяє значно заощадити час розрахунку.

Для розв'язки системи нелінійних рівнянь (3) використано метод Ньютона, на кожній ітерації якого вирішується система лінійних рівнянь із великим числом невідомих, яке може досягати 75 000. Процес розв'язки організовано за наступною схе-

мою. Для вирішення системи нелінійних рівнянь (3) вводиться до розгляду нелінійний оператор

$$\mathbf{G}(\mathbf{H}) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{F}(\mathbf{H}) - \mathbf{H} + \mathbf{H}_0,$$

з використанням якого система (3) записується у вигляді нелінійного операторного рівняння

$$\mathbf{G}(\mathbf{H}) = \mathbf{0}.$$

Матриця Якобі для оператора  $\mathbf{G}(\mathbf{H})$  має наступний вигляд

$$\mathbf{W} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{J} - \mathbf{E},$$

де  $\mathbf{J}$  – матриця Якобі для  $\mathbf{F}(\mathbf{H})$ ;  $\mathbf{E}$  – одинична матриця. Унаслідок особливостей структури нелінійного оператора  $\mathbf{F}(\mathbf{H})$  матриця  $\mathbf{J}$  складається із блоків розміром  $3 \times 3$ , розташованих по діагоналі, тобто  $\mathbf{J} = \text{diag}(J_1, J_2, \dots, J_N)$ , де  $J_j$  – матриця Якобі для  $F_j(\vec{H})$ .

Ітераційний процес організується за схемою

$$\mathbf{H}_n = \mathbf{H}_{n-1} - \mathbf{h},$$

де  $\mathbf{h}$  – рішення системи лінійних рівнянь

$$\mathbf{W} \cdot \mathbf{h} = \mathbf{G}(\mathbf{H}_{n-1}). \quad (4)$$

Для забезпечення збіжності методу Ньютона в критичних по складності випадках моделювання запропоновано використання методу продовження по параметру й “демпфірування”, які дозволяють побудувати глобально збіжний ітераційний процес.

Для розв’язки системи лінійних рівнянь (4) із великим числом невідомих запропоновано використання спеціальної реалізації методу послідовних виключень Гауса з поблочною обробкою проміжних результатів обчислень.

Проведено ретельну верифікацію програмного забезпечення як у цілому, так і окремих його програмних модулів. Перевірка адекватності результатів розрахунків магнітного поля проводилася на контрольних прикладах, що мають аналітичне рішення, а також у випадках контролю, для яких є експериментальні дані про характер розподілу магнітного поля як над поверхнею об’єкта, так і в його об’ємі. Верифікація програмного забезпечення показала високий рівень надійності отриманих із його допомогою результатів, при яких похибка розрахунків не перевищує 5-9%.

**У четвертому розділі** для задач моделювання процесів намагнічування складних для контролю об’єктів, об’єктів із поверхневими та підповерхневими дефектами в однорідних і неоднорідних полях намагнічуючих пристроїв запропоновано обчислювальну технологію застосування розробленого інформаційного забезпечення. Запропонована технологія дозволяє з єдиних методологічних позицій здійснювати кількісний аналіз інформаційного магнітного поля об’єктів із дефектами різного типу. Прикладом складного для контролю об’єкта є фланцевий виріб, що має отвори та злами поверхні, дискретна геометрична модель і креслення якого наведено на рис. 2. Розподіл магнітного поля поблизу поверхні об’єкта, як видно із графіків на рис. 2, досить точно відображає його геометричні особливості.

а) об'єкт контролю

б) тангенціальна складова інформаційного  
магнітного поляв) нормальна складова інформаційного  
магнітного поля

Рис. 2. Фланцевий виріб у полі накладного соленоїда

Прикладами об'єктів контролю з поверхневими дефектами суцільності є феромагнітна куля з напівсферичною раковиною та пластина з дефектом у вигляді тріщини. Відповідні дискретні геометричні моделі наведено на рис. 3.а та рис. 4.а,б. Результати розрахунку поля над об'єктами контролю представлені на рис. 3.б,в та 4.в-д. У першому випадку змінювався радіус напівсферичного дефекту  $r$ , у другому – відстань від розрахункових точок до поверхні об'єкта контролю.

