

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Нгуєн Ба Тай

УДК 620.179.14

**УСТАНОВКА ДЛЯ КОРЕКТНОГО КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ
І ХАРАКТЕРИСТИК РОЗІМКНЕНИХ ЗРАЗКІВ І ВИРОБІВ**

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2001

Дисертація є рукопис

Робота виконана в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

- Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Себко Вадим Пантелійович,
Національний технічний університет "ХПІ",
завідувач кафедри приладів та методів
неруйнівного контролю.
- Офіційні опоненти: доктор технічних наук
Ігуменцев Євген Олександрович,
Інженерно-технічний центр "Діагностика",
Державного комітету України по нагляду за
охороною праці, м. Харків, заступник директора.
- кандидат технічних наук,
Москаленко Ігор Іванович,
Харківський державний центр стандартизації,
метрології та сертифікації, м. Харків, директор.
- Провідна установа: Харківський державний технічний університет
радіоелектроніки, кафедра "Електронні обчислювальні
машини" Міністерства освіти і науки України,
м. Харків

Захист відбудеться " 27 " вересня 2001 р. о 14³⁰ годині 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 " 1 " серпня 2001 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

Горкунов Б.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останнім часом особлива увага приділяється розвитку методів і засобів для контролю магнітних параметрів і характеристик замкнених і розімкнутих виробів і зразків, оскільки останні є основними елементами і вузлами енергетичного устаткування. Становить практичний інтерес дослідження параметрів виробів у постійних магнітних полях, тому що в цьому випадку магнітне поле цілком промагнічує виріб, що дозволяє одержувати якісні магнітні параметри і характеристики об'єктів дослідження. Розімкнуті феромагнітні і слабоферомагнітні вироби (прутки, труби, дроти, заготовки) складають великий обсяг продукції, що випускається промисловістю у технічно розвнених країнах. Тому магнітний контроль параметрів таких виробів, має основний недолік, пов'язаний з тим, що для створення досить однорідного поля виникають вимоги, які полягають в необхідності використання досить довгої катушки. У той же час з метою зменшення фактора, що розмагнічує, потрібно мати досить довгі зразки. Що стосується вибору джерела магнітного поля, то в цьому плані найбільше задовольняє зазначеній вимозі однорідності поля катушки Гельмгольца КГ, що представляють собою дві катушки з відстанню між ними, рівному їх радіусам. Такі катушки створюють однорідне магнітне поле невеликої довжини уздовж їхньої подовжньої осі. Крім того, важливими достоїнствами КГ є відкритість виробу, що дає можливість вільного доступу до нього, тобто можливість розміщення усередині КГ різних датчиків для дослідження фізико – механічних параметрів (міцність, твердість, температура, хімічний склад і ін.) матеріалів різноманітного асортименту.

Однак, навіть при використанні КГ виникає важливе для практики питання, яке полягає в співвідношенні довжини виробу (чи зразка) і довжини магнітного поля КГ (або відстанню між катушками Гельмгольца). Ще не менш важлива задача з'являється при магнітному контролі розімкнутого зразка кінцевих розмірів, тобто як можна відновити за результатами вимірів магнітних параметрів і характеристик у неоднорідному магнітному полі КГ квазіоднорідні (дійсні) криві магнітної індукції, намагніченості, петель гістерезиса і зв'язаних з ними втрати потужності, коерцитивну силу та ін. Рішення таких задач дає можливість використовувати для магнітного контролю КГ із раціональними розмірами, що дозволяє контролювати параметри виробів, які розміщуються не тільки в ділянках однорідного, але і неоднорідного магнітного поля в КГ.

Усе відзначене вище приводить до важливого висновку про те, що задачі відновлення квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик, а також вибір раціональних (критичних) розмірів виробу і джерела магнітного поля є актуальними і своєчасними.

Таким чином, дисертаційна робота присвячена важливій темі – створенню установки для коректного магнітного контролю параметрів і характеристик феромагнітних і слабоферомагнітних матеріалів, виробів і зразків у магнітному полі котушок Гельмгольца.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалася відповідно до проекту, що пройшли за конкурсом Міністерства освіти і науки України (шифр 48/16), Наказ Міністерства освіти і науки України №37 від 13.02.1997 р. (термін до 1999 р.), шифр цієї теми у НТУ “ХП” М5203 (Наказ №377 – II від 17.04.1997 р.).

В даний час робота проводиться відповідно до двох держбюджетних тем М5204 і М5205 НТУ “ХП”, що включені в тематичні плани Міністерства освіти і науки України.

Мета і задачі дослідження – це розробка і дослідження установки для одержання квазіоднорідних магнітних характеристик циліндричних зразків і виробів за результатами їхнього магнітного контролю в неоднорідному полі котушок Гельмгольца. Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- одержати співвідношення для розрахунку неоднорідного розподілу напруженості слабкого магнітного поля і магнітної індукції уздовж подовжньої осі зразка, розміщеного в котушках Гельмгольца;

- на підставі отриманих співвідношень визначити квазіоднорідну криву магнітної індукції феромагнітних зразків і виробів на всіх ділянках кривої намагнічування, що знімається на постійному струмі;

- вибрати критичні довжини зразка (виробу) і критичні радіуси котушок Гельмгольца;

- розрахувати дійсну (квазіоднорідну) криву намагніченості слабомагнітних зразків і виробів у широкому діапазоні зміни напруженості магнітного поля;

- на основі використання котушок Гельмгольца розробити лабораторні установки для відновлення квазіоднорідних (дійсних) магнітних параметрів і характеристик розімкнених (прямолінійних) феромагнітних і слабоферомагнітних прямолінійних виробів і зразків;

- одержати результати відновлення квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик циліндричних феро – і слабоферомагнітних виробів і зразків у магнітному полі постійного струму;

- розробити методику відновлення дійсних магнітних характеристик і параметрів матеріалів феро– і слабоферомагнітних зразків з урахуванням розмагнічувального фактора, і на основі цієї методики одержати дані експериментів;

- оцінити апаратні похибки визначення магнітної індукції, намагніченості і напруженості магнітного поля при контролі феро– і слабоферомагнітних виробів і зразків;

- розробити функціональну схему автоматизованої установки для магнітних контролю і відновлення квазіоднорідних параметрів і характеристик розімкнутих виробів (зразків) і матеріалів.

