

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Фам Туанг Хунг

УДК 620.179.14

**ПРОХІДНИЙ СОЛЕНОЇДАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ
ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗІМКНЕНИХ
ЗРАЗКІВ**

**Спеціальність 05.11.05 – прилади та методи вимірювання
електричних та магнітних величин**

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2002

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, професор
Дмитрієнко Валерій Дмитрович,
Національний технічний університет "ХПІ",
професор кафедри електронно-
обчислювальних машин;
- доктор технічних наук, професор
Кузнєцов Борис Іванович,
Українська інженерно-педагогічна академія Міністерства
освіти і науки України, м. Харків, завідувач кафедри
автоматизованих систем управління
- Провідна установа: Харківський державний науково-дослідний інститут
метрології, Держстандарт України, м. Харків.

Захист відбудеться 30.05.2002 р. о 14 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 28.04.2002 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Горкунов Б.М. **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

Актуальність теми. Електричні та магнітні виміри в останній час розвиваються досить інтенсивно. Це вимагає, передусім, підвищення якості виготовлення магнітопроводів енергетичного обладнання (трансформаторів, статорів і роторів електродвигунів, генераторів, реле, контакторів та ін.), для електротехнічної, енергетичної та приладобудівної промисловості.

Крім того, вимір таких інформативних параметрів матеріалів і виробів, як магнітна індукція, напруженість магнітного поля, магнітна проникність, питома електрична провідність, петля гістерезиса, коерцитивна сила та інші величини, які дозволяють судити про інші не менш важливі параметри, а саме, механічні напруження, міцність, твердість, температура, наявність домінуючої домішки в матеріалі виробу та ін. В цьому плані широкий розвиток отримали засоби магнітних іспитів матеріалів і виробів в постійних і змінних магнітних полях. Постійне магнітне поле повністю проникає в зразок або виріб і завдяки цьому дозволяє визначати якісні магнітні характеристики виробу і матеріалу. Змінне магнітне поле згасає в зразку, однак це явище можна використати для одночасних вимірів багатьох параметрів виробів, оскільки в вихідних сигналах вимірювальних приладів і перетворювачів міститься багатопараметрова інформація.

Серед широкої різноманітності об'єктів для магнітних вимірів виділяються розімкнені зразки і вироби. Це феромагнітні і слабоферомагнітні прутки, труби, стержні, заготовки валів, що складають великий обсяг продукції, що випускається промисловістю. При магнітних іспитах таких зразків і виробів важливу роль має вибір джерела магнітного поля, зондуючого об'єкт, що досліджується. В цьому плані певними перевагами володіють соленоїди (одношарові і багатшарові), оскільки в їхній робочій області можна отримати не тільки слабкі, але і достатньо сильні магнітні поля. Крім того, якщо використати досить довгий соленоїд, то в ньому визначають параметри однорідності поля досить точно. Раніше довгий соленоїд використовувався як зразкова міра напруженості магнітного поля.

Однак при використанні соленоїда виникає важливе для практики питання, якими повинні бути співвідношення між довжинами соленоїда і зразка з тим, щоб створити умову однорідності магнітного поля протягом всієї довжини соленоїда і зразка з урахуванням характерної для даного матеріалу кривої намагнічування. Ще не менше важливе питання виникає при магнітних вимірах характеристик розімкненого зразка кінцевих розмірів в соленоїдальній котушці, яке полягає в тому, щоб відтворити за результатами вимірів магнітних параметрів і характеристик в неоднорідному магнітному полі вздовж зразка у квазіоднорідні (дійсні) криві магнітної індукції, петлю гістерезиса, намагніченість і інші зв'язані із ними параметри (питомі втрати потужності, коерцитивна сила, залишкова індукція та ін.).

Вирішення означених питань дозволяє передусім підвищити точність визначення магнітних характеристик і зв'язаних із ними фізико-механічних величин, оскільки всі ці параметри тепер будуть характерні для практично однорідного зондуючого виробу полю. Крім того, вибір раціональних довжин зразка (або виробу) дасть можливість створити порівняно дешеві і менш трудомісткі у виготовленні соленоїдальні котушки. Таким чином, сучасна дисертаційна робота присвячена важливій темі – створенню прохідного соленоїдального перетворювача для виміру електромагнітних параметрів і характеристик феромагнітних і слабоферомагнітних зразків і виробів у магнітному полі соленоїдальної котушки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалася згідно з проектом, що пройшов за конкурсом Міністерства освіти і науки України (шифр 48/16). Наказ Міністерства освіти і науки України № 37 від 13.02.1997 р. (термін до грудня 1999 р.).

В нинішній час робота проводиться в відповідності з двома держбюджетними темами М5204 і М5205 НТУ “ХПІ”, що включені в тематичні плани Міністерства освіти і науки України.

Мета і задачі дослідження. Це розробка і дослідження прохідного соленоїдального

перетворювача для більш коректних вимірів електромагнітних характеристик і параметрів розімкнених зразків (феромагнітних, слабоферомагнітних і немагнітних). Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- розробити методику відновлення квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик циліндричних суцільних феромагнітних і слабоферомагнітних зразків в магнітному полі соленоїдальної котушки;
- отримати співвідношення для визначення квазіоднорідної магнітної індукції феромагнітних і слабоферомагнітних зразків при врахуванні слабкої і помітної неоднорідності напруженості магнітного поля вздовж осі соленоїдальної котушки;
- на основі використання соленоїдальних котушок розробити лабораторні пристрої для відновлення квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик феро- і слабоферомагнітних стержневих зразків і виробів;
- отримати результати експериментів визначення квазіоднорідних кривих магнітної індукції і намагніченості феро- і слабоферомагнітних зразків в постійних магнітних полях соленоїдальних котушок;
- здійснити перехід від квазіоднорідних кривих магнітної індукції і намагніченості зразка (тіла) до квазіоднорідних кривих магнітної індукції і намагніченості матеріалу зразка (тіла);
- отримати вирази для визначення критичних довжин зразка (феро- і слабоферомагнітного) з точки зору не перевищення допустимої методичної похибки зумовленої неоднорідністю магнітного поля і нелінійністю кривих індукції і намагніченості;
- провести аналіз апаратурних похибок виміру магнітної індукції, напруженості магнітного поля і намагніченості зразків та порівняти апаратурні похибки і методичні в всьому діапазоні зміни напруженості магнітного поля;
- навести приклади практичного використання розроблених соленоїдальних прохідних перетворювачів з допустимими методичними похибками для одночасного виміру магнітної проникності і електропровідності трубчатих і суцільних циліндричних зразків.