а) дискретна геометрична  
модель кулі

б) радіальна складова поля

в) аксіальна складова поля

Рис. 3. Сталева куля з напівсферичною раковиною в однорідному полі

Проаналізовано особливості побудови для опису об'єктів адаптивних сіток дискретних елементів у випадку наявності у об'єкта контролю дрібних елементів, таких, як, наприклад, отвори й виступи, а також різних дефектів суцільності.

Проведено обчислювальні експерименти, що демонструють можливості розробленого програмного забезпечення та обчислювальної технології його використання при дослідженні впливу місця розташування й геометричних параметрів дефектів суцільності на конфігурацію інформаційного магнітного поля.

а) загальний вид дискретної моделі

б) фрагмент моделі

в) тангенціальна складова поля

г) нормальна складова поля

д) тангенціальна складова поля  
уздовж дефекту

Рис. 4. Інформаційне магнітне поле поблизу поверхневого дефекту суцільності феромагнітної пластини кінечних розмірів

У п'ятому розділі наведено вирішення задачі вибору виду намагнічування у випадку контролю прямошовних електрозварних труб. Розглядаються варіанти полюсного та циркулярного видів намагнічування. Використану при розрахунках геометричну модель ділянки труби з дефектом типу зміщення кромки наведено на рис. 4, там же показано місце розташування контрольних точок при визначенні конфігурації магнітного поля.

Як приклад, на рис. 5 наведено результати розрахунку поля при намагнічуванні об'єкта контролю поздовжнім пропусканням електричного струму силою  $I = 2000 \text{ A}$ .

Параметри, які характеризують геометричну модель (див. рис. 4), приймали наступні значення: координати точок початку й кінця розбіжності кромки  $b = 25 \text{ мм}$  і  $a = 20 \text{ мм}$  відповідно, величина зміщення  $t = 1 \text{ мм}$ .

Проведені розрахунки показали, що застосування циркулярного намагнічування пропусканням електричного струму для даного виду продукції, незважаючи на відомі технічні труднощі його реалізації, забезпечує найбільшу серед інших розглянутих видів намагнічування інтенсивність полів розсіювання дефектів, таких, як непровар шву й зміщення кромки, та створює найкращі умови для їхнього виявлення.

а) геометрична модель об'єкта контролю

б) параметри моделі й схема розташування контрольних точок

Рис. 4. Геометрична модель труби з дефектом типу зміщення кромки

а) тангенціальна складова поля

б) нормальна складова поля

в) тангенціальна складова поля поблизу дефекту

г) нормальна складова поля поблизу дефекту

Рис. 5. Результат розрахунку магнітного поля труби зі зміщенням кромки при її намагнічуванні поздовжнім пропусканням електричного струму

Розглянуто процес локально-циркулярного намагнічування безперервного круглого прокату з поздовжньо орієнтованими тріщинами. При цьому намагнічування здійснювалось за допомогою тороїдальної і багатополусної магнітних систем, конструкцію яких показано на рис. 6.

а) тороїдальна магнітна система

б) багатополусна магнітна система

Рис. 6. Магнітні системи для створення локально-циркулярного поля

Максимальне значення абсолютних величин напруженості полів розсіювання дефектів при використанні багатополусної магнітної системи залежно від кутів їхнього розташування щодо вертикальної осі магнітної системи й відстані від осі труби засобів реєстрації поля наведено на графіках рис. 7, де тим самим показано, що більш перспективним при магнітному контролі таких об'єктів із погляду надійності виявлення поздовжньо орієнтованих тріщин є використання способу намагнічування, заснованого на застосуванні багатополусної намагнічуючої системи, яка дозволяє забезпечити достатню для впевненої реєстрації напруженість полів розсіювання дефектів даного типу. З наведених результатів видно, що при будь-якому положенні поздовжньо орієнтованої тріщини щодо вертикальної осі магнітної системи у цьому випадку спостерігається достатня для надійної реєстрації інтенсивність полів розсіювання.