Об'єкт дослідження – це процес одержання квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик за результатами магнітного контролю розімкнутих виробів і зразків у неоднорідних магнітних полях, а також вибору раціональних розмірів виробів і джерела магнітного поля.

Предмет дослідження – створення автоматизованої установки для коректного контролю магнітних параметрів і характеристик розімкнутих виробів і зразків у магнітному полі котушок Гельмгольца.

Методи досліджень базуються на використанні теорії магнітного поля, закону Біо-Савара, теорії електричних і магнітних ланцюгів, диференціального й інтегрального числень, теорії рядів, теорії похибок вимірів, магнетизму, мікропроцесорної техніки, теорії автоматичного керування.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що

- отримані вирази для визначення методичних похибок, обумовлених неоднорідністю магнітного поля вздовж подовжньої осі КГ і нелінійністю кривої магнітної індукції і намагніченості феромагнітних і слабоферомагнітних зразків;

- на основі співвідношень для визначення методичних похибок розроблена методика відновлення дійсних (квазіоднорідних) значень магнітних індукцій, кривої намагнічування і намагніченості за результатами магнітного контролю параметрів феро – і слабоферомагнітних зразків і виробів у неоднорідних постійному у часі магнітних полях;

- створена методика відновлення квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик матеріалів, з яких виготовлені феро – і слабоферомагнітні зразки;

- на основі завданої припустимої методичної похибки отримані формули для розрахунку критичної довжини виробу і критичного радіуса КГ;

- визначені параметри установок для коректного магнітного контролю квазіоднорідних магнітних характеристик розімкнених феро – і слабомагнітних зразків, виробів і матеріалів у постійному магнітному полі КГ;

- проведено аналіз апаратурних похибок виміру магнітних параметрів, тобто магнітних індукцій, намагніченостей і напруженості магнітного поля в широкому діапазоні його зміни, а також оцінені похибки визначення самих кривих індукції і намагніченості в цілому; визначено шляхи зменшення апаратурних похибок виміру.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає в тому, що на основі знайдених співвідношень і значень припустимих методичних похибок визначено критичні

довжини зразків і радіусів КГ, створені методики відновлення квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик, виробів, зразків і матеріалів (феро – і слабоферромагнітних), а також методики розрахунків елементів і вузлів магнітометричних установок. Все це дозволяє проектувати прилади й автоматизовані системи для магнітного контролю магнітних параметрів і характеристик виробів, зразків і матеріалів визначати метрологічні характеристики цих приладів і систем (діапазони зміни магнітних параметрів, похибки виміру магнітних параметрів виробів у широких межах зміни напруженості поля, чутливість установки до зазначених параметрів), а також проводити обробку багаторазових вимірів.

Результати дисертації (методики відновлення квазіоднорідних характеристик феро – і слабоферромагнітних циліндричних виробів і реалізуючі ці методики установки, основні співвідношення, вибір критичних параметрів виробів і джерел поля, аналіз методичних і апаратурних похибок виміру магнітних характеристик виробів) відкривають широкі можливості для коректного визначення інших магнітних і фізико – механічних параметрів, таких як втрати потужності на гістерезис, коерцитивну силу, різні види магнітних проникностей і зв'язаними з ними міцністю, твердістю, температурою і наявністю домінуючого домішку у виробі.

Розробки даної дисертації були впроваджені в навчальному процесі на кафедрі “Прилади і методи неруйнівного контролю” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” у курсах лекцій “Магнітні методи неруйнівного контролю”, “Електромагнітні види неруйнівного контролю”, “Методи контролю магнітних полів”, “Фізичні основи неруйнівного контролю”.

Особистий внесок здобувача полягає у наступному:

- на основі отриманих співвідношень для неоднорідного розподілу напруженості магнітного поля катушок Гельмгольца з контролюючим виробом визначено квазіоднорідну криву індукцію ферромагнітних зразків і виробів на всіх ділянках кривої намагнічування;
- розроблено методику відновлення дійсних магнітних характеристик і параметрів матеріалів феро – і слабоферромагнітних зразків з урахуванням розмагнічувального фактора і на основі цієї методики одержати дані експериментів;
- знайдено вирази для оцінки апаратурних похибок визначення магнітної індукції, намагніченості і напруженості магнітного поля при контролі феро – і слабоферромагнітних виробів і зразків;
- розроблена функціональна схема автоматизованої установки для магнітного контролю і відновлення квазіоднорідних параметрів і характеристик розімкнених виробів і матеріалів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися на:

- Міжнародній науково – технічній конференції “Силова електроніка і енергоефективність”, Алушта, Крим, 1999 р.

- Міжнародній науково – технічній конференції “Силова електроніка і енергоефективність”, Алушта, Крим, 2000 р.

Публікації: основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 6 друкованих наукових працях, з них 4 статті в наукових журналах і 2 матеріали в працях Міжнародних науково – технічних конференціях.