Об'єкт дослідження – це процес отримання квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик циліндричних феромагнітних і слабоферомагнітних зразків за результатами магнітних вимірів тих же зразків і виробів у неоднорідному полі соленоїдальної котушки.

Предмет дослідження – створення прохідного соленоїдального перетворювача для виміру електромагнітних параметрів і характеристик розімкнених зразків і виробів в постійних і змінних магнітних полях.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що

- розроблена методика відновлення квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик циліндричних суцільних феромагнітних і слабоферомагнітних стержневих зразків в магнітному полі соленоїдальної котушки;
- отримані співвідношення для визначення квазіоднорідної магнітної індукції феромагнітних і слабоферомагнітних суцільних циліндричних зразків при врахуванні слабкої і помітної неоднорідності напруженості магнітного поля вздовж осі соленоїдальної котушки;
- визначені основні параметри установки з соленоїдальною котушкою для вирішення задачі відновлення квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик феро- і слабоферомагнітних прямолінійних зразків виробів;
- розроблена методика переходу від квазіоднорідних кривих магнітної індукції і

намагніченості зразків (тіла) до квазіоднорідних кривих магнітної індукції і намагніченості матеріалів зразків (тіла);

- отримані вирази для визначення критичних довжин зразка з точки зору не перевищення допустимої методичної похибки, зумовленої неоднорідністю магнітного поля і нелінійністю кривих індукції і намагніченості;
- проведений аналіз апаратурних похибок виміру магнітної індукції, напруженості магнітного поля і намагніченості зразків дав можливість порівняти апаратурні і методичні похибки у всьому діапазоні зміни напруженості магнітного поля.

Практичне значення отриманих результатів роботи полягає в тому, що на основі допустимих значень методичної похибки з використанням отриманих співвідношень визначають основні параметри джерела поля і всіх вузлів магнітометричної установки для відновлення квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик феро- і слабоферомагнітних циліндричних виробів і зразків. Все це дасть можливість проектувати прилади для магнітних вимірів, визначати метрологічні характеристики цих приладів і систем (діапазони зміни магнітних параметрів, похибки виміру магнітних параметрів в широких межах зміни напруженості магнітного поля, чутливості приладу), а також проводити обробку багаторазових вимірів.

Отримані розробки даної дисертації впроваджені в навчальному процесі на кафедрі “Прилади та методи неруйнівного контролю” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” в курсах лекцій “Магнітні засоби неруйнівного контролю”, “Електромагнітні види контролю”, “Методи контролю електромагнітних полів”, “Датчики автоматизованих систем”, “Електромагнітна сумісність”.

Особистий внесок здобувача полягає в тому, що:

- на підставі отриманих співвідношень для неоднорідного поля отримана квазіоднорідна крива індукції феромагнітних виробів на всіх ділянках кривої намагнічування;
- розроблена методика відновлення квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик стержневих суцільних (феромагнітних) зразків в магнітному полі соленоїдальної котушки;
- визначені співвідношення для оцінки апаратурних похибок виміру магнітної індукції, напруженості і намагніченості при дослідженні феро- і слабоферомагнітних виробів і зразків;
- запропонований спільний вимір магнітної проникності і електропровідності суцільних і трубчатих циліндричних виробів з допомогою магнітометричної установки з соленоїдальним перетворювачем.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися на:

- Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми автоматизованого електроприводу теорія і практика”, Алушта, Крим, 2000 р.
- Міжнародній науково-технічній конференції “Силова електроніка і енергоефективність”, Алушта, Крим, 2000 р.
- На щорічних науково-технічних конференціях Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” (м. Харків, 1999 – 2001 рр.).

Публікації: основні положення і 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 обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, заключення, списку літератури і додатків. Повний обсяг дисертації складає

сторінок, проілюстрована 16 малюнками (13 стор.), 6 таблицями (6 стор.), список літературних джерел складається з 107 найменувань (11 стор.) і додатки на 6 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині зазначена актуальність теми наукового дослідження, вказано на зв'язок роботи з науковими планами, держбюджетними темами, відмічена мета роботи та для досягнення мети сформульовані основні задачі дисертації, зазначена наукова новизна роботи та її практичне значення, розглянуто особистий внесок автора у друкованих працях із співавторами, наведена апробація та структура дисертації. У першому розділі було розглянуто методи і пристрої для вимірювання магнітних параметрів і характеристик зразків і виробів в постійних і змінних магнітних полях. Показано достоїнства і недоліки зондування зразків постійними за часом і змінними полями. Поряд з методами, пристроями і установками, які і дозволяють визначити магнітні параметри і характеристики у різних магнітних полях, у цьому розділі багато уваги приділяється розвитку і удосконаленню вихорострумів методів і засобам вимірювання багатьох параметрів зразків і виробів одним і тим же перетворювачем. Відмічається той фактор, що розімкнені зразки і вироби, широко використовуються в магнітопроводах енергетичного обладнання. Однак при вимірюванні параметрів стержневих зразків треба з'ясувати питання раціонального відношення довжини соленоїдальної котушки і зразка з тим, щоб вимірювати у майже однорідному вздовж осі соленоїда полі, а також знайти можливість встановити квазіоднорідні магнітні параметри і характеристики зразка (чи виробу), який розміщується у соленоїді. У другому розділі запропонована методика відновлення квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик феромагнітних стержневих магнітних зразків в магнітному полі соленоїдальної котушки. Спочатку розглянуто це відновлення з урахуванням слабкої неоднорідності напруженості магнітного поля вздовж осі соленоїда. На рис. 1 показано вид соленоїдальної котушки СК з розміщеним повздовж осі її зразком З, який знаходиться в середині вимірювальної котушки ВК. На рис. 1 наведені позначення розмірів СК, ВК і зразка З: де L – довжина соленоїда, a – радіус його, I – струм у витках обмотки соленоїда; l_0 – довжина зразка; W – число витків обмотки СК. На цьому малюнку наведені основні координати, які дозволяють визначити розподіл магнітної індукції повздовж осі СК.