а) радіальна складова поля

б) циркулярна складова поля

Рис. 7. Максимальні значення складових напруженості поля дефекту при різних кутах його розташування щодо полюсів магнітної системи

Також проведено дослідження режимів комбінованого намагнічування об'єкта контролю. Дослідження проводилося на прикладі об'єктів контролю у вигляді болтів, що застосовуються для кріплення деталей у вузлах моторно-редукторних блоків тепловоза 2ТЕ116У, при їхньому контролі з використанням упровадженого у 2009 році на підприємстві “ХК «Луганськтепловоз»” дефектоскопа, який забезпечує одночасне циркулярне та полюсне намагнічування об'єкта контролю. Креслення об'єкта контролю та конструкція дефектоскопа показано на рис. 8.а,б. Результат розрахунку поля над поверхнею об'єкта контролю при його полюсному намагнічуванні наведено на графіках рис. 8.в,г. Просторовий розподіл поля над подовжньо орієнтованим дефектом при комбінованому намагнічуванні відображено на рис. 8.д-ж.

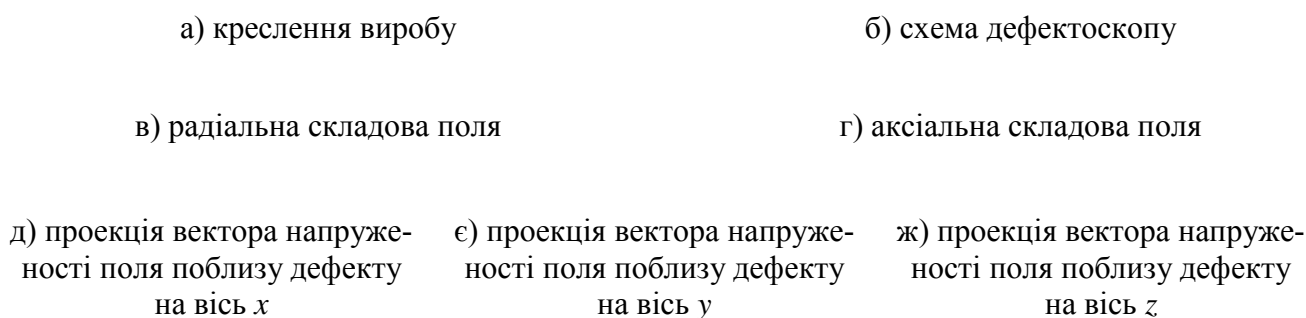


Рис. 8. Контроль болтів, призначених для кріплення у вузлах моторно-редукторного блоку тепловоза 2ТЕ116У

Проведено оцінку електричних характеристик основних елементів намагнічуючих систем дефектоскопів, що виступають як навантаження джерела живлення. Розроблено принципові електричні схеми функціональних вузлів магнітних дефектоскопів, які дозволяють забезпечити ефективне намагнічування складних для контролю феромагнітних об'єктів та допускають одночасне використання декількох намагнічуючих пристроїв із незалежним програмним керуванням напруженістю створюваних ними полів.

Архітектуру інтелектуального джерела живлення для пристроїв полюсного намагнічування при магнітній дефектоскопії зображено на рис. 9. Джерело живлення, що має подібну структуру, дозволяє здійснити незалежну стабілізацію величини напруги або струму в декількох навантаженнях, що підключаються до нього. Імпульсні блоки живлення (ІБЖ 1-ІБЖ n) використовуються як складові елементи джерела живлення в цілому. При цьому задане значення величини, яка стабілізується, забезпечується як комутацією окремих блоків, що допускають паралельне й послідовне включення, відповідно до необхідної для цього топології, так і механізмами стабілізації вихідних параметрів самих блоків.