Структура і об’єм дисертації: Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновку та списку літератури. Повний обсяг дисертації складає 168 сторінок: список літератури містить 88 найменувань (9 стор.), 19 ілюстрацій (21 стор.), 8 таблиць (8 стор.).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині зазначена актуальність теми дослідження, показано зв’язок роботи з науковими темами, вказана мета роботи та сформульовані основні задачі дисертації, відмічена наукова новизна та її практичне значення, розглянуто особистий внесок автора у друкованих працях із співавторами, наведена апробація та структура дисертації.

У **першому розділі** проаналізовано відомі методи та пристрої для визначення магнітних параметрів і характеристик магнітом’яких матеріалів, зразків і виробів в постійних і змінних магнітних полях. Оскільки у пристроях енергетичного обладнання, а також у різних конструкціях виробів магнітопроводи в основному використовуються як розімкнені різними перерезами, то має особливе значення для практики розглядати зразки і вироби такого типу.

На основі аналізу існуючих магнітометричних методів, пристроїв, зразків і джерел магнітного поля з’ясовано у цьому розділі необхідність дослідження питань відновлення квазіоднорідних характеристик розімкнених феромагнітних виробів і зразків, розміщених у магнітному полі, створеному котушками Гельмгольца.

У **другому розділі** розглянуто метод визначення квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик розімкнених феро- і слабомагнітних зразків з урахуванням неоднорідності магнітного поля вздовж осі котушок Гельмгольца (КГ). На основі закону Біо-Савара Лапласа було знайдено співвідношення для розподілу сумарної магнітної індукції B_{Σ} повздовж осі котушок Гельмгольца у вигляді

$$B_{\Sigma} = \frac{4 \cdot \mu_0 \cdot I}{5\sqrt{5} \cdot a} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{1 + z_1^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 + z_2^2}} \right], \quad (1)$$

де

$$z_1 = \frac{4}{5} \cdot \frac{x}{a} + \frac{4}{5} \cdot \frac{x^2}{a^2}; \quad z_2 = \frac{4}{5} \cdot \frac{x}{a} - \frac{4}{5} \cdot \frac{x^2}{a^2} \quad (2)$$

μ_0 - магнітна константа, I – струм у котушках Гельмгольца, W - число витків КГ, a – середній радіус КГ, x – поточна координата.

Після спрощення виразу (1) з урахуванням (2) у вигляді степеневого ряду при умові того, що $z_1 < 1$ і $z_2 < 1$, а також обмежившись членами ряду порядку x^4 , одержимо вираз для визначення B_Σ у вигляді

$$B = B_u \left(1 - \frac{144}{125} \cdot \frac{x^4}{a^4} \right) \quad (3)$$

де B_u - магнітна індукція в центрі КГ.

$$B_u = \frac{8 \mu_0 \cdot I \cdot W}{5\sqrt{5} \cdot a} \quad (4)$$

Спочатку розглянемо вплив неоднорідності магнітного поля на початковій ділянці кривої намагнічування (слабке магнітне поле), тобто коли відносна магнітна проникність μ_r зразка, розміщеного повздовж осі КГ є константа. Таким чином знайдемо інтегральне значення магнітної індукції B_u з формули

$$B_u = \frac{1}{x} \int_0^x B_\Sigma dx = B_u \left(1 - \frac{144}{625} \frac{x^4}{a^4} \right) \quad (5)$$

Якщо $x=l$, де l - половина довжини зразка, то (5) можна записати у вигляді

$$B_u = B_u \left(1 - \frac{144}{625} \cdot \frac{l^4}{a^4} \right); \quad (6)$$

З другого боку, значення B_u для конкретного зразка визначається експериментально при вимірюванні кривої індукції, тобто $B_e = B_u = f(H_u)$, де H_u - напруженість магнітного поля у центрі КГ.

При умові того, що x^4/a^4 є малою величиною, запишемо з урахуванням (6) вираз для визначення квазіоднорідної магнітної індукції у вигляді

$$B_k = B_e \left(1 + \frac{144}{625} \cdot \frac{l^4}{a^4} \right); \quad (7)$$

Співвідношення

$$\gamma_{\text{мн}} = \left(\frac{144}{625} \cdot \frac{l^4}{a^4} \right) \quad (8)$$

характеризує собою методичну похибку контролю, обумовлену неоднорідністю магнітного поля повздовж довжини зразка при його контролі у слабomagнітному полі ($\mu_r = \text{const}$).

При розгляді більш загального випадку $\mu_r \neq \text{const}$, тобто з урахуванням нелінійності функції $\mu_r = f(H)$, вираз для визначення μ_r можна записати у вигляді

$$\mu_r = f(H) = \frac{B_\Sigma}{H\mu_0} \quad (9)$$

де H – напруженість магнітного поля на постійній координаті x .