Рис. 1. Соленоїдальна котушка зі зразком

Користуючись законом Біо-Савара–Лапласа, знайдемо вираз для розрахунку магнітної індукції повздовж осі соленоїдальної котушки. А якщо розкласти цей вираз в ряд Тейлора і обмежитися членами ряду до x^4 включно (де x – текуча координата від

центра СК повздож осі соленоїда), то тоді одержимо наступне співвідношення

$$B_x = B_{\text{ц}} \left(1 - Mx^2 + Nx^4 \right) \quad (1)$$

де $B_{\text{ц}}$ – магнітна індукція в центрі соленоїда

$$B_{\text{ц}} = \frac{\mu_0 IW}{2\sqrt{c}}, \quad (2)$$

$$m_0 \text{ – магнітна константа; } c \text{ – параметр, } c = a^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2 \quad (3)$$

Коефіцієнти M і N визначаються за формулами

$$M = \frac{3}{2} \left(\frac{1}{c} - \frac{1}{4} \frac{L^2}{c^2} \right) \quad N = \frac{15}{8} \left(\frac{1}{c^2} - \frac{5}{6} \frac{L^2}{c^3} + \frac{7}{48} \frac{L^4}{c^4} \right) \quad (4)$$

Спочатку розглянемо випадок слабого магнітного поля (тобто лінійну ділянку кривої магнітної індукції $B_{\text{ц}}$) і слабкої неоднорідності поля повздож осі СК. Цей випадок відповідає умові $\mu_r = \text{const}$ (де m_r – відносна магнітна проникність зразка). Для того, щоб визначити інтегральну магнітну індукцію B_i , треба взяти інтеграл виду

$$B_i = \frac{1}{l} B_{\text{ц}} \int_0^l (1 - Mx^2 + Nx^4) dx \quad (5)$$

де l – половина довжини соленоїда (тобто $l = L/2$).

Після інтегрування знайдемо, що

$$B_i = B_{\text{ц}} \left[1 - \left(\frac{1}{3} Ml^2 - \frac{1}{5} Nl^4 \right) \right] \quad (6)$$

Слід відзначити, що інтегральна магнітна індукція є така індукція B_e , яку ми вимірюємо в експерименті, тому $B_i = B_e$. З урахуванням того, що величина у круглих дужках є мала, то вираз для розрахунку квазіоднорідної магнітної індукції запишемо у вигляді

$$B_k = B_e \left[1 + \frac{1}{3} Ml^2 - \left(\frac{1}{5} N - \frac{1}{9} M^2 \right) l^4 \right] \quad (7)$$

$$\text{Вираз} \quad \gamma_{\text{мн}} = \frac{1}{3} Ml^2 - \left(\frac{1}{5} N - \frac{1}{9} M^2 \right) l^4 \quad (8)$$

є методична похибка вимірювання, яка обумовлена неоднорідністю напруженості H та індукції B_x магнітного поля повздож осі СК і зразка.

При розгляді загального випадку $\mu_r \neq \text{const}$, тобто з урахуванням залежності $\mu_r = f(H)$ вираз

$$\mu_r = f(H) = B / (H\mu_0) \quad (9)$$

можна подати у вигляді ряду Тейлора поблизу $H = H_{ц}$ і обмежитися членами ряду квадратичними за H , тоді

$$\mu_r(H) = \mu_r(H_{ц}) \left[1 + \left(\frac{\mu_d}{\mu_r(H_{ц})} - 1 \right) \frac{H - H_{ц}}{H_{ц}} + \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\partial \mu_d}{\partial H} \frac{H_{ц}}{\mu_r(H_{ц})} \frac{\mu_d}{\mu_r(H_{ц})} \right) \left(\frac{H - H_{ц}}{H_{ц}} \right)^2 \right], \quad (11)$$

де μ_d – відносна диференціальна магнітна проникність зразка;
 $\partial \mu_d / \partial H$ – похідна μ_d за H .

Враховуючи те, що розподіл H вздовж осі СК записується як

$$H = H_{ц} (1 - Mx^2 + Nx^4) \quad (12)$$

і підставив (12) у (11), знайдемо після інтегрування вираз для B_i

$$B_i = \mu(H)H = \left[1 - \frac{1}{3} \frac{\mu_d}{\mu_r(H_{ц})} Ml^2 + \frac{1}{5} \left(\frac{\mu_d}{\mu_r(H_{ц})} N + \frac{1}{2} \frac{\partial \mu_d}{\partial H} \frac{\mu_d}{\mu_r(H_{ц})} \frac{H_{ц}}{H_{ц}} M^2 \right) l^4 \right], \quad (13)$$

де $\mu(H) = \mu_0 \mu_r(H)$.

Формула для розрахунку квазіоднорідної магнітної індукції B_k , з урахуванням (13) має вигляд

$$B_k = B_e \left[1 - \frac{1}{3} \frac{\mu_d}{\mu_r(H_{ц})} Ml^2 + \frac{1}{5} \left(\frac{\mu_d}{\mu_r(H_{ц})} N + \frac{1}{2} \frac{\partial \mu_d}{\partial H} \frac{\mu_d}{\mu_r(H_{ц})} \frac{H_{ц}}{H_{ц}} M^2 \right) l^4 \right] \quad (14)$$

Співвідношення для методичної похибки у загальному випадку має вид

$$\gamma_{mn} = \frac{1}{3} \frac{\mu_d}{\mu_r(H_{ц})} Ml^2 + \frac{1}{5} \left(\frac{\mu_d}{\mu_r(H_{ц})} N - \frac{1}{2} \frac{\partial \mu_d}{\partial H} \frac{\mu_d}{\mu_r(H_{ц})} \frac{H_{ц}}{H_{ц}} - \frac{1}{9} \left(\frac{H_{ц}}{\mu_r(H_{ц})} \right)^2 M^2 \right) l^4 \quad (15)$$

Тут методична похибка обумовлена не тільки неоднорідністю магнітного поля повздовж осі зразка, але і нелінійністю кривої намагнічування. Ця похибка характеризує собою відхилення вимірювальної, інтегральної індукції B_e , яка є середня вздовж осі феромагнітного зразка від умовно називаємої квазіоднорідної (дійсної) індукції, яка відповідає майже однорідному магнітному полю з напруженістю $H = H_{ц}$ вздовж зразка.