При контролі виробів складної геометричної форми важливість забезпечення можливості одночасного використання декількох пристроїв, що намагнічують, з незалежним регулюванням інтенсивності створюваних ними полів обумовлюється тим, що використання одного джерела поля в цьому випадку, як правило, не дозволяє надійно виявляти по-різному орієнтовані дефекти. Застосовуючи декілька джерел і плавно регулюючи співвідношення створюваних ними полів, можна керувати напрям-

ком проходження магнітних силових ліній усередині виробу, а отже, забезпечити умови для виявлення дефектів із довільною орієнтацією.

Рис. 9. Структурна схема інтелектуального джерела живлення

Розроблений у дисертаційній роботі підхід до оптимізації операції намагнічування шляхом вибору виду, способу та режиму намагнічування, є основою для проектування нових, більш досконалих технічних засобів виявлення дефектів в об'єктах контролю складної форми у сполученні зі гнучкими засобами створення намагнічуючих полів.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу подальшого розвитку магнітного методу неруйнівного контролю за рахунок забезпечення максимальної інтенсивності полів розсіювання дефектів суцільності в об'єктах контролю складної геометричної форми за допомогою оптимізації операції намагнічування шляхом вибору виду, способу та режиму намагнічування.

Основні результати наукового дослідження полягають у наступному:

1. На підставі аналізу особливостей магнітного методу неруйнівного контролю виявлено основні фактори, що впливають на ефективність виявлення дефектів, серед яких основними є вид, спосіб та режим намагнічування об'єктів контролю. Також проведено аналіз сучасних методів теоретичного дослідження просторових статичних полів у задачах неруйнівного магнітного контролю, що показав перспективність використання в цих задачах методів, заснованих на просторових інтегральних рівняннях.

2. З використанням методу просторових інтегральних рівнянь побудовано математичну модель взаємодії полів намагнічуючих пристроїв із феромагнітними об'єктами, що дозволяє врахувати всі основні фактори, які впливають на процес формування інформаційного магнітного поля в зоні контролю. До таких факторів відносяться: форма й розміри як об'єкта контролю, так і дефекту суцільності, нелінійність магнітних характеристик матеріалів, просторова конфігурація намагнічуючого поля. Запропонована модель у рамках єдиного методологічного підходу дозволяє здійснювати розв'язку задач моделювання як для об'єктів з поверхневими й підповерхневими, так і внутрішніми дефектами суцільності.

3. Розроблено інформаційне забезпечення з підвищеними апроксимаційними можливостями та обчислювальну технологію моделювання операції намагнічування при неруйнівному контролі магнітним методом, що, на відміну від відомих, допускає довільні форму й розміри виробу та дефектів, а також не накладає істотних обмежень на просторову структуру намагнічуючого поля. До складу програмного комплексу включено бібліотеку моделей джерел намагнічування, що забезпечує широкий діапазон варіювання конструкції магнітної системи й режиму її роботи. Верифікація показала, що погрішність розрахунку поля не перевищує усередині об'єкта контролю 9%, а навколо нього – 5%, що цілком задовольняє вимогам щодо інженерних розрахунків.

4. Запропоновано оптимізацію операції намагнічування шляхом вибору виду, способу, а також режиму намагнічування об'єктів контролю складної геометричної форми з метою забезпечення сприятливих умов для більш надійного виявлення дефектів суціль-

ності. Оптимізація базується на проведенні серії модельних розрахунків із різними умовами намагнічування об'єктів контролю з дефектами суцільності, розташованими в найбільш складних для виявлення місцях. При цьому форма й розміри модельних дефектів вибираються таким чином, щоб вони значною мірою відповідали характерним для даного виробу реальним дефектам і перебували на межі необхідної чутливості. За результатами аналізу перевага віддається режиму контролю, що забезпечує максимальний рівень напруженості полів розсіювання.