Вираз (9) представимо у вигляді ряду Тейлора поблизу точок $H-H_u$ і обмежимося додатками лінійними за величиною $H-H_u$, тобто

$$\mu_r(H) = \mu_r \left[1 + \left(\frac{\mu_\delta}{\mu_r} - 1 \right) \frac{H - H_u}{H_u} \right] \quad (10)$$

де μ_δ і μ_r - диференціальні і статичні відносні магнітні проникності зразка, знаходять для точок $H-H_u$

Ураховуючи те, що

$$B_\Sigma = \mu(H) \cdot H \quad (11)$$

де μ - абсолютна магнітна проникність зразка

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (12)$$

та підставив у вираз (11) формулу (10) знаходимо H , тобто

$$H = H_u \left(1 - \frac{144}{125} \frac{x^4}{a^4} \right). \quad (13)$$

Після нескладних математичних перетворень визначимо співвідношення, яке дозволяє розраховувати інтегральну (експериментальну) магнітну індукцію на половині довжини зразка у вигляді

$$B = \mu_0 \mu_r H_u \left(1 - \frac{144}{125} \cdot \frac{\mu_\delta}{\mu_r} \cdot \frac{x^4}{a^4} \right) \quad (14)$$

Формулу для визначення квазістатичної індукції B_k при умові, що величина

$$\left(\frac{144}{125} \cdot \frac{\mu_\delta}{\mu_r} \cdot \frac{l^4}{a^4} \right) \ll 1 \text{ маємо у вигляді:}$$

$$B_k = B_e \left(1 + \frac{144}{625} \cdot \frac{\mu_\delta}{\mu_r} \cdot \frac{l^4}{a^4} \right) \quad (15)$$

Вираз для методичної похибки вимірювання у загальному випадку має вигляд

$$\gamma_{\text{ми}} = G \frac{l^4}{a^4} \quad (16)$$

де параметр G знаходять, як

$$G = \left(\frac{144}{125} \cdot \frac{\mu_d}{\mu_r} \right) \quad (17)$$

З формул (15)-(17) видно, що методична похибка у загальному випадку обумовлена неоднорідністю магнітного поля повздовж зразка і нелінійністю характеристики кривої магнітної індукції. Фізичне уявлення методичної похибки полягає в тому, що вона характеризує собою відхилення інтегральної (експериментальної) магнітної індукції B_e , середньої повздовж зразка при $H-H_y$, від умовно так званої квазіоднорідної магнітної індукції B_k , яка практично відповідає однорідному магнітному полю з напруженістю у центрі КГ, тобто H_y .

Знайдені формули (15)-(17) дозволяють за результатами вимірювання кривої магнітної індукції $B_e=f(H_y)$ перебудувати цю криву у залежність B_k від H_y . При наявності залежності B_e від H_y можливе вирішення двох типів задач. Перша полягає у визначенні методичної похибки контролю. При відомих параметрах зразка і джерела магнітного поля здійснюють перебудову знайденої експериментальної характеристики $B_e=f(H_y)$ у квазіоднорідну залежність B_k від H_y . Друга задача полягає у тому, що виконується вибір параметрів зразка і джерела магнітного поля для забезпечення умови $\gamma_{mn} < \gamma_{m\Delta}$ (де $\gamma_{m\Delta}$ - допустиме значення методичної похибки). Формула (16) дозволяє знайти критичне значення половини довжини $l_{кр}$, критичне значення радіусу зразка a_k при відомій половині довжини l . При цьому

$$l_{кр} = a^4 \sqrt{\frac{\gamma_{m\Delta}}{G_{T \max}}}, \quad (18)$$

або

$$a_{кр} = l^4 \sqrt{\frac{G_{T \max}}{\gamma_{m\Delta}}}, \quad (19)$$

$$\text{де } G_{T \max} = \left(\frac{144}{125} \left(\frac{\mu_{dT}}{\mu_{rT}} \right)_{\max} \right); \quad (20)$$

де μ_{dT} і μ_{rT} - відносні диференціальна і статична магнітні проникності тіла (зразка), причому відношення μ_{dT} до μ_{rT} вибирається максимальним на основі кривої $B_e=f(H_y)$.

У цьому розділі також на основі розглянутого вище методу знайдено формули для визначення квазіоднорідної намагніченості J_k слабоферромагнітного зразка за експериментальними результатами контролю інтегральної намагніченості J_e того ж зразка. При цьому

$$J_k = J_e \left(1 + \frac{144}{625} \cdot \frac{k_d}{k} \cdot \frac{l^4}{a^4} \right) \quad (21)$$

де k_d і k - відносні диференціальна і статична магнітні сприйнятливості матеріалу зразка.

Методичну похибку у цьому разі можна визначити із формули:

$$\gamma_{\text{ми}} = \frac{144}{625} \cdot \frac{k_{\text{д}}}{k} \cdot \frac{l^4}{a^4} \quad (22)$$

Слід зазначити, що критичні значення $l_{\text{кр}}$ і $a_{\text{кр}}$ при використанні слабомагнітних зразків можна знайти за тими ж формулами, що і для визначення критичних параметрів феромагнітних виробів і зразків (див. (18), (19))

Третій розділ присвячений розрахункам установок для відновлення квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик розімкнених феро- і слабоферомагнітних зразків і виробів на основі використання котушок Гельмгольца.

На мал. 1 показано КГ з розміщеним повздовж осі прямолінійним циліндричним зразком О. На цьому малюнку наведені всі необхідні геометричні розміри КГ, ВК і зразка. Передбачається, що зразок достатньо довгий, тобто виконується умова $l/a_0 > 20$, де a_0 і l - радіус і половина довжини зразка. Ця умова зменшує вплив розмагнічувального фактору на результати контролю. Другою умовою, яка характеризує наявність однорідності магнітного поля у поперечному перерезі зразка, є нерівність $a_0 \ll a$.

