

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

КОСТЮКОВ ІВАН ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 620.179.14

**МЕТОД КОНТРОЛЮ ЕФЕКТИВНОЇ
МАГНІТНОЇ ПРОНИКНОСТІ ФЕРОМАГНІТНОГО СПІРАЛЬНОГО
ДРОТУ БРОНІ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ**

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу
речовин

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків–2015

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі електроізоляційної та кабельної техніки Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Ломов Сергій Георгійович,
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”,
доцент кафедри електроізоляційної та кабельної техніки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сахацький Віталій Дмитрович,
Харківський національний автомобільно-дорожній
університет, професор кафедри метрології та безпеки
життєдіяльності

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

Захист відбудеться «04»06.2015 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

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

Автореферат розісланий 30.04.2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Глоба С.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним із факторів, які стримують подальше підвищення пропускну здатності силових кабельних ліній, виконаних із одножильних кабелів, є втрати енергії, що обумовлені протіканням повздовжніх та вихрових струмів в екранах та інших захисних елементах конструкції кабелю.

Проблема визначення втрат в захисних елементах конструкції силових кабелів, а також в екранах струмопроводів із окремо екранованими фазами розглядалась в працях *Холодного С. Д., Дмитрієва М. В., Чальян К. М., Тозоні О. В.* та ін. Значний внесок у вирішення вказаної задачі внесли *Conangla A. A., Jackson R. L., Dwight H. B., Barrett J.S., Heyda P. G.* Одним із факторів, які визначають інтенсивність впливу вказаних струмів на тепловий режим кабельної лінії, є електромагнітні властивості матеріалів захисних елементів. Випадок наявності в конструкції деяких типів силових кабелів броні із сталевих дротин (для забезпечення вимог механічної цілісності кабелю), ускладнює розробку математичних моделей для визначення сукупних втрат на повздовжні та вихрові струми і, крім того, підвищує ці втрати. Анізотропія магнітної проникності феромагнітного дроту обумовлює вплив кроку накладання спірального дроту броні силових кабелів на його ефективні електромагнітні властивості при роботі в поперечному магнітному полі жили кабелю. Широкий спектр можливих конструктивних рішень при виробництві, а також нелінійні характеристики матеріалу обумовлюють необхідність попереднього контролю ефективної магнітної проникності спірального дроту броні силових кабелів. Враховуючи наявність обставин, що ускладнюють проведення контролю в поперечному полі жили кабелю, актуальною є задача відносно розробки методу контролю ефективної магнітної проникності спірального дроту броні силових кабелів шляхом збудження аналітичних сигналів, що фіксуються з вимірювальних соленоїдів, які певним чином охоплюють спіральний зразок, за допомогою джерел однорідного повздовжнього магнітного поля. Це дозволяє моделювати як нормальну, так і дотичну складові напруженості магнітного поля (по відношенню до спіралі дроту) і, крім того, проводити контроль ефективної магнітної проникності в лабораторних умовах. Вирішення вказаної задачі визначило напрямок досліджень дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Здобувач брав участь в дослідженнях, проведених за науково-дослідною темою № 81085 «Дослідження ефективності технологічного контролю в забезпеченні надійності кабельно-провідникової продукції в умовах діючого виробництва з метою розширення впровадження інноваційних продуктів в енергосистеми України», (ПАО «Завод «Південкабель», м. Харків), в якій був виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка методу контролю магнітних характеристик дроту броні силових кабелів із врахуванням його геометричних параметрів.

Для досягнення мети в роботі поставлені задачі:

– розробити метод контролю ефективної магнітної проникності спірального феромагнітного дроту броні силових кабелів в лабораторних умовах;

– обґрунтувати чутливість характеристик параметричного електромагнітного перетворювача до кроку накладання спірального дроту при проведенні вимірювань в повздовжньому полі;

– сформулювати можливі способи розташування вимірювальних соленоїдів при збудженні аналітичних сигналів повздовжнім та поперечним магнітними полями;

– розробити експериментальний стенд для збудження аналітичних сигналів в спіральному дроті броні при використанні жили кабелю в якості джерела поперечного магнітного поля;

– розробити модель впливу шунтуючого магнітного потоку на результати контролю, при визначенні ефективної магнітної проникності в повздовжньому магнітному полі.

Об'єктом дослідження є процес взаємодії матеріалу феромагнітного дроту спіральної форми із повздовжнім та поперечним магнітним полем.

Предмет дослідження – метод контролю ефективної магнітної проникності спірального дроту, що заснований на порівнянні теоретично розрахованих сигналів електромагнітного перетворювача (при відсутності зразка) із фактично вимірними значеннями (при наявності зразка).

Методи дослідження. При моделюванні розподілу тангенціальної та радіальної складових напруженості поперечного магнітного поля по перерізу дроту використовувались: аналітичний метод вирішення двомірних крайових задач математичної фізики (метод Фур'є), спеціальні функції, чисельні методи апроксимації функцій. Експериментальне визначення ефективної магнітної проникності проводились на розробленому стенді із використанням спеціально виготовлених модельних зразків та методів електричних вимірювань.