Отримана вище формула (14) дозволяє за результатами вимірювання кривої індукції $B_e = f(H_{ц})$ перебудувати цю криву у залежність $B_k = f(H_{ц})$. При наявності залежності B_e від $H_{ц}$ можливо вирішення двох типів задач. Перша з них – це розрахунки методичних похибок при відомих параметрах зразка і джерела магнітного поля з послідовним відновленням вимірювальної характеристики в квазіоднорідну. Друга

задача – це вибір параметрів зразка або соленоїдальної котушки для того, щоб задовольнити умову $g_{MH} < g_{MHD}$

(де g_{MHD} – допустиме значення методичної похибки). Критична половина довжини $l_{0кр}$ зразка знаходять як

$$l_{0кр} = \sqrt{\frac{-G + \sqrt{G^2 + Q\gamma_{MHD}}}{2Q}}, \quad (16)$$

де

$$G = \frac{1}{5} \left(\frac{\mu_d}{\mu_r(H_{ц})} N + \left(\frac{1}{2} \frac{\partial \mu_d}{\partial H} \frac{H_{ц}}{\mu_r(H_{ц})} - \frac{1}{9} \left(\frac{H_{ц}}{\mu_r(H_{ц})} \right)^2 \right) M^2 \right); \quad (17)$$

$$Q = \frac{1}{3} \frac{\mu_d}{\mu_r(H_{ц})} M. \quad (18)$$

Розглянута методика визначення квазіоднорідної індукції реалізована при слабкій неоднорідності поля, тобто для випадку $g_{MH} \leq 5\%$. Далі в цьому розділі описаний другий шлях удосконалення наведеної вище методики, яка дозволяє відновити квазіоднорідну характеристику стержневих феромагнітних зразків при значній неоднорідності поля.

Застосувавши інший варіант розкладу в ряд Тейлора виразу для розподілу магнітної індукції повздовж осі соленоїда і обмеживши члени ряду порядку x^6 , знайдемо формулу для визначення B_x у вигляді

$$B_x = B_{ц} Q_1 + Tx^2 + Ex^4 + Rx^6, \quad (19)$$

де

$$Q_1 = \frac{2\sqrt{c}}{L} - \frac{4a^2\sqrt{c}}{L^3} \left(1 - \frac{3a^2}{L^2} \right); \quad T = \frac{48a^2\sqrt{c}}{L^5} \left(\frac{10a^2}{L^2} - 1 \right); \quad (20) \quad (21)$$

$$E = \frac{320a^2\sqrt{c}}{L^7} \left(\frac{21a^2}{L^2} - 1 \right); \quad R = \frac{4480a^2\sqrt{c}}{3L^9} \left(\frac{42a^2}{L^2} - 1 \right). \quad (22) \quad (23)$$

При цьому співвідношення для розподілу напруженості H_x магнітного поля має вид

$$H_x = \frac{B_{ц}}{\mu_0} Q_1 + Tx^2 + Ex^4 + Rx^6, \quad (24)$$

Після інтегрування (19) знайдемо формулу для $B_e = B_i$ у виді

$$B_e = B_{ц} \left(Q_1 + \frac{1}{3} Tl^2 + \frac{1}{5} El^4 + \frac{1}{7} Rl^6 \right) \quad (25)$$

Вираз (25) має відношення для випадку $\mu_r = \text{const}$.

При використанні загального випадку $\mu_r \neq \text{const}$ з урахуванням виразу (10) і розкладу його поблизу $H = H_{ц}$ в ряд з урахуванням членів H_2 , а також маючи на увазі формулу (24), отримаємо спочатку співвідношення для B_x у загальному випадку, а потім після інтегрування (див. (6)) і вираз для B_k тобто

$$B_k = B_e \left/ \left[N_1 Q_1 + \frac{1}{3} V Q_1 + N_1 T l^2 + \frac{1}{5} S Q_1 + V T + N_1 E l^4 + \frac{1}{7} Y Q_1 + S T + V E + R N_1 l^6 \right] \right. \quad (26)$$

де

$$N_1 = 1 + Q_1 - 1 \left[\frac{\mu_d}{\mu_r(H_{\text{ц}})} + Q_1 - 2 + \frac{1}{2} \frac{\partial \mu_d}{\partial H} \frac{H_{\text{ц}}}{\mu_r(H_0)} Q_1 - 1 \right]; \quad (26)$$

$$V = T \left[\frac{\mu_d}{\mu_r(H_0)} + 2 Q_1 - 1 - 1 + \frac{1}{2} \frac{\partial \mu_d}{\partial H} \frac{H_{\text{ц}}}{\mu_r(H_{\text{ц}})} Q_1 - 1 \right]; \quad (27)$$

$$S = E \left[\frac{\mu_d}{\mu_r(H_{\text{ц}})} + 2 Q_1 - 1 + T^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial \mu_d}{\partial H} \frac{H_{\text{ц}}}{\mu_r(H_{\text{ц}})} E Q_1 - 1 + T^2 \right]; \quad (28)$$

$$Y = R \left[\frac{\mu_d}{\mu_r(H_{\text{ц}})} + 2 Q_1 - 1 \right] + 2 T E + \frac{\partial \mu_d}{\partial H} \frac{H_{\text{ц}}}{\mu_r(H_{\text{ц}})} R Q_1 - 1 + T E. \quad (29)$$

І, нарешті співвідношення для $g_{\text{МН}}$ при $m_r \text{ № const}$

$$\gamma_{\text{МН}} = N_1 Q_1 - 1 + \frac{1}{3} V Q_1 + N_1 T l^2 + \frac{1}{5} S Q_1 + V T + N_1 E l^4 + \frac{1}{7} Y Q_1 + S T + V E + R N_1 l^6. \quad (30)$$

Використовуючи формули (26) – (30) можна, як і раніше перебудувати експериментальну криву магнітної індукції $B_e = f(H_{\text{ц}})$ феромагнітного зразка в квазіоднорідну магнітну індукцію $B_k = f(H_{\text{ц}})$ при суттєвій неоднорідності поля повздовж зразка. Неоднорідність поля в такому разі для феромагнітних зразків може досягати 10 – 12 %.