На мал. 2 надана схема магнітометричної установки для відновлення квазіоднорідних магнітних характеристик і параметрів стержневих феромагнітних зразків і виробів. Схема включає в себе котушки Гельмгольца КГ, вимірювальну котушку ВК, зразок О, веберметр Вб, опір шунта $R_{\text{ш}}$, перемикач П полярності струму, ключі K_1 і K_2 , реостати R_1 і R_2 , амперметр A_1 і A_2 , додатковий опір $R_{\text{д}}$, джерело живлення постійного струму ДЖ. КГ мають $W_{\text{н}}$ витків, а ВК - $W_{\text{и}}$ витків. В роботі також наведена схема установки для відновлення квазіоднорідної намагніченості і залежності її від напруженості $H_{\text{ц}}$ при контролі слабоферомагнітних зразків і виробів. Ця схема відрізняється від попередньої (див. мал. 2) тим, що у першій використовується дві котушки Гельмгольца, причому в одній розміщений слабоферомагнітний зразок, а друга КГ без зразка. Обидві КГ включалися послідовно-узгоджено, а вимірювальні котушки послідовно-назустріч.

В цьому розділі було здійснено перебудову експериментально одержаної кривої магнітної індукції $B_{\text{ем}}$ феромагнітного зразка (тіла) у квазіоднорідну криву магнітної індукції $B_{\text{км}}$ тіла. Параметри циліндричного зразка: матеріал 9Х18; довжина $2l=136$ мм; діаметр $2a_0=5$ мм. Зразок був розміщений повздовж осі КГ зі середнім радіусом $a=90$ мм. На мал. 3 а, б, в, г представлені залежності $B_{\text{ем}}$, $B_{\text{км}}$, $\mu_{\text{рт}}$, $\mu_{\text{дм}}$, $G_{\text{т}}$, від $H_{\text{ц}}$. Як бачимо з цього малюнку величина $G_{\text{тmax}}$, яка характеризує методичну похибку, дорівнює 0,46 при $H_{\text{ц}}=610,8$ А/м. Це, в свою чергу, відповідає тому, що $B_{\text{ем}}=0,061$ Тл; $\mu_{\text{рт}}=91,2$; $\mu_{\text{дм}}=182,4$; $B_{\text{км}}=0,07$ Тл; $\gamma_{\text{ми}}=15\%$. Якщо прийняти

$\gamma_{\text{мнд}}=30\%$, то знайдено значення в експерименті методичної похибки $\gamma_{\text{мн}}=15\%$ для даного зразка менш допустимого значення $\gamma_{\text{мнд}}$.

Використавши відомі формули для розрахунків коефіцієнта розмагнічування стержнів, можна перебудувати квазіодноріну криву магнітної індукції тіла $B_{\text{км}}$ у квазіоднорідну криву індукції $B_{\text{км}}$ матеріалу зразка (тіла). Якщо знайти для вибраного зразка коефіцієнт розмагнічування, який складає $3,3 \cdot 10^{-3}$, то можна визначити квазістатичну криву магнітної індукції $B_{\text{км}}$ матеріалу зразка.

З мал. 3 слідує, що крива $B_{\text{км}}=f(H_{\text{ц}})$ значно відрізняється від кривої $B_{\text{км}}$, тому, що коефіцієнт розмагнічування для вибраного зразка є достатньо великим. Аналогічним чином була здійснена перебудова кривої намагніченості $J_{\text{ем}}$ слабоферомагнітного зразка (тіла) у квазіоднорідну характеристику тіла $J_{\text{км}}$, а потім у квазіоднорідну криву намагніченості $J_{\text{км}}$ матеріалу зразка. У такому випадку використовується циліндричний зразок, виконаний з нержавіючої слабоферомагнітної сталі марки X18H10T з параметрами: довжина $2l=123$ мм, діаметр $2a_0=5$ мм. Зразок розміщувався у КГ з середнім радіусом $a=20$ мм. Знайдений параметр $G_{\text{тmax}}$, який складає 0,92 при $H_{\text{ц}}=8,23$ кА/м. І визначено значення $J_{\text{ем}}=2,96$ кА/м, а розраховані величини $K_{\text{м}}=0,45$; $K_{\text{мд}}=1,8$ (тут $K_{\text{м}}$ і $K_{\text{мд}}$ - відносні статична і диференціальна магнітні сприйнятливості тіла (або зразка); $J_{\text{км}}=3,71$ кА/м. Методична похибка у разі використання слабоферомагнітного матеріалу, яка характеризує максимальне відхилення квазіоднорідної намагніченості $J_{\text{км}}$ від виміральної величини $J_{\text{ем}}$, складає 20%, що також менш величини $\gamma_{\text{мнд}}=30\%$.

Слід відзначити, що, завдяки тому, що коефіцієнт розмагнічування, який визначається для слабоферомагнітних зразків, значно менше аналогічного коефіцієнта розмагнічування при його розрахунку у випадку застосування феромагнітного зразка, то у зв'язку з цим перебудована крива квазіоднорідної намагніченості $J_{\text{км}}$ матеріалу зразка практично не відрізняється від квазіоднорідної характеристики $J_{\text{км}}$ тіла.

Четвертий розділ присвячений пошуку шляхів покращення метрологічних параметрів установок для відновлення квазіоднорідних характеристик феромагнітних і слабоферомагнітних зразків і їх матеріалів. Для якісного одержання квазіоднорідних характеристик феромагнітних і слабоферомагнітних зразків і виробів необхідно забезпечити таку умову, щоб апаратурні похибки визначення індукції $B_{\text{ем}}$, намагніченості $J_{\text{ем}}$ і напруженості $H_{\text{ц}}$ магнітного поля були значно меншими від методичних похибок $\gamma_{\text{мн}}$. Використавши методику розрахунків похибок посередніх вимірювань запишемо вираз для розрахунків відносної похибки $\gamma_{B_{\text{ем}}}$ вимірювання магнітної індукції при довірчій вірогідності 0,95 у вигляді

$$\gamma_{B_{\text{ем}}}^2 = 1,1 \sqrt{\gamma_{\Delta\Psi}^2 + \gamma_{W_{\text{и}}}^2 + 4\gamma_{a_0}^2 + \gamma_{\text{ку}}^2}, \quad (23)$$

де $\gamma_{\Delta\psi}$; γ_{W_u} ; γ_{a_0} ; $\gamma_{\kappa_{и}}$ - відносні похибки вимірювання веберметром різниці потокощеплення, числа витків вимірювальної обмотки, радіуса виробу (зразка) і шунта, який використовують для розширення діапазону вимірювання веберметром.