Наукова новизна отриманих результатів:

– вперше розроблений метод контролю ефективної магнітної проникності спірального феромагнітного дроту броні силових кабелів шляхом моделювання дотичної та нормальної компонент напруженості магнітного поля за допомогою застосування джерел повздовжніх магнітних полів. Застосування запропонованого методу, на відміну від розроблених раніше, дозволяє проводити контроль із врахуванням специфічної геометричної форми об'єкту контролю, яка, крім інших факторів, визначає магнітні властивості матеріалу в умовах експлуатації кабельної лінії;

– вперше визначені критерії для обґрунтування чутливості характеристик параметричного електромагнітного перетворювача до кроку накладання спірального феромагнітного дроту. Застосування зазначених критеріїв дозволяє на якісному рівні робити висновки відносно впливу геометричних параметрів досліджуваного зразка на ефективну магнітну проникність в широкому діапазоні частот, та при різних значеннях напруженості магнітного поля;

– вперше експериментально отримані значення ефективної магнітної

проникності спіральних зразків в повздовжньому магнітному полі із врахуванням впливу вихрових струмів та геометричних параметрів зразка.

Практичне значення отриманих результатів для кабельної техніки полягає в можливості оцінювати вплив кроку накладання дроту броні та його діаметр на ефективні магнітні характеристики матеріалу дроту. А також, в можливості робити висновки щодо відповідності магнітних параметрів броні кабелів, із конкретними геометричними параметрами, рекомендаціям, що наведені в міжнародних стандартах, при визначенні пропускної здатності силових кабелів.

Основні результати роботи впроваджено:

– ПАО «Завод «Південкабель» (м. Харків) – для впровадження рекомендацій щодо раціонального вибору кроку накладання дротяної броні силових кабелів;

– в навчальному процесі на кафедрі електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХП» у дисциплінах спеціалізацій «Електроізоляційна та кабельна техніка» та «Обладнання електротехнічних систем електроспоживання».

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: розробка експериментального стенду, проведення вимірювань, виготовлення досліджуваних зразків, аналіз отриманих результатів, розробка математичних моделей щодо визначення розподілу компонент напруженості магнітного поля по перерізу прямолінійного дроту та впливу шунтуючого магнітного потоку на результати вимірювань, обґрунтування планів і програм експериментів відносно збудження аналітичних сигналів повздовжнім та поперечним магнітними полями.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати та положення дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та були схвалені на: 16, 17 та 18 міжнародних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2012 р, 2013 р, 2014 р), міжнародному симпозіумі «Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика» (SIEMA) (м. Харків, 2013 р, 2014 р.), на науково-практичних семінарах «Пожаростойкие и огнестойкие кабели энергетического назначения, их конструкции и используемые материалы» (м. Харків, ПАО «Завод «Південкабель» 2013 р.), «Состояние воздушных и кабельных электрических сетей и основные направления повышения их эффективности. ПУЭ в редакции 2014 года: Юридический статус разъяснение и актуализация содержания» (м. Харків, ПАО «Завод «Південкабель» 2014 р.), Всеукраїнському науково-практичному семінарі «Современные методы обслуживания, эксплуатации и ремонта кабельных сетей» (м. Харків, ЗАТ «Харківобленерго» 2013 р.)

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 10 наукових публікаціях, з них: 6 статей у наукових фахових виданнях України (3 - у виданні, що включене до міжнародних наукометричних баз), 3 – у матеріалах

конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 176 сторінок; з них 42 рисунка по тексту; 20 рисунків на 10 сторінках; 3 рисунки на 1 сторінці; 2 таблиці по тексту; список використаних джерел з 135 найменувань на 15 сторінках, 3 додатки на 8 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність вибраної теми дисертації, сформульовано мету і задачі досліджень, визначено об'єкт і предмет дослідження, описані методи дослідження, наведено наукову новизну та практичне значення роботи.

Перший розділ присвячено аналізу основних аспектів електромагнітних процесів, пов'язаних із протіканням повздовжніх та вихрових струмів в захисних елементах конструкції одножильних силових кабелів, а також із їх впливом на тепловий режим роботи вказаних трьохфазних ліній електропередачі. Виділені основні фактори, що обумовлюють інтенсивність такого впливу, серед яких – магнітна проникність матеріалів елементів конструкції. На підставі аналізу стану вирішення задач, присвячених забезпеченню контролю електрофізичних параметрів зразків із відносно простою геометричною формою (прямолінійних), сформульовані перспективні можливості вирішення задачі щодо контролю спіральних зразків.

У **другому розділі** проаналізовані основні характеристики кабельної лінії, які можна використовувати при розробці методу контролю. До чутливих характеристик, які можна використовувати при контролі ефективної магнітної проникності, в першу чергу, необхідно віднести активний опір, індуктивність, взаємну індуктивність між жилою та екраном (оболонкою чи бронею), коефіцієнт розповсюдження γ , коефіцієнт затухання α та хвильовий опір.