5. Запропоновану методику застосовано для оптимального вибору характеристик намагнічуючих пристроїв засобів контролю, а саме: пристроїв контролю прямошовних електрозварних труб, при цьому отримано збільшення інтенсивності полів розсіювання дефектів зварного шва в 10 разів у порівнянні з альтернативними варіантами; пристроїв контролю безперервних циліндричних об'єктів у потоці стану, при цьому вдалося досягти напруженості полів розсіювання дефектів 1500-3000 А/м по всьому периметру; пристроїв магнітопорошкового контролю кріпильних деталей вузлів моторно-редукторних блоків тепловозів, при цьому напруженість поля розсіювання дефектів склала 4000 А/м.

6. Розроблено електричні принципові схеми універсальних інтелектуальних програмувальних джерел живлення намагнічуючих пристроїв магнітопорошкових дефектоскопів, що дозволяють забезпечити ефективне намагнічування складних для контролю ферромагнітних об'єктів струмами до 20 А.

7. Результати дисертаційної роботи впроваджено на підприємстві "ХК «Луганськтепловоз»" у вигляді методики вибору виду, способу та режиму намагнічування виробів складної геометричної форми при їхньому неруйнівному контролі магнітним методом, а також реалізуючого її програмного забезпечення. Результати досліджень використовувались при проектуванні магнітопорошкового дефектоскопа з комбінованим циркулярним і полюсним намагнічуванням, призначеного для контролю болтів, що застосовуються для кріплення деталей у вузлах моторно-редукторних блоків тепловоза 2ТЕ116У. Дефектоскоп впроваджено на підприємстві "ХК «Луганськтепловоз»". У вигляді програмного забезпечення результати роботи використовуються у навчальному процесі кафедри прикладної фізики в Східноукраїнському національному університеті ім. В. Даля.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Остапущенко Д.Л. Моделирование процесса магнитного контроля ферромагнитных объектов с учетом нелинейных свойств веществ и неоднородного характера намагничивающих полей / В.Я. Гальченко, Д.Л. Остапущенко // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. – 2008. – №5(52) Ч. 1. – С. 36-41.

*Здобувачем проведено узагальнення та аналіз особливостей використання обчислювальної технології застосування розробленого в дисертації інформаційного забезпечення в задачах магнітного дефектоскопічного контролю.*

2. Остапущенко Д.Л. Численный анализ пространственной конфигурации магнитных полей объектов сложной геометрической формы с учетом нелинейных характеристик веществ / В.Я. Гальченко, Д.Л. Остапущенко // Информационные технологии. – М.: Новые технологии. – 2008. – №8. – С. 43-49.

*Здобувачем побудована математична модель взаємодії намагнічуючого поля з об'єктом контролю та розроблене реалізуюче її інформаційне забезпечення.*

3. Остапущенко Д.Л. Математическое моделирование процессов намагничивания ферромагнитных объектов контроля с произвольной геометрией в полях заданной пространственной конфигурации / В.Я. Гальченко, Д.Л. Остапущенко, М.А. Воробьев // Дефектоскопия. – Екатеринбург. – 2008. – №9. – С. 3-18.

*Здобувачем розроблена обчислювальна технологія застосування розробленого інформаційного забезпечення у випадку контролю об'єктів складної форми, а також проведені обчислювальні експерименти.*

4. Остапущенко Д.Л. Компьютерный анализ конфигурации магнитных полей поверхностных дефектов сплошности конечных размеров в ферромагнитной пластине ограниченной протяженности методом пространственных интегральных уравнений / В.Я. Гальченко, Д.Л. Остапущенко, М.А. Воробьев // Дефектоскопия. – Екатеринбург. – 2009. – №3. – С. 56-66.