Результати розрахунків за формулою (23) похибок γ_{Bem} при прийнятих характерних значеннях $\gamma_{\Delta\psi} = 0,5\%$; $\gamma_{W_u} = 0,22\%$; $\gamma_{a_0} = 0,3\%$; $\gamma_{\kappa_{и}} = 0,02\%$ показують, що у широкому діапазоні зміни B_{em} (від 0,0085 до 1,27 Тл) значення γ_{Bem} не перевищує 1,5%, а на кінці цього діапазону, тобто при $B_{em}=1,27$ Тл; $\gamma_{Bem}=0,89\%$.

Формула для визначення відносної похибки γ_{H_u} вимірювання напруженості H_u магнітного поля у центрі КГ має вигляд

$$H_u = 1,1\sqrt{\gamma_I^2 + \gamma_{W_u}^2 + \gamma_a^2}, \quad (24)$$

де γ_I ; γ_{W_u} ; γ_a - відносні похибки вимірювання струму в КГ, числа витків КГ і середнього радіусу КГ.

Підставив у (24) характерні значення $\gamma_I = 0,38\%$; $\gamma_{W_u} = 0,22\%$; $\gamma_a = 0,3\%$, знайдемо, що похибка γ_{H_u} в діапазоні $165,3 \leq H_u \leq 6098$ А/м не перевищує 0,65%, а при $H_u=6098$ А/м; $\gamma_{H_u}=0,53\%$.

В цьому розділі були також знайдені формули для оцінки відносних апаратурних похибок $\gamma_{J_{em}}$ і γ_{H_u} вимірювання намагніченості тіла J_{em} слабоферромагнітних зразків і напруженості H_u в центрі КГ. Результати розрахунків цих похибок показують, що у широкому діапазоні зміни J_{em} (від 2,96 до 17,23 кА/м) $\gamma_{J_{em}} \leq 1,37\%$, при $J_{em} = 17,23$ кА/м; $\gamma_{J_{em}}=1\%$. Похибки γ_{H_u} вимірювання H_u у діапазоні $8,23 \leq H_u \leq 22,1$ кА/м при контролі слабоферромагнітних виробів не перевищують 0,55%. Досягнення малих значень відносних похибок вимірювання величин B_{em} , J_{em} і H_u стало можливим завдяки використанню багатодіапазонних приладів, які мають високі точнісні характеристики, наприклад веберметр Ф5050 (клас точності 0,5), амперметри М2015 (клас точності 0,2). Було оцінено відносну похибку визначення самих кривих індукції $B_{ек}$ і намагніченості $J_{ек}$. Ця похибка характеризується відхиленням визначеної в експерименті на розглянутих установках кривих $B_{em}=f(H_u)$ і $J_{em}=f(H_u)$ від характеристик $B_{emy}=f(H_u)$ і $J_{emy}=f(H_u)$ уточнених для тих же зразків. Результати розрахунків таких похибок показують, що в обох випадках контролю зразків з феро- і слабоферромагнітних матеріалів точність визначення самих кривих $B_{em}=f(H_u)$ і $J_{em}=f(H_u)$ не перевищує 0,5%. Встановлено, що в всіх точках кривих індукції B_{em} і намагніченості J_{em} відношення методичних похибок до апаратурних є більш або рівним 6, що дає можливість визначати квазістатичні характеристики з феро- і слабоферромагнітних матеріалів. З метою підвищення метрологічних характеристик магнітометричних установок було розроблено алгоритм і на основі його функціональну схему авто-

матизованої системи для відновлення квазіоднорідних характеристик розімкнених зразків і їх матеріалів. Система дозволяє автоматизувати процес контролю магнітних параметрів, прискорити обчислювання магнітних характеристик, здійснити відновлення квазістатичних параметрів і їх залежностей від напруженості поля, оцінити похибки вимірювання як методичні, так і апаратурні, а також вибрати раціональні за похибками режими роботи системи, а також провести обробку багаторазових вимірювань і визначити випадкові похибки визначення магнітних величин.

Таким чином, в роботі розглянута методика і реалізуючі її установки для визначення квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик розімкнених феро- і слабоферомагнітних зразків і виробів за результатами контролю їх у неоднорідному магнітному полі котушок Гельмгольца.

Коротко зупинимось на результатах роботи.

1. Створена методика розрахунків квазіоднорідних значень магнітної індукції у розімкненому феромагнітному і слабоферомагнітному зразках, розміщених повздож осі котушок Гельмгольца; ця методика одержана на основі знайдених співвідношень для визначення методичної похибки, обумовленої неоднорідністю магнітного поля повздож довжини зразка і нелінійністю його кривих магнітної індукції та намагніченості.

2. На основі допустимих значень методичної похибки отримані вирази для розрахунку критичного значення радіусу котушок Гельмгольца при постійній довжині зразка або критичної довжини зразка (виробу) при заданому радіусі котушок Гельмгольца.

3. Розглянуті схеми установок для відновлення квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик феро- і слабоферомагнітних зразків і виробів у магнітному полі котушок Гельмгольца.