Проте, необхідність проводити контроль в лабораторних умовах і, відповідно, обмежена довжина кабелю, робить недоцільним проведення контролю ефективної магнітної проникності шляхом застосування перелічених параметрів кабельної лінії.

В зазначеному випадку такий контроль доцільно проводити шляхом використання електромагнітних перетворювачів із повздовжнім магнітним полем. В такому випадку з'являється можливість моделювання як повздовжньої, так і поперечної компонент напруженості намагнічуючого поля, виділених по відношенню до спірального дроту. Наведена на рисунку 1, відносно можливості виділення дотичної та нормальної компонент магнітного поля по відношенню до поверхні спірального дроту, аналогія між випадками, коли поле направлене паралельно і перпендикулярно до вісі твірного циліндра спіралі, дозволяє проводити контроль ефективної магнітної проникності спірального дроту в повздовжньому магнітному полі.

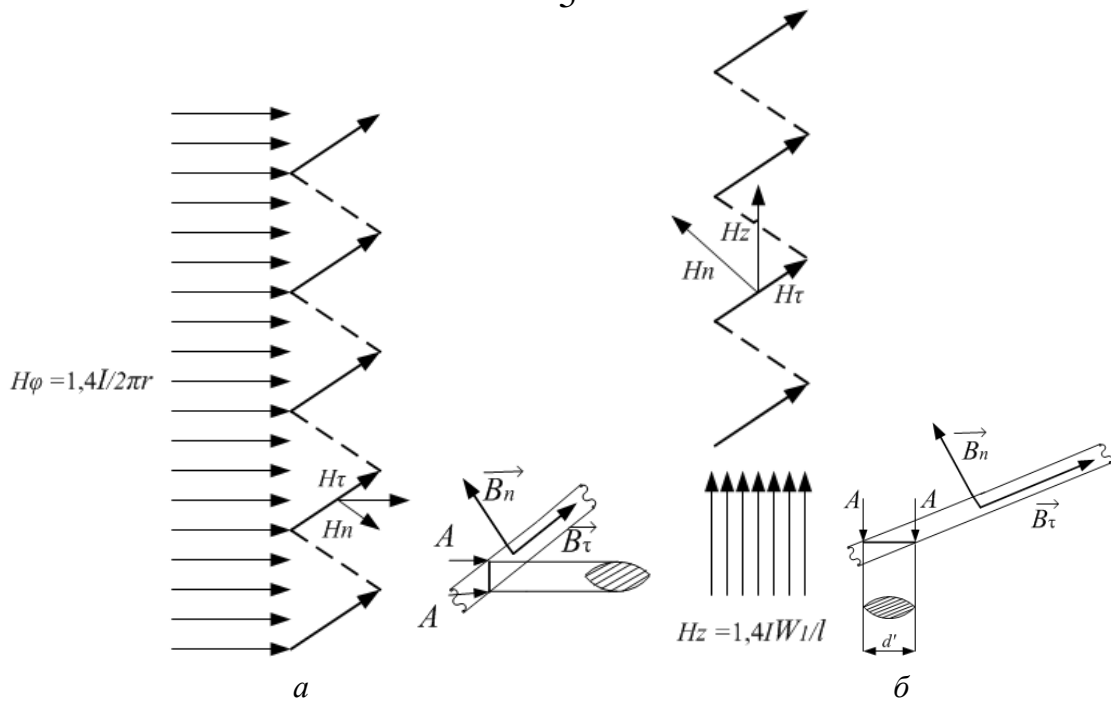


Рисунок 1 – Схема до виділення нормальної H_n та тангенціальної H_τ складових напруженості магнітного поля при збудженні аналітичних сигналів: *a* – поперечним полем жили кабелю; *б* – електромагнітним перетворювачем із повздовжнім магнітним полем

Обґрунтовані можливі способи розташування вимірювальних соленоїдів при збудженні аналітичних сигналів як повздовжнім, так і поперечним магнітними полями. При проведенні контролю в повздовжньому магнітному полі розташування вимірювальних соленоїдів було коаксіальним (по відношенню до намагнічуючих). В той же час, при збудженні аналітичних сигналів поперечним магнітним полем жили кабелю вимірювальний соленоїд розташовувався коаксіально, по відношенню до жили кабелю. Крім того, при намагнічуванні дроту поперечним полем жили кабелю, використовувалось два типи вимірювальних соленоїдів:

1. Витки соленоїда були розташовані перпендикулярно до жили кабелю.
2. Витки соленоїда були накладені під кутом до жили кабелю.

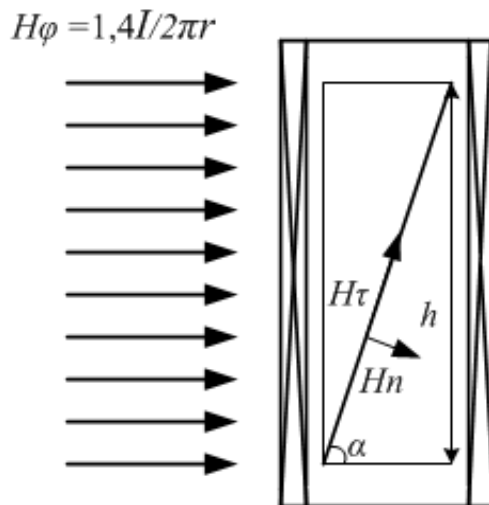


Рисунок 2 – Розгортка витка спірального дроту і розташування вимірювального соленоїда при збудженні аналітичних сигналів поперечним магнітним полем жили кабелю.