*Здобувачем розроблена обчислювальна технологія застосування розробленого інформаційного забезпечення у випадку контролю об'єктів складної форми з поверхневими дефектами суцільності, проведені відповідні обчислювальні експерименти.*

5. Остапущенко Д.Л. Компьютерный анализ конфигурации магнитных полей подповерхностных дефектов сплошности конечных размеров и произвольной формы в объектах контроля ограниченной протяженности методом пространственных интегральных уравнений / В.Я. Гальченко, Д.Л. Остапущенко, М.А. Воробьев // Дефектоскопия. – Екатеринбург. – 2009. – №5. – С. 60-71.

*Здобувачем розроблена обчислювальна технологія застосування розробленого інформаційного забезпечення у випадку контролю об'єктів складної форми з підповерхневими дефектами суцільності, проведені обчислювальні експерименти.*

6. Остапущенко Д.Л. Численное моделирование операций циркулярного и полюсного намагничивания прямошовных электросварных труб при их магнитной дефектоскопии / В.Я. Гальченко, Д.Л. Остапущенко, М.А. Воробьев // Контроль. Диагностика. – М.: Машиностроение – 2009. – №11. – С. 18-27.

*Здобувачем запропоновано оптимізацію операції намагнічування шляхом вибору виду, способу та режиму намагнічування об'єктів контролю і проведена демонстрація використання цього методу на прикладі контролю прямошовних електросварних труб.*

7. Остапущенко Д.Л. Исследование процесса локально-циркулярного намагничивания непрерывных цилиндрических объектов тороидальной катушкой при их магнитном контроле / В.Я. Гальченко, Д.Л. Остапущенко, М.А. Воробьев // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – №14. – С. 27-33.

*Здобувачем проведена демонстрація використання розробленого підходу на прикладі контролю неперервного круглого прокату в потоці стану.*

8. Остапущенко Д.Л. Разработка математического и программного обеспечения системы автоматической классификации дефектов при магнитном контроле / В.Я. Гальченко, Д.Л. Остапущенко // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS – 2007): Тез. доп. п'ятої міжнародної науково-практичної конференції. – Дніпропетровськ, 2007. – С. 37-38.



*Здобувачем запропоноване використання розробленої інформаційної моделі для формування навчальних вибірок при рішенні зворотної задачі дефектоскопії засобами розпізнавання образів.*

9. Остапущенко Д.Л. Моделирование процесса неразрушающего контроля сварных соединений магнитным методом / В.Я. Гальченко, Д.Л. Остапущенко // Сварка и родственные технологии – в третье тысячелетие: Тез. стендовых докл. и программа международной конференции. – К.: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. – 2008. – С. 187.

*Здобувачем запропоновано використання розробленого інформаційного забезпечення у випадку просторової неоднорідності магнітних властивостей матеріалу об'єкта контролю.*

10. Остапущенко Д.Л. Об особенностях численного решения задач магнитного контроля объектов сложной геометрической формы / Д.Л. Остапущенко // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: Тез. докл. 7-й Международной конференции. – М.: Машиностроение, 2008. – С. 146-147.

11. Остапущенко Д.Л. Численное моделирование полей рассеяния дефектов в магнитном методе неразрушающего контроля / В.Я. Гальченко, Д.Л. Остапущенко // Неразрушающий контроль и техническая диагностика: Тез. докл. 18-й Всероссийской конференции с международным участием. – Нижний Новгород. – М.: Машиностроение, 2008. – С. 154-155.

*Здобувачем проаналізовано особливості чисельного аналізу статичних магнітних полів об'єктів складної геометричної форми з дефектами суцільності.*

12. Остапущенко Д.Л. Решение систем линейных алгебраических уравнений с плотно заполненными матрицами большого порядка прямым методом / Д.Л. Остапущенко // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. четырнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов в 3-х томах. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – Т. 1. – С. 280-281.

13. Остапущенко Д.Л. О некоторых особенностях обучения систем автоматической классификации дефектов при магнитном контроле / В.Я. Гальченко, Д.Л. Остапущенко // Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы ИИ-2008: Материалы IX Международной научно-технической конференции в 2-х томах. – Донецк: ИПИИ «Наука і освіта». – 2008. – Т.2. – С. 102-104.