4. Одержані результати відновлення квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик стержневих феромагнітних і слабоферомагнітних зразків і виробів шляхом перерахунку експериментально визначених кривих магнітної індукції і намагніченості вказаних зразків в реальних неоднорідних магнітних полях котушок Гельмгольца. Показано, що методичні похибки не перевищують 15-20%.

5. Вирішені дві задачі пов'язані з відновленням квазіоднорідних магнітних характеристик. Перша з них полягає у тому, що при виміряній кривій індукції (або намагніченості) і відомій довжині зразка знаходять методичну похибку і порівнюють її з допустимим значенням. Друга задача полягає у тому, що задаються допустимою методичною похибкою і критичною довжиною феро- і слабоферомагнітного зразка та виробів при постійному радіусі котушок Гельмгольца або знаходять її радіус при постійній довжині зразка. Рішення другої

задачі дозволяє знайти раціональне співвідношення між радіусом котушок Гельмгольца і довжиною зразка для того, щоб не вийти за межі допустимої методичної похибки.

6. Отримані результати перебудови квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик стержневих зразків (феро- і слабоферомагнітних) в квазіоднорідні характеристики матеріалів (речовин) таких зразків шляхом урахування розмагнічувальних факторів.

Показано, що при контролі феромагнітних зразків перебудована квазістатична крива магнітної індукції матеріалу зразка суттєво відрізняється від квазіоднорідної магнітної характеристики того ж самого зразка. У той же час ці обидві характеристики слабоферомагнітного зразка практично не відрізняються одна від другої.

7. За отриманими співвідношеннями проведено аналіз похибок вимірювання значень магнітної індукції, напруженості магнітного поля, намагніченості і в цілому самої кривої магнітної індукції (або намагніченості). Показано, що в широкому діапазоні змінени напруженості магнітного поля відносні апаратурні похибки визначення магнітної індукції, напруженості поля і самої кривої індукції (або намагніченості) не перевищують 1,5%; 0,65% і 0,45%, відповідно.

8. Встановлено, що для того, щоб здійснити перебудову експериментальних кривих індукції і намагніченості стержневих зразків (феро- і слабоферомагнітних) в квазіоднорідні характеристики цих зразків необхідно мати для всіх точок кривих індукції і намагніченості відношення методичної до апаратурної похибки більш або дорівнювати 6. Показано, що це співвідношення виконується у всьому діапазоні змінени напруженості магнітного поля.

9. З метою розширення функціональних можливостей і підвищення швидкодії контролю і зменшення апаратурних похибок розроблено алгоритм і блок-схема автоматизованої системи. Система дозволяє автоматизувати процес знаходження характеристик, прискорити розрахунки, пов'язані з відновленням квазіоднорідних характеристик, оцінити методичні і апаратурні похибки вимірювань, вибрати раціональні за похибками режими роботи системи.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Себко В.П., Нгуен Ба Тай, Горкунов Б.М. Методика восстановления квазиоднородных магнитных характеристик разомкнутых образцов // Вестник ХГПУ. – Харьков. – 1999. – Вып. 61. – С. 345 – 347.

Автором отримані основні співвідношення, які дозволяють провести операцію відновлення намагніченості слабоферомагнітних виробів розташованих у котушках Гельмгольца.

2. Нгуен Ба Тай. Учет методической погрешности при определении действительной намагниченности разомкнутого образца // Вестник ХГПУ. – Харьков. – 1999. – Вып. 37. – С. 58 – 60.

Автором запропонована методика визначення дійної (квазіоднорідної) магнітної характеристики магнітних матеріалів.

3. Себко В.П. Нгуен Ба Тай, Горкунов Б.М. Восстановление квазиоднородных магнитных характеристик разомкнутых образцов с учетом размагничивающего фактора // Вестник ХГПУ. – Харьков. – 2000. – Вып. 102. – С. 105 – 108.

Автором розглянута методика отримання дійсних характеристик матеріалів і виробів з урахуванням розмагнічувального фактору.

4. Себко В.П. Нгуен Ба Тай, Горкунов Б.М. Функциональная схема автоматизированной установки для магнитных испытаний разомкнутых образцов // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків. – 2001. – № 1. – С. 111 – 114.

Автором розроблено алгоритм функціонування автоматизованої системи контролю магнітних параметрів розімкнених зразків.

5. Себко В.П., Нгуен Ба Тай, Гучнин В.М. Определение квазиоднородных магнитных характеристик стержневых образцов // Технічна електродинаміка. – Київ.: - 1999. – Тематичний випуск. – 42. – С. 53 – 58.

Автором отримані основні співвідношення, які поєднують основні магнітні параметри виробу з характеристиками первинного перетворювача.

6. Себко В.П. Нгуен Ба Тай, Горкунов Б.М. Аппаратурные погрешности контроля магнитных характеристик разомкнутых образцов // Технічна електродинаміка. – Київ.: - 2000. – 42. – С. 64 – 66.

Автором проведені експериментальні дослідження впливу апаратурних похибок та основні метрологічні характеристики перетворювача.

АНОТАЦІЇ

Нгуен Ба Тай. Установка для коректного контролю параметрів і характеристик розімкнутих зразків і виробів. – Рукопис.

Дисертація на змагання ученого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.11.13 – прилади і методи контролю і визначення складу речовин. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2001.