При проведенні контролю в повздовжньому магнітному полі значення напруженості магнітного поля необхідно вибирати таким чином, щоб дотична компонента повздовжнього поля дорівнювала відповідній компоненті поперечного поля, що відповідає номінальному струму жили кабелю. Значення відносної магнітної проникності, що виділена по відношенню до дотичної складової напруженості магнітного поля, в такому випадку не повинне перевищувати 300.

У **третьому розділі** для крайнього випадку накладання спірального дроту – прямолінійного провідника, отримані аналітичні вирази для визначення розподілу радіальної та тангенціальної напруженості магнітного поля та магнітної індукції по перерізу дроту при збудженні аналітичних сигналів поперечним полем жили кабелю. Для знаходження тангенціальної складової напруженості магнітного поля використовувався відомий вираз, що отримують розділяючи змінні в двомірному рівнянні Гельмгольца, відносно тангенціальної компоненти напруженості магнітного поля

$$H_{m\varphi} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{k(A_n \cos n\varphi + B_n \sin n\varphi)I'_n(kr)}{j\omega\mu}, \quad (1)$$

де $k = \sqrt{j\omega\mu\gamma}$, $I_n(kr)$ – модифікована функція Бесселя першого роду, порядку n . μ – абсолютне значення поперечної магнітної проникності прямолінійного дроту, ω – кутова частота. A_n, B_n – постійні інтегрування. Для визначення постійних A_n, B_n використовувались вирази:

$$A_0 = \frac{j\omega\mu}{2\pi k I'_0(ka)} \int_0^{2\pi} f(\varphi) d\varphi; \quad (2)$$

$$A_n = \frac{j\omega\mu}{\pi k I'_n(ka)} \int_0^{2\pi} f(\varphi) \cos(n\varphi) d\varphi; \quad (3)$$

$$B_n = \frac{j\omega\mu}{\pi k I'_n(ka)} \int_0^{2\pi} f(\varphi) \sin(n\varphi) d\varphi, \quad (4)$$

де $n = 1, 2, \dots, \infty$. $f(\varphi)$ – функція, що визначає граничну умову (розподіл тангенціальної компоненти напруженості магнітного поля по поверхні). В даному випадку при виборі граничних умов використовувались формули для визначення розподілу тангенціальної та радіальної компонент напруженості магнітного поля та магнітної індукції по поверхні екрану струмопроводу. Застосування цих формул тут є виправданим, із врахуванням однакової геометрії, з точки зору знаходження тангенціальної і радіальної компонент напруженості магнітного поля на поверхні суцільного дроту та циліндричного екрану, в наближенні двомірного магнітного поля. Для радіальної компоненти напруженості поперечного магнітного поля використовувались вирази:

$$H_{mr} = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(B_n \cos n\varphi - A_n \sin n\varphi) n I_n(kr)}{j\omega\mu r}; \quad (5)$$

$$B_n = - \frac{j\omega\mu a}{\pi n I_n(ka)} \int_0^{2\pi} f_2(\varphi) \cos(n\varphi) d\varphi; \quad (6)$$

$$A_n = \frac{j\omega\mu a}{\pi n I_n(ka)} \int_0^{2\pi} f_2(\varphi) \sin(n\varphi) d\varphi, \quad (7)$$

де $n = 1, 2, \dots, \infty$. При чисельних розрахунках, із використанням формул (1-7), в кожному випадку використовувалась обмежена кількість гармонік (до 300).

Застосування формул (1-7) дозволяє окремо враховувати внесок радіальної та тангенціальної компонент напруженості магнітного поля в сигнали перетворювача при намагнічуванні дроту поперечним магнітним полем жили кабелю, та при застосуванні вимірювальної обмотки із витками, що повернуті під кутом по відношенню до жили кабелю.

У **четвертому розділі** проведено експериментальне обґрунтування залежності характеристик параметричного електромагнітного перетворювача, а також напруги, наведеної на вимірювальних соленоїдах трансформаторного електромагнітного перетворювача, від кроку накладання спірального дроту. Вимірювальні соленоїди трансформаторного перетворювача підключались як зустрічно, так і погоджено. Намагнічуючі соленоїди підключались узгоджено та послідовно. Кількість витків намагнічуючих W_1 і вимірювальних W_2 соленоїдів складала 490, 580, 670. Крок спірального дроту, відповідно, становив 34 мм, 50 мм, 66 мм.