В цьому розділі також розглянуто за аналогічною методикою можливість перебудови експериментальної кривої намагніченості $J_e = f(H_{\text{ц}})$ слабоферомагнітних зразків в квазіоднорідну характеристику $J_k = f(H_{\text{ц}})$ тих же зразків. Формула для розрахунку J_k у випадку $m_r \text{ № const}$ при значній неоднорідності поля має вигляд

$$J_k = J_e \left/ \left[N_1 Q_1 + \frac{1}{3} V Q_1 + N_1 T l^2 + \frac{1}{5} S Q_1 + V T + N_1 E l^4 + \frac{1}{7} Y Q_1 + S T + V E + R N_1 l^6 \right] \right., \quad (31)$$

Коефіцієнти N_1 ; Q_1 ; V ; T ; S ; E ; Y ; R визначаються за формулами (19) – (23) і (26) – (29) (тільки в останніх 4-х формулах треба замість m_d , $m(H_{\text{ц}})$ і $\frac{\partial m_d}{\partial H}$ підставити відповідно k_d , $k(H_{\text{ц}})$ і $\frac{\partial k_d}{\partial H}$, де k_d та $k(H_{\text{ц}})$ – відносні диференціальна і статична магнітні сприйнятливості, $\frac{\partial k_d}{\partial H}$ – похідна k_d з H).

Співвідношення для розрахунку методичної похибки $g_{\text{МН}}$ визначається на основі (31) і

має такий же вид, як і формула (30) з урахуванням вказаних заміन. Розрахунки на основі (30) показують, що в загальному випадку к № const можна досягнути методичну похибку порядку 12 – 15 % і при таких значеннях g_{MN} отримати квазіоднорідну характеристику $J_K = f(H_{Ц})$ намагніченості слабоферромагнітних зразків. Третій розділ присвячений отриманню експериментальних кривих $B_e = f(H_{Ц})$ і $J_e = f(H_{Ц})$, а на основі їх здійснення відновлення кривих $B_K = f(H_{Ц})$ і $J_K = f(H_{Ц})$ феро- і слабоферромагнітних матеріалів. На мал. 2 наведена схема установки для перебудови експериментальних магнітних характеристик ферромагнітних зразків в квазіоднорідні криві магнітних індукцій. Схема включає в себе соленоїдальну котушку СК, вимірювальну котушку ВК, зразок З, веберметр Вб, шунт $R_{Ш}$, перемикач П, ключі K_1 і K_2 , реостати R_1 і R_2 , амперметри A_1 і A_2 , джерело живлення ДЖ постійного струму СК має W_H витків, а ВК – W_B витків. В роботі також наведена схема установки для відновлення квазіоднорідних намагніченостей J_K і залежності їх від $H_{Ц}$ при вимірюванні характеристик слабоферромагнітних зразків. В ній застосовуються дві соленоїдальні котушки, причому в одній з них розміщений слабоферромагнітний зразок, а друга без зразка. Намагнічувальні обмотки СК включаються послідовно-узгоджено, а вимірювальні котушки послідовно-назустріч. Експерименти проводились на двох зразках, виготовлених з ферромагнітної сталі 9г18. Перший зразок мав радіус $a_0 = 5$ мм і довжину $l_0 = 220$ мм (радіус СК $a = 20$ мм, повна довжина $L = 322$ мм). У другого зразка були $a_0 = 5$ мм і довжина $l_0 = 240$ мм (при тих же параметрах СК).

Рис. 2. Схема установки для вимірювання магнітних характеристик стержневих ферромагнітних зразків

При магнітному випробуванні вказаних двох ферромагнітних зразків були одержані результати вимірювання магнітної індукції B_{eT} тіла (зразків), розрахунків індукції B_{eM} матеріала (речовини) тих же зразків, методичної похибки g_{MN} і, нарешті, квазіоднорідної індукції B_{KM} матеріала зразків при різних значеннях напруженості магнітного поля $H_{Ц}$. Дані табл. 1 і 2 вказують на те, що, чим довше зразок при постійній довжині СК, тим більш максимальна методична похибка, яка обумовлена неоднорідністю магнітного поля і нелінійністю кривої магнітної індукції ферромагнітного зразка. Так, наприклад, для першого зразка ($l_0 = 220$ мм) максимальна методична похибка g_{MN} складає $-5,44$ % (див. табл. 1), а для другого зразка з $l_0 = 240$ мм максимальне значення $g_{MN} =$

–8,85 % (див. табл. 2). Знаки “–“ у методичних похибках, як і в цілому діапазоні $H_{\text{Ц}}$, свідчить про те, що крива $B_{\text{ET}} = f(H_{\text{Ц}})$ лежить нижче кривих

B_{EM} і B_{KM} . Аналогічно отримано результати перебудови експериментальних кривих намагніченості двох слабоферомагнітних зразків, виконаних із сталі 1Г18Н10Т, в квазіоднорідні криві намагніченості тих же зразків.

В цьому розділі розглянуто перехід від квазіоднорідних кривих магнітної індукції і намагніченості тіл (зразків) до квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик матеріалів феромагнітних і слабоферомагнітних зразків. Використавши відомі формули для розрахунків коефіцієнта розмагнічування можна здійснити такий перехід.