Дисертація присвячена питанням розробки і дослідження установки для одержання квазіоднородних магнітних характеристик стрижневих зразків і виробів за результатами їхнього

магнітного контролю в неоднорідному полі котушок Гельмгольца. Створено методику розрахунку дійсних (квазіоднородних) значень магнітної індукції усередині розімкнутих ферромагнітних і слабоферромагнітних зразків, поміщених у магнітне поле, що змінюється в широкому діапазоні його напруженості. Установлено, що для того, щоб здійснити перебудову експериментальних криві намагнічування і намагніченості стрижневих ферро – і слабоферромагнітних зразків у квазіоднородные магнітні характеристики цих зразків досить мати для всіх крапок кривої індукції і намагніченості відношення методичної погрішності до апаратурної помилки більше або рівним 5.

Ключові слова: напруженість, магнітна індукція, намагніченість, погрішності магнітного контролю, методична й апаратурна погрішність.

Nguien Ba Thaw. Installation for the correct control of parameters and characteristics disengaged samples and products. - the Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of Cand.Tech.Sci. on a specialty 05.11.13 - devices and a quality monitoring and definition of structure of substances. - National technical university "Kharkov polytechnic institute", Kharkov, 2001.

The dissertation is devoted to questions of development and research of installation for reception quasi-homogeneous magnetic characteristics of rod samples and products by results of their magnetic control in a non-uniform field of Gelmholtz's coils. The design procedure valid (quasi-homogeneous) values of a magnetic induction inside disengaged ferromagnetic and weakly ferromagnetic the samples placed in a magnetic field, varied in a wide range of its intensity is created. It is established, that to carry out reorganization of experimental curves of magnetization and magnetization rod ferro- and weakly ferromagnetic samples in quasi-homogeneous magnetic characteristics of these samples enough to have for all points of a curve induction and magnetization the attitude of a methodical error to a hardware mistake more or equal 5.

Key words: intensity, a magnetic induction, magnetization, errors of the magnetic control, methodical and an instrument error.

Нгуен Ба Тай. Установка для корректного контроля параметров и характеристик разомкнутых образцов и изделий. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определение состава веществ. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2001.

Диссертация посвящена вопросам разработки и исследования установки для получения квазиоднородных магнитных характеристик стержневых образцов и изделий по результатам их магнитного контроля в неоднородном поле катушек Гельмгольца.

В работе проведен учет неоднородности магнитного поля вдоль оси катушек Гельмгольца, соответствующий начальным участкам кривой намагничивания ферромагнитных образцов. Создана методика расчета действительных (квазиоднородных) значений магнитной индукции внутри разомкнутых ферромагнитных и слабоферромагнитных образцов, помещенных в магнитное поле, изменяющееся в широком диапазоне его напряженности.

На основании допустимого значения методической погрешности, обусловленной неоднородностью магнитного поля вдоль длины образца и нелинейностью его кривой магнитной индукции, получены выражения для определения критических значений радиуса катушек Гельмгольца при постоянной длине образца или критической длине изделия при заданном радиусе катушек.

Получены результаты восстановления действительных (квазиоднородных) магнитных параметров и характеристик разомкнутых (протяженных) ферро – и слабоферромагнитных образцов путем пересчета экспериментально найденных кривых магнитной индукции и намагниченности указанных образцов в реальных неоднородных магнитных полях. Показано, что при рассчитанных параметрах установок для восстановления квазиоднородных характеристик ферро – и слабоферромагнитных образцов, методическая погрешность не превышает 15 %.

Показано, что учет коэффициента размагничивания при настройке квазиоднородной кривой магнитной индукции ферромагнитного образца в кривую индукции его материала вызывает большие отклонения этих кривых, поскольку в данном случае проявляется сильное размагничивание магнитного поля внутри ферромагнитного образца (тела). В то же время различие между квазиоднородными характеристиками слабоферромагнитного образца и его материала незначительные (при отношении длины образца к его диаметру больше либо равно 10).

Проведен анализ полученных формул для расчета аппаратных погрешностей измерений магнитной индукции, напряженности магнитного поля и самой кривой намагничивания ферромагнитных образцов. Показано, что во всем диапазоне изменения напряженности магнитного поля относительные погрешности определения магнитной индукции, напряженности магнитного поля и самой кривой намагничивания не превышают 1,5 %; 0,65 % и 0,45 % соответственно в диапазоне изменения напряженности поля от 160 до 6100 А/м. Определены соотношения для оценки относительных погрешностей измерения намагниченности, напряженности магнитного поля и самой кривой намагниченности слабоферромагнитных образцов.

Расчеты показывают, что относительные погрешности измерения названных параметров не превышают 1,5 %; 0,65 % и 0,44 % в широких пределах изменения напряженности магнитного поля от 8 кА/м до 22 кА/м.

Установлено, что для того, чтобы осуществить перестройку экспериментальных кривых намагничивания и намагниченности стержневых ферро– и слабоферромагнитных образцов в квазиоднородные магнитные характеристики этих образцов достаточно иметь для всех точек кривой индукции и намагниченности отношение методической погрешности к аппаратурной ошибке больше либо равным 5. Показано, что это условие выполняется во всем диапазоне изменения напряженности магнитного поля при контроле как ферромагнитных так и слабоферромагнитных образцов и изделий.

С целью расширения функциональных возможностей, повышения быстродействия контроля и уменьшения погрешностей измерений разработаны алгоритмы и блок – схема автоматизированной установки для магнитных испытаний и восстановления квазиоднородных параметров и характеристик разомкнутых образцов и их материалов с одновременной оценкой методической и аппаратурной погрешностями и выбором рационального по погрешностям режима работы.

Ключевые слова: напряженность, магнитная индукция, намагниченность, погрешности магнитного контроля, методическая и аппаратурная погрешность.