Напруженість магнітного поля, що дорівнює лінійної щільності струму в соленоїді (амплітудне значення), приймалась рівною 110 А/м. При вимірюваннях, враховуючи необхідність забезпечити однакову напруженість повздовжнього магнітного поля на поверхні зразків із різним кроком спіралі і різну кількість витків намагнічуючих соленоїдів (відповідно до збільшення кроку накладання спірального зразка) величина намагнічуючого струму, при збільшенні кроку накладання спіралі, зменшувалась у відповідності до формули

$$I_1 = \frac{H_0 l}{\sqrt{2} W_1}, \quad (8)$$

де l – довжина намагнічуючого соленоїда.

Для вторинного ланцюга, при узгодженому та зустрічному увімкненні вимірювальних соленоїдів, записувався наступний вираз

$$(M_1 \pm M_2) \frac{di_1}{dt} = u, \quad (9)$$

де M_1 – коефіцієнт взаємної індукції між намагнічуючим та вимірювальним соленоїдами, між якими відсутній досліджуваний зразок. M_2 – коефіцієнт взаємної індукції між намагнічуючим та вимірювальним соленоїдами при наявності спірального зразка, u – виміряне значення напруги. Невідомий коефіцієнт взаємної індукції M_2 знаходився із виразу

$$M_2 = \frac{U \pm M_1 \omega I_1}{\omega I_1} \quad (10)$$

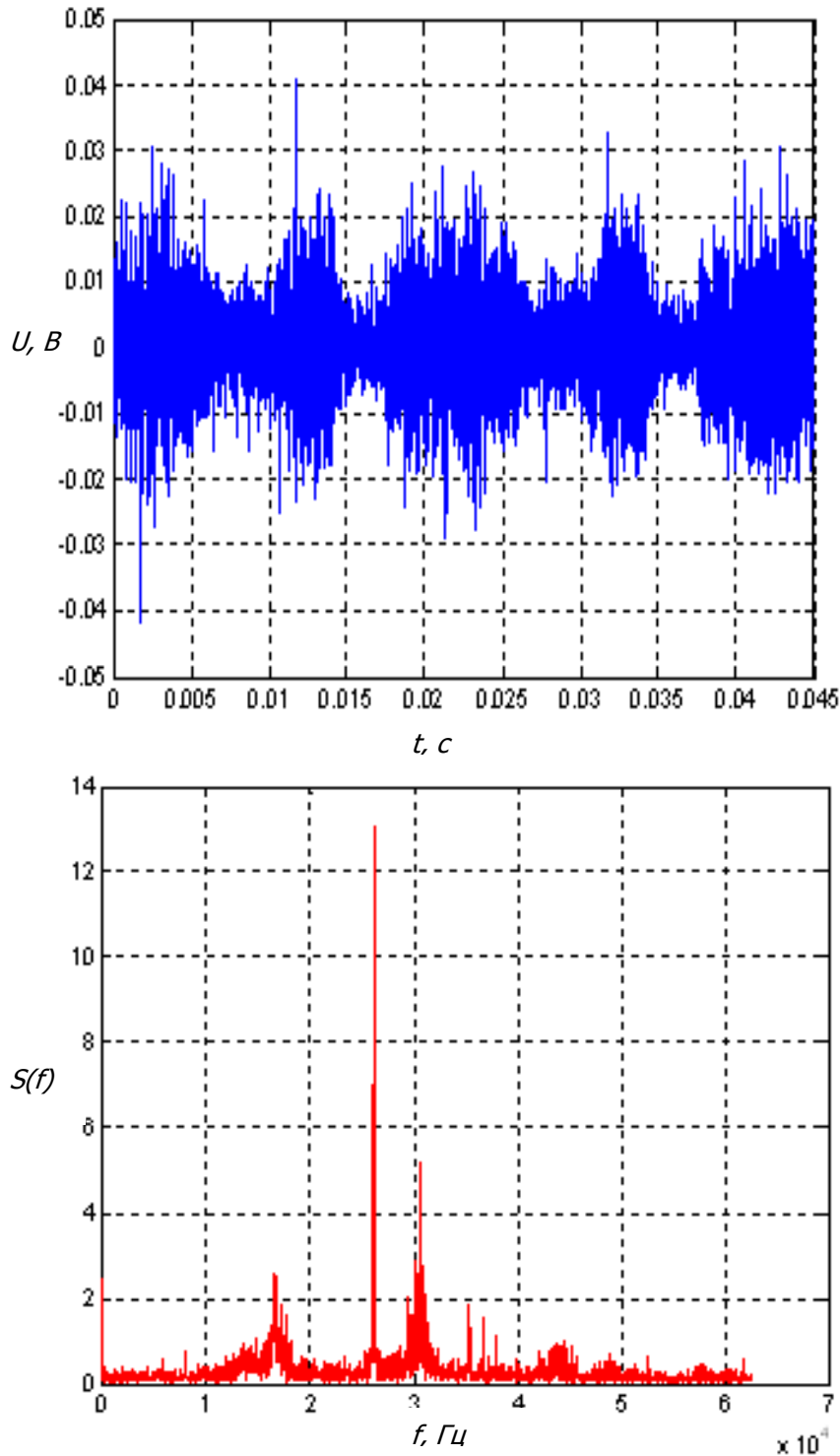


Рисунок 3 – Осцилограма напруги на вимірювальній частині схеми при зустрічному включенні вимірювальних обмоток і її амплітудний спектр.