В роботі виконано перехід від B_{ET} до B_{EM} і від B_{EM} до B_{KM} , і показано, що максимальне відносне відхилення B_{ET} від B_{KM} виникає при $H_{\text{Ц}} = 1153,13 \text{ А/м}$ і складає 79,7 % (для феромагнітного зразка з $l_0 = 220 \text{ мм}$, сталь 9Г18), для зразка з $l_0 = 240 \text{ мм}$ таке відхилення становить 74,5 % при $H_{\text{Ц}} = 1308,44 \text{ А/м}$. Максимальне відхилення магнітних характеристик матеріалів слабоферомагнітного зразка від характеристик (тобто намагніченості) тіла дуже мале і не перевищує 0,04 %, що пояснюється малими значеннями $m_{\text{Г}} = 1,05 \text{ ÷ } 5$.

У четвертому розділі наводяться приклади практичного використання результатів визначення квазіоднорідних магнітних і електромагнітних параметрів та характеристик стержневих зразків в полі соленоїдальної котушки.

Спочатку знаходяться критичні довжини зразків, виконаних із феро- і слабоферомагнітних матеріалів. Показано, що з ростом методичної похибки збільшується критична довжина феромагнітних зразків.

Далі визначаються апаратурні похибки за методикою розрахунків похибок посередніх вимірювань. При цьому формула для визначення відносної похибки $\gamma_{B_{\text{ET}}}$ експериментальної магнітної індукції тіла записується при довірчій вірогідності 0,95 як

$$\gamma_{B_{\text{ET}}} = 1,1 \sqrt{\gamma_{\Delta\psi}^2 + \gamma_{W_B}^2 + \gamma_{S_0}^2}, \quad (32)$$

де $\gamma_{\Delta\psi}^2$, $\gamma_{W_B}^2$ і $\gamma_{S_0}^2$ – відносні похибки вимірювання різниці потোকщеплення, чисел витків вимірювальної котушки і площі поперечного перерізу зразка відповідно.

Прийняв характерне значення $g_{\text{DU}} = 0,6 \%$, $g_B = 0,2 \%$ і $g_{S_0} = 0,4 \%$, одержимо похибку $g_{B_{\text{ET}}} = 0,8 \%$. Співвідношення для розрахунку відносної похибки $g_{H_{\text{Ц}}}$ вимірювання $H_{\text{Ц}}$ при довірчій вірогідності 0,95 має вид

$$\gamma_{H_{\text{Ц}}} = 1,1 \sqrt{\gamma_I^2 + \gamma_{W_H}^2 + \gamma_a^2 + \gamma_L^2}, \quad (33)$$

де g_I , g_{W_H} , g_a і g_L – відносні похибки намагнічувального струму, чисель витків СК, радіусу СК і довжини СК відповідно. При значеннях $g_{W_H} = g_a = g_L = 0,2 \%$ і $g_I = 0,23 \%$, використавши (33), одержимо $g_{H_{\text{Ц}}} = 0,5 \%$

Формули і значення відносних похибок $\gamma_{J_{\text{ET}}}$ вимірювання намагніченості J_{ET} тіла і напруженості $H_{\text{Ц}}$ магнітного поля при випробуванні слабоферомагнітних зразків такі ж самі, як (32) і (33) $g_{B_{\text{E}}}$ і $g_{H_{\text{Ц}}}$ для феромагнітних зразків. Застосував багатомежні прилади амперметр М2015 і веберметр Ф5050, можна досягти близьких до указаних

значень похибок $g_{B_{et}}$; $g_{H_{\Sigma}}$ і $\gamma_{J_{et}}$ на усіх ділянках кривих індукцій і намагніченостей. Слід відмітити, що для того, щоб здійснити достатньо точне відновлення квазіоднорідних кривих магнітних індукцій і намагніченостей методичні похибки повинні бути більше апаратурних похибок вимірювання магнітної індукції B_{et} і намагніченості J_{et} .

Дані розрахунків g_{MH} , наведені в роботі показують, що практично на всій кривій $B_{et} = f(H_{\Sigma})$ ця умова виконується, а максимальне відношення складає

$$\frac{\gamma_{MH}}{\gamma_{B_{et}}} = \frac{8,85}{0,8} = 11,06 \quad (34)$$

Далі у цьому розділі на основі розрахунків методичних похибок, які складають не менш 3 %, вибрані розміри соленоїдальних трансформаторних електромагнітних перетворювачів ТЕМП і циліндричних провідних зразків. Розглянуто метод і ТЕМП для одночасного вимірювання магнітної проникності m_r і питомої електричної провідності s трубчатих зразків і виробів. Метод заснований на досягненні екстремумів універсальних функцій перетворення для кожного відношення товщини стінки d труби до зовнішнього її радіусу a_0 . Такий екстремум відповідає екстремумам уявних частин внесених ерс вимірювальної котушки ТЕМП. Розроблена схема установки і одержані результати вимірювань m_r і s ферромагнітних, слабоферромагнітних і немагнітних трубчатих зразків.

Наприкінці розділу застосовано метод із соленоїдальним ТЕМП для сумісного вимірювання m_r і s циліндричних суцільних виробів на основі використання двохкоординатного моста Р-56. Цей метод заснован на використанні універсальних функцій перетворення, вимірюванні ерс E_2 вимірювальної котушки ТЕМП і фазового кута j ерс E_2 . Розроблено схему установки, а також алгоритм вимірювальних і розрахункових процедур для одночасного визначення значень m_r і s . Отримані результати вимірювань електромагнітних параметрів ферромагнітних і немагнітних циліндричних зразків і виробів. Результати вимірювань розробленими двопараметровими методами (екстремальним і на основі моста Р-56) добре погоджуються з даними контрольних вимірювань за допомогою відомих приладів.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

Таким чином, в роботі розглянуто прохідний соленоїдальний перетворювач для вимірювання електромагнітних параметрів і характеристик розімкнених ферромагнітних і слабоферромагнітних зразків. Коротко зупинемось на основних результатах роботи.