*Здобувачем проаналізовано особливості використання розробленої інформаційної моделі для формування навчальних вибірок при рішенні зворотної задачі дефектоскопії засобами розпізнавання образів.*

14. Остапущенко Д.Л. Выбор эффективных режимов намагничивания при контроле деталей магнитным методом / В.Я. Гальченко, Д.Л. Остапущенко // Приладобудування 2008: стан і перспективи: Тез. доп. 7-й міжнародної науково-технічної конференції. – К.: ПБФ, НТУУ «КПІ». – 2008. – С. 265.

15. Остапущенко Д.Л. Выбор способа локально-циркулярного намагничивания круглого проката в магнитной дефектоскопии / Д.Л. Остапущенко, В.Я. Гальченко // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материалы 17-й международной конференции. – Ялта, 2009. – С. 101-102.

*Здобувачем обґрунтована необхідність використання розробленого методу при виборі режимів намагнічування виробів складної геометричної форми при їх дефектоскопічному контролі.*

## АНОТАЦІЇ

**Остапущенко Дмитро Леонідович. Оптимізація операції намагнічування в магнітній дефектоскопії виробів складної форми.** – Рукопис.

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, 2010.

Дисертаційну роботу присвячено оптимізації операції намагнічування ферромагнітних об’єктів контролю складної геометричної форми при магнітній дефектоскопії. Запропоновано підхід к вибору виду, способу та режиму намагнічування виробів, керуючись вимогами забезпечення найбільшої напруженості полів розсіювання дефектів суцільності. Основу методики становить інформаційне забезпечення, що включає в себе бібліотеку моделей джерел магнітного поля та дозволяє проводити розрахунок просторової конфігурації полів виробів з дефектами при різних режимах контролю, а також аналізувати їхні поля розсіювання. При розрахунку враховується довільна форма об’єкта контролю й дефекту суцільності, їхня обмежена довжина, нелінійні магнітні характеристики матеріалу, а також неоднорідна, в загальному випадку, просторова конфігурація намагнічуючих полів.

**Ключові слова:** магнітна дефектоскопія, ферромагнітний об’єкт контролю складної геометрії, дефект суцільності довільної форми, операція намагнічування, схема та режим намагнічування, інформаційне магнітне поле.

**Остапущенко Дмитрий Леонидович. Оптимизация операции намагничивания в магнитной дефектоскопии изделий сложной формы.** – Рукопись.

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, 2010.

Диссертационная работа посвящена оптимизации операции намагничивания ферромагнитных объектов контроля сложной геометрической формы при магнитной дефектоскопии. Конфигурация информационного магнитного поля в зоне контроля, выступающая первичным носителем информации о состоянии объекта контроля, существенно зависит от вида, способа и режима намагничивания, а также от геометрической формы самого объекта. Выявляемость дефектов сплошности того или иного вида также, в свою очередь, определяется условиями намагничивания. Изначально, еще на этапе проектирования намагничивающего устройства дефектоскопа, предназначенного для конкретного изделия, важно осуществить выбор его конструкции и рабочих параметров таким образом, чтобы обеспечить условия для наилучшей выявляемости характерных дефектов, что определяется интенсивностью их полей рассеивания. В работе предложен подход к оптимизации операции намагничивания путем выбора вида, способа и режима намагничивания изделий, руководствуясь критерием обеспечения наибольшей напряженности полей рассеивания дефектов сплошности. Предложенный подход предполагает проведение компьютерного анализа конфигурации магнитных полей объектов с характерными дефектами сплошности при различных альтернативных вариантах конструкции намагничивающего устройства и режимов намагничивания. Модельные дефекты должны выбираться таким образом, чтобы