Для описаної схеми, враховуючи вплив сторонніх електромагнітних завад та можливі певні розбіжності у виконанні вимірювальних та намагнічуючих соленоїдів, необхідно відзначити наявність деякого сигналу, навіть при зустрічному увімкненні вимірювальних соленоїдів та при відсутності досліджуваного зразка. Осцилограма такого сигналу та його амплітудний спектр наведені на рисунку 3 (для схеми із 670 витками

намагнічуючих та вимірювальних соленоїдів), при частоті 120 Гц. Коефіцієнт взаємної індукції M_2 , в даному випадку, величина – чутлива до збільшення впливу ефективної повздовжньої магнітної проникності спірального дроту на магнітний зв'язок між відповідною парою намагнічуючих та вимірювальних соленоїдів. На рисунку 4 наведені частотні залежності коефіцієнта взаємної індукції M_2 , розрахованого за (3), при узгодженому (крива 1), та зустрічному (крива 2), увімкненні вимірювальних соленоїдів.

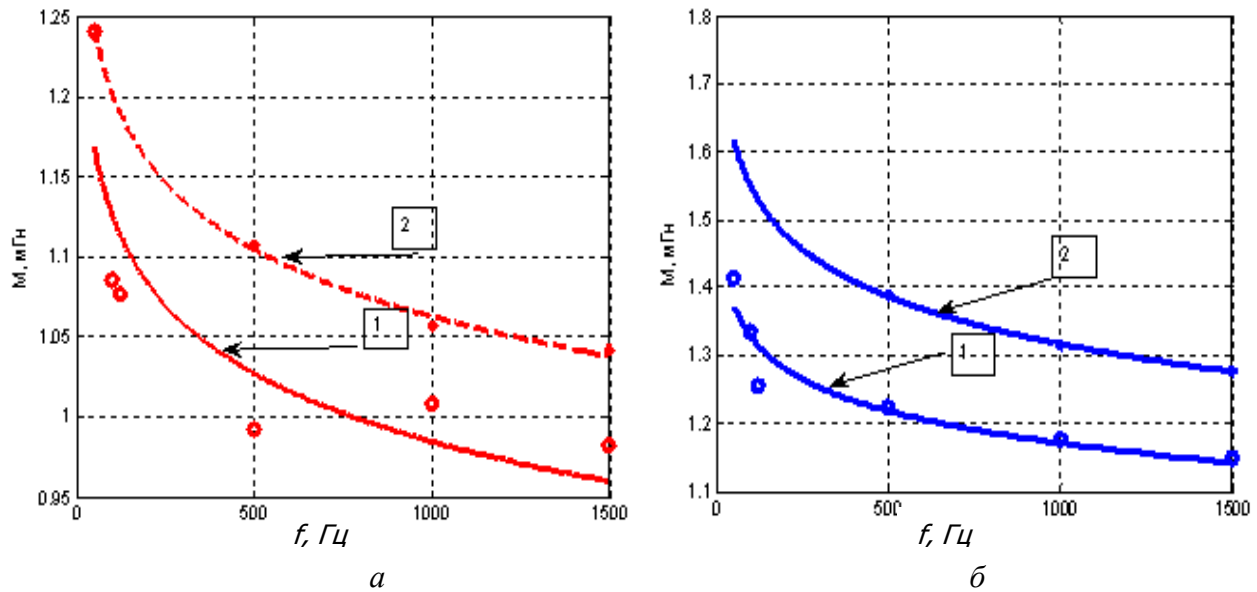


Рисунок 4 – Частотні залежності коефіцієнту взаємної індукції M_2 : a – для схеми із 490 витками намагнічуючих та вимірювальних соленоїдів; b – для схеми із 580 витками намагнічуючих та вимірювальних соленоїдів

Обґрунтування чутливості значення напруги, наведеної на вимірювальних соленоїдах, недоцільно проводити шляхом безпосереднього порівняння різних коефіцієнтів взаємної індукції M_2 , отриманих при різному кроці спірального зразка. Це обумовлене тим, що значення коефіцієнту M_2 визначається не лише величиною ефективної магнітної проникності (за рахунок її повздовжньої компоненти при збільшенні кроку спірального дроту), а й відповідним збільшенням кількості витків намагнічуючих та вимірювальних соленоїдів. В якості чутливих критеріїв, для обґрунтування залежності величини магнітного зв'язку від кроку накладання спірального дроту в даному випадку вибиралось відношення середнього арифметичного коефіцієнту взаємної індукції M_2 , визначеного при узгодженому та при зустрічному увімкненні вимірювальних соленоїдів, до кількості витків вимірювальних соленоїдів, а також відношення приросту коефіцієнту взаємної індукції M_2 , визначеного при узгодженому увімкненні вимірювальних соленоїдів до кількості витків вимірювального соленоїда. Частотні залежності запропонованих критеріїв наведені на рисунку 5