1. Розроблена методика відновлення квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик стержневих ферромагнітних і слабоферромагнітних зразків за результатами вимірів кривої магнітної індукції і намагніченості в неоднорідному магнітному полі соленоїдальної котушки.
2. Отримані співвідношення для врахування слабкої та сильної неоднорідності напруженості магнітного поля і магнітної індукції вздовж осі соленоїда.
3. Знайдені співвідношення для визначення методичної похибки, зумовленою неоднорідністю магнітного поля вздовж осі ферро- і слабоферромагнітних зразків і нелінійністю кривої магнітної індукції і намагніченості.

4. Показано, що відновлення квазіоднорідних параметрів і характеристик можливо при значеннях методичних похибок, рівних 10–12% при використанні ферромагнітних зразків і 10–15% у випадку магнітних іспитів слабоферромагнітних зразків.
5. Наведені основні параметри магнітометричних установок і здійснено вибір багатометричної апаратури, що дозволить підвищити точність вимірювання магнітних і електричних величин.
6. Отримані результати визначення квазіоднорідних параметрів і характеристик ферромагнітних і слабоферромагнітних зразків за даними магнітних іспитів цих же зразків (тіл) в постійному магнітному полі соленоїдальної котушки. Для конкретних ферро- і слабоферромагнітних зразків і соленоїдальних котушок розраховані методичні похибки. Наведені числові значення цих похибок, що збільшуються з ростом довжини зразка, якщо зафіксувати довжину соленоїдальної котушки.
7. Здійснений перехід від квазіоднорідних магнітних параметрів і характеристик зразків (тіл), виконаних з ферромагнітних і слабоферромагнітних сталей, до квазіоднорідних параметрів кривої магнітної індукції і намагніченості матеріалів (речовин) цих зразків. Показано, що магнітна індукція матеріалу ферромагнітних зразків істотно більше індукції в самих зразках (і досягає 80 %). В випадку використання слабоферромагнітних зразків відхілення квазіоднорідної намагніченості зразка (тіла) від квазіоднорідної намагніченості матеріалу, з якого виготовлений даний зразок, надто мала, як правило, не перевищує 0,04%.
8. На основі отриманих в роботі формул проведені розрахунки критичних довжин ферромагнітних і слабоферромагнітних зразків при фіксованих довжинах соленоїдальної котушки. Показано, що, для заданих допустимих значень методичної похибки можна визначити критичну довжину зразка, що при постійній довжині соленоїда забезпечить на всіх ділянках кривої індукції і намагніченості умову того, що методичні похибки не перевищать задану допустиму методичну похибку.
9. Проведені за знайденими співвідношеннями розрахунки апаратурних похибок вимірювання магнітної індукції і напруженості магнітного поля в соленоїдальній котушці. Показано, що числові значення відносних похибок визначення магнітної індукції і напруженості поля не перевищують 0,8% і 0,5%, відповідно. Встановлено, що практично на всіх ділянках кривої магнітної індукції і намагніченості значення методичних похибок більше апаратурних похибок. Останнє характеризує доцільність проведення відновлення квазіоднорідних (дійсних) характеристик ферро- і слабоферромагнітних зразків.
10. Створений екстремальний метод і прохідний трансформаторний електромагнітний перетворювач соленоїдального типу для одночасного вимірювання відносної магнітної проникності μ_r і питомої електричної провідності s ферромагнітних, слабоферромагнітних і немагнітних трубчатих зразків.
11. Запропоновано для спільного безконтактного визначення μ_r і s суцільних циліндричних зразків використання трансформаторного електромагнітного перетворювача соленоїдального типу, включеного в схему двухкоординатного мосту Р-56 змінного струму. Розроблений алгоритм одночасного вимірювання двох означених параметрів. Отримані експериментальні результати, за допомогою двох методів, що співпадають з даними контрольних методів.
12. Розрахунки методичних похибок при використанні соленоїдальних перетворювачів, що реалізують екстремальний і мостовий (Р-56) методи, показали, що методичні похибки не перевищують 3%. Це створює сприятливі умови спільних вимірів магнітних і електричних параметрів ферро-, слабоферромагнітних і немагнітних

зразків в соленоїдальних перетворювачах.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Себко В.П., Фам Туан Хунг. Исследование квазиоднородных магнитных характеристик разомкнутых магнитных образцов в разомкнутой магнитной цепи. – Вестник Харьковского государственного политехнического университета, 2000, вып. 113. – с. 344 – 347.
2. Себко В.П., Фам Туан Хунг, Горкунов Б.М. Определение квазиоднородных магнитных параметров и характеристик в соленоидальном преобразователе. – Технічна електротехніка. Тематичний випуск “Силова електроніка та енергоефективність”, ч. 1, 2000. – с. 93 – 96.
3. Себко В.П., Фам Туанг Хунг. Определение квазиоднородных магнитных характеристик слабомагнитных образцов в соленоиде. – Інтегровані технології та енергозбереження, 2001, № 2. – с. 69 – 73.
4. Себко В.П., Фам Туанг Хунг. Метрологические характеристики установки для магнитных испытаний разомкнутых образцов в соленоиде. – Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, 2001, № 2. – с. 107 – 111.
5. Себко В.П., Фам Туанг Хунг. Экспериментальные результаты восстановления квазиоднородных характеристик ферромагнитных стержней в соленоиде. – Вестник национального технического университета “Харьковский политехнический институт”, 2001, вып. 5. – с. 166 – 169.
6. Себко В.П., Фам Туанг Хунг. Экстремальный электромагнитный метод контроля параметров трубчатых проводящих изделий. – Вестник Харьковского государственного политехнического университета, 2000, вып. 102, с. 109 – 112.

АНОТАЦІЇ

Фам Туанг Хунг. Прохідний соленоїдальний перетворювач для вимірювання електромагнітних характеристик розімкнених зразків. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.05 – прилади та методи вимірювання електричних та магнітних величин. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2002.

Дисертація присвячена розробці та дослідженню прохідних соленоїдальних перетворювачів для вимірювання електромагнітних параметрів розімкнених зразків та виробів, виготовлених із феро- та слабоферомагнітних матеріалів. Створено методику розрахунку квазиоднорідних значень магнітної індукції циліндричних суцільних зразків в магнітному полі соленоїдальної котушки. Визначені основні параметри установки з соленоїдальною котушкою для вирішення задачі відновлення дійсних магнітних параметрів зразків. Отримані вирази для визначення критичних довжин зразка з точки зору не перевищення допустимої методичної похибки, зумовленої неоднорідністю магнітного поля і нелінійністю кривих індукції і намагніченості. Наведено аналіз апаратурних похибок виміру магнітної індукції, напруженості магнітного поля і намагніченості зразків.