они по форме и размерам в максимальной степени соответствовали реальным дефектам, характерным для контролируемого объекта. Дефект должен располагаться в сложном или критичном для выявления месте и отвечать требуемому уровню чувствительности. В рамках предложенного подхода ключевую позицию занимает численный анализ конфигурации магнитного поля. Подход предполагает реализацию достаточно адекватной математической модели, учитывающей влияние большинства значимых факторов, определяющих эффективность проведения контроля. Поэтому с использованием метода пространственных интегральных уравнений построена математическая модель взаимодействия намагничивающего поля с контролируемым объектом. При расчете учитывается форма объекта контроля, ограниченная протяженность дефектов сплошности, нелинейные магнитные характеристики материала, пространственная конфигурация намагничивающих полей. Модель реализована в виде полнофункционального информационного обеспечения, позволяющего проводить расчет пространственной конфигурации полей изделий с дефектами при различных режимах контроля, а также анализировать их поля рассеяния. Пространственные интегральные уравнения решаются численно. При численном решении пространственных интегральных уравнений используются адаптивные сети дискретных элементов, состоящие из тетраэдров, что позволяет рассматривать задачи моделирования операции намагничивания без существенных ограничений на форму объектов контроля. При этом решение интегрального уравнения сводится к системе нелинейных уравнений с конечным множеством неизвестных. Для решения систем нелинейных уравнений, размерность которых для большинства практически важных задач достигает 75 000, в работе использован метод Ньютона и комплекс мероприятий по обеспечению его глобальной сходимости. На каждом шаге итерационного процесса решается система линейных алгебраических уравнений такой же размерности. Поскольку матрица системы, в силу большого размера, не может быть целиком размещена в оперативной памяти компьютера, для ее решения используется специальная реализация метода последовательного исключения Гаусса с поблочной обработкой коэффициентов и размещением результатов промежуточных вычислений на внешнем носителе. Проведена тщательная верификация программного обеспечения как на задачах, имеющих аналитическое решение, так и на экспериментальных данных. Разработана вычислительная технология применения данного информационного обеспечения к задачам анализа поля изделий с дефектами сплошности. Проведен анализ особенностей построения дискретных геометрических моделей объектов в таких задачах. Предлагаемый метод применен для выбора вида намагничивания прямошовных электросварных труб, при этом впервые проведен теоретический анализ конфигурации поля рассеяния дефекта в виде смещения кромок; также впервые теоретически исследованы способы локально-циркулярного намагничивания непрерывного круглого проката в потоке стана и режимы комбинированного намагничивания изделий с поперечными и продольными трещинами. Разработаны электрические принципиальные схемы универсальных программируемых источников питания для намагничивающих устройств магнитопорошковых дефектоскопов, с помощью которых можно обеспечить выработанные в результате применения предложенного подхода рекомендации по намагничиванию.

**Ключевые слова:** магнитная дефектоскопия, ферромагнитный объект контроля сложной геометрии, дефект сплошности произвольной формы, операция намагничивания, схема и режим намагничивания, информационное магнитное поле.

**Ostapuschenko D.L. Magnetization operation optimization in magnetic nondestructive testing of complex shaped products.** – Manuscript.

Thesis for Scientific Degree of Candidate of Science (Engineering) by specialty 05.11.13 – equipment and methods of testing and substances composition determination. – National Technical University “Kharkov Polytechnic Institute”, –Kharkov, 2010.

The thesis covers the magnetization operation optimization in magnetic nondestructive testing of ferromagnetic objects of complex geometrical shape. The method of an optimal choosing of scheme and mode of products magnetization following the requirements of providing with the largest strength of discontinuity flaws magnetic fields is offered. The method is based on the software for simulation and analysis of 3D configuration of magnetic fields of products with flaws under different modes of testing. The software contains the library of magnetic field sources models. Arbitrary shapes of tested object and flaw, their finite dimensions, nonlinear magnetic properties of the object material, nonuniform spaces configuration of magnetization field are taken into account during simulation.

**Key words:** magnetic nondestructive testing, ferromagnetic object of complex geometrical shape, arbitrarily shaped discontinuity flaw, magnetization operation, scheme and mode of magnetization, information magnetic field.