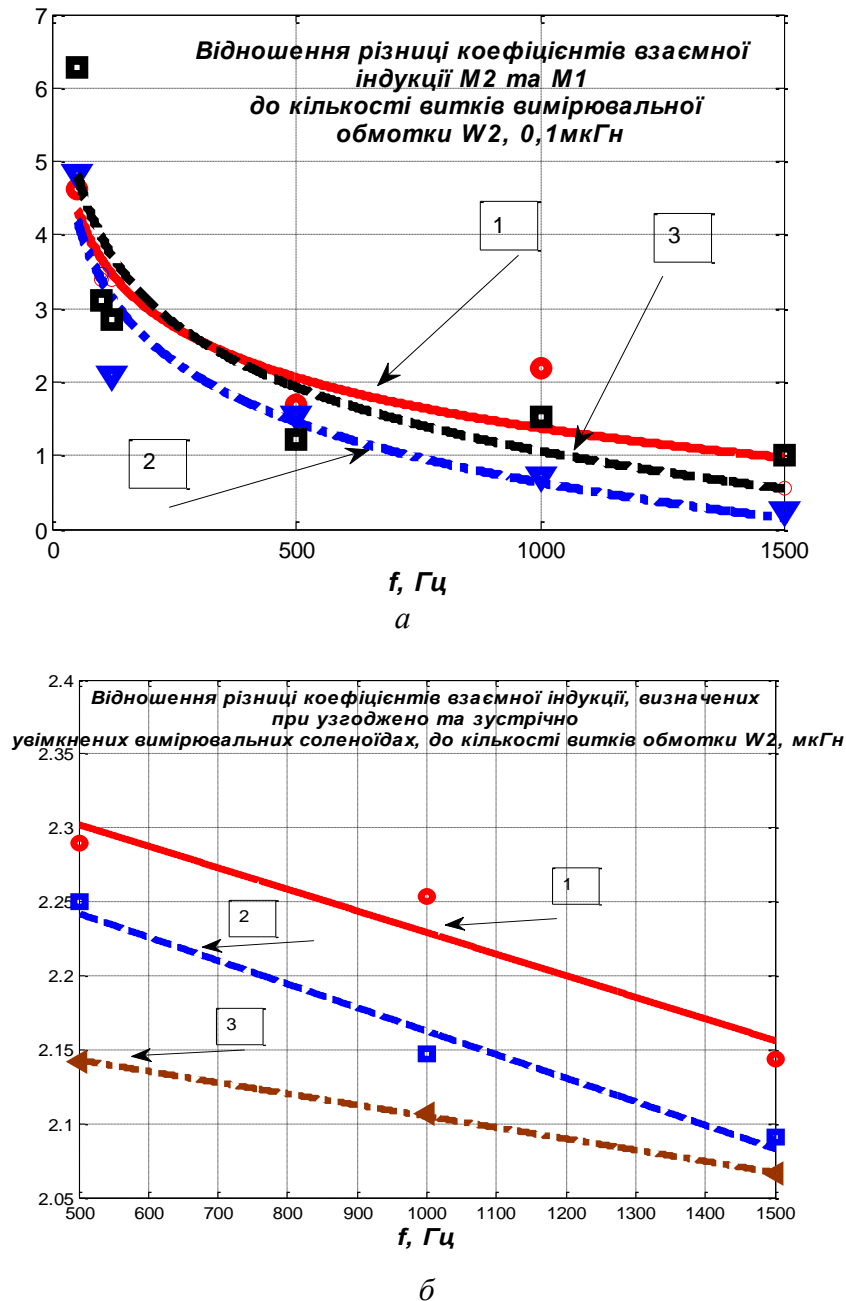


Рисунок 5 – Частотні залежності критеріїв для обґрунтування залежності величини магнітного зв'язку від кроку накладання спірального дроту

. Крива 1 проведена для схеми вимірювання із 670 витками намагнічуючих та вимірювальних соленоїдів, крива 2 проведена для схеми вимірювання із 580 витками намагнічуючих та вимірювальних соленоїдів, крива 3 проведена для схеми вимірювання із 490 витками намагнічуючих та вимірювальних соленоїдів. Із даних, наведених на рисунку 5, видно, що обґрунтування збільшення величини магнітного зв'язку між відповідною парою намагнічуючих та вимірювальних соленоїдів при наявності спірального зразка можна провести лише із застосуванням першого із запропонованих критеріїв. Не дивлячись на відповідне зменшення намагнічуючого струму при проведенні вимірювань, застосування цього критерію не може виключати впливу

збільшення кількості витків намагнічуючого соленоїда на величину магнітного зв'язку між соленоїдами. Обґрунтування впливу кроку накладання спірального зразка на величину повздовжньої магнітної проникності також проводилось на прикладі параметричного електромагнітного перетворювача. При вимірюваннях довжина прямолінійного дроту у всіх випадках співпадала із довжиною перетворювача. В даному випадку, за критерій впливу кроку накладання спірального дроту на характеристики параметричного перетворювача вибиралось відношення приросту індуктивності та активного опору перетворювача до його кількості витків, відповідно, N та K .