Ключові слова: магнітна індукція, апаратурна та методична похибки вимірювання, квазиоднорідні параметри, намагніченість.

Fam Tuang Xung. The flow solenoidal converter for measurement of the electromagnetic characteristics broken is model. – Manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science on a specialty 05.11.05 – instruments and methods of measurement of electrical and magnetic values. – National technical university "Kharkov polytechnic institute", Kharkov, 2002.

The thesis is devoted to development and research of solenoidal converters for measurement of electromagnetic parameters broken is model also article (workpiece) manufactured from ferromagnetic and weakly ferromagnetic of materials. The technique of calculation of quasihomogeneous values of a flux density a cylindrical continuous article (workpiece) in a magnetic field of a solenoidal spool is created. The main parameters of the unit with a solenoidal spool for problem solving of restoring of real magnetic parameters are defined is model. The expressions for definition of critical length of a sample from the point of view not exceedings of a valid methodical error called(cause) discontinuity of a magnetic field both nonlinearity of curve induction and magnetization are obtained. The analysis of instrument errors of measurement of a flux density is reduced, of a magnetic intensity and magnetization is model.

Key words: a flux density, instrument and methodical error, quasihomogeneous parameters, magnetization.

Фам Туан Хунг. Проходной соленоидальный преобразователь для измерения электромагнитных характеристик разомкнутых образцов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.05 – приборы и методы измерения электрических и магнитных величин. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2002.

Диссертация посвящена разработке и исследованию соленоидальных преобразователей для измерения электромагнитных параметров разомкнутых образцов и изделия, изготовленных из ферро- и слабоферромагнитных материалов. Создана методика расчета квазиоднородных значений магнитной индукции цилиндрических сплошных изделия в магнитном поле соленоидальной катушки.

Получены соотношения для учета слабой и существенной неоднородности напряженности магнитного поля и магнитной индукции вдоль оси соленоида.

Найдены соотношения для определения методической погрешности, обусловленной неоднородностью магнитного поля вдоль оси ферро- и слабоферромагнитных образцов и нелинейностью кривых магнитной индукции и намагниченности. Эти соотношения позволяют перестроить экспериментальные магнитные характеристики в квазиоднородные кривые магнитной индукции и намагниченности указанных образцов. Получены формулы для определения квазиоднородной намагниченности и методических погрешностей в случаях постоянства и непостоянства значений магнитной восприимчивости слабоферромагнитных образцов.

Показано, что восстановление квазиоднородных параметров и характеристик возможно при значениях методических погрешностей, равных 10 – 12 % при использовании ферромагнитных образцов и 10 – 15 % в случае магнитных испытаний слабоферромагнитных образцов.

Приведены результаты экспериментального определения квазиоднородных параметров и характеристик ферромагнитных образцов по данным магнитных испытаний тех же образцов (тел) в постоянном во времени магнитном поле соленоидальных катушек. Для конкретных ферро- и слабоферромагнитных образцов и соленоидальных катушек рассчитаны методические погрешности, связанные с неоднородностью магнитного поля вдоль длины образцов и нелинейностью их кривых магнитной индукции и намагниченности. Приведены численные значения этих погрешностей, которые увеличиваются с ростом длины образца при зафиксированной

длине соленоидальной катушки.

Осуществлен переход от квазиоднородных магнитных параметров и характеристик образцов (тел), выполненных из ферромагнитных и слабоферромагнитных сталей, к квазиоднородным параметрам и кривым магнитной индукции и намагниченности материалов (веществ) этих образцов. Показано, что магнитная индукция материала ферромагнитных образцов существенно больше индукции самих образцов (это превышение достигает 80 %). В случае использования слабоферромагнитных образцов отличие квазиоднородной намагниченности образца (тела) и квазиоднородной намагниченности материала, из которого изготовлен данный образец, весьма мало и, как правило, не превышает 0,04 %. Такое малое отличие объясняется небольшими значениями относительной магнитной проницаемости слабоферромагнитного материала, диапазон изменения магнитной проницаемости которого составляет от 1,001 до 3. В то же время магнитная проницаемость использованных в работе ферромагнитных сталей изменяется от 60 до 250.

На основании полученных в работе формул проведены расчеты критических длин ферромагнитных и слабоферромагнитных образцов при зафиксированных длинах соленоидальных катушек. Показано, что, задавшись допустимым значением методической погрешности можно определить критическую длину образца, которая при постоянной длине соленоида обеспечит на всех участках кривой магнитной индукции и намагниченности условие того, что методические погрешности не превысят заданную допустимую методическую погрешность.

Проведены по найденным соотношениям расчеты аппаратурных погрешностей измерения магнитной индукции и напряженности магнитного поля в соленоидальной катушке. Показано, что численные значения относительных погрешностей определения магнитной индукции и напряженности поля не превышают 0,8 % и 0,5 % соответственно.

Создан экстремальный метод и реализующий его проходной трансформаторный электромагнитный преобразователь соленоидального типа для одновременного измерения относительной магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости ферромагнитных, слабоферромагнитных и немагнитных трубчатых образцов. Полученные с помощью данного метода результаты экспериментов при определении двух указанных параметров хорошо согласуются с данными контрольных методов.

Расчеты методических погрешностей при использовании соленоидальных преобразователей, реализующих экстремальный и мостовой (мост Р-56) методы, показали, что методические погрешности не превышают 3 %. Это создает благоприятные условия совместных измерений магнитных и электрических параметров ферро-, слабоферромагнитных и немагнитных образцов в соленоидальных преобразователях, имеющих меньшие или соизмеримые с 3 % методическими погрешностями.

Ключевые слова: магнитная индукция, аппаратурная и методическая погрешности измерения, квазиоднородные параметры, намагниченность.