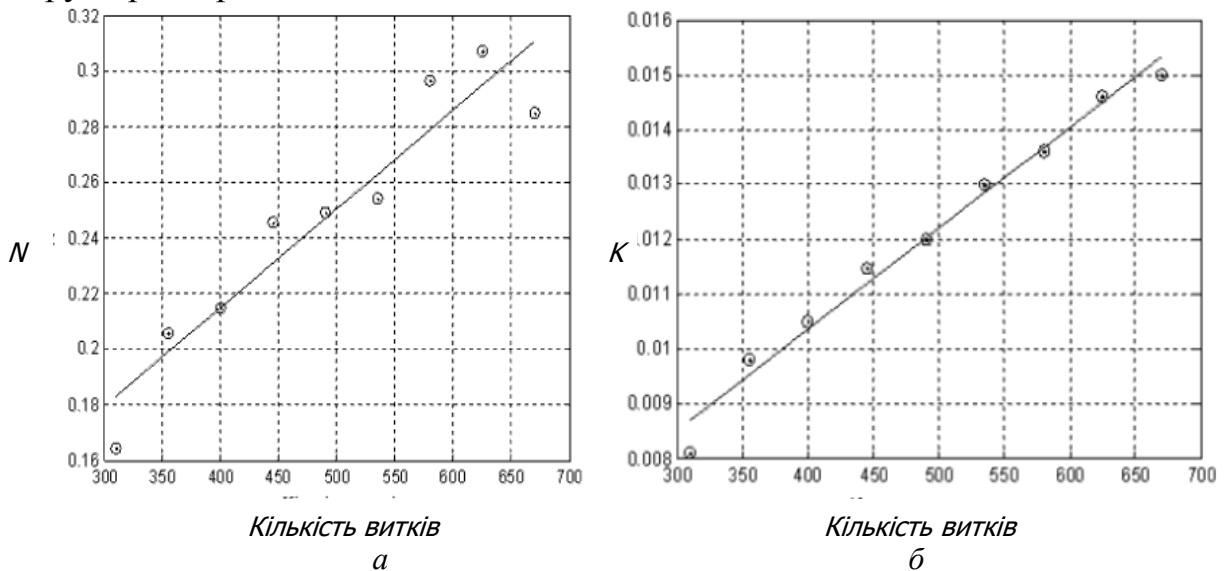


Рисунок 6 – Критерії для обґрунтування залежності характеристик параметричного електромагнітного перетворювача від кроку накладання спірального дроту: a – відношення приросту індуктивності до кількості витків при частоті 100 Гц; b – відношення приросту активного опору до кількості витків при частоті 100 кГц

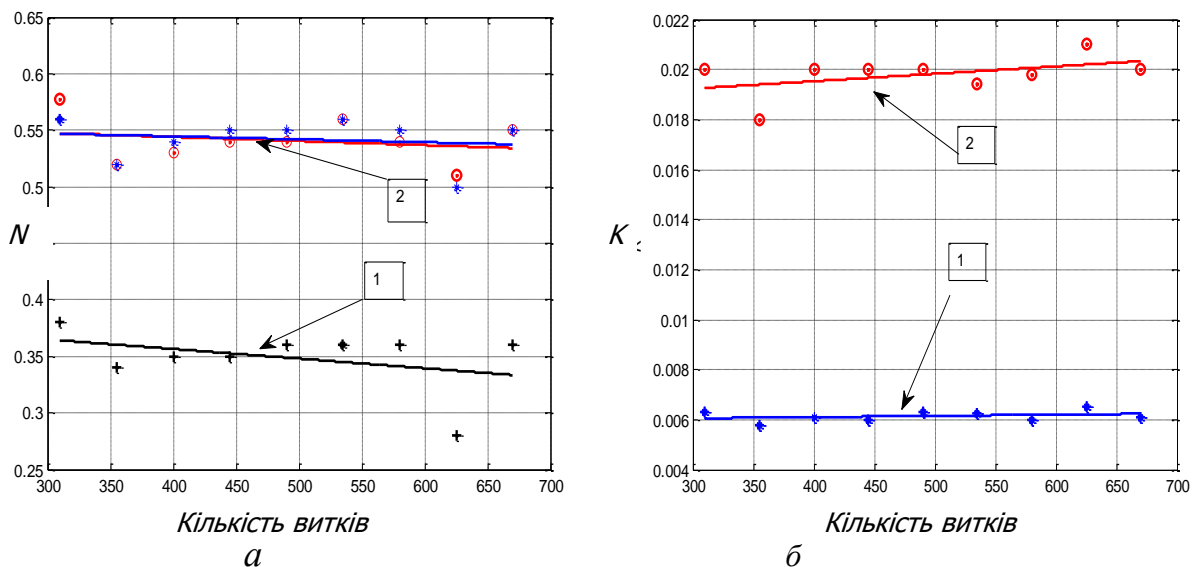


Рисунок 7 – Критерії для обґрунтування залежності характеристик параметричного електромагнітного перетворювача від кроку накладання спірального дроту при дослідженні прямолінійних зразків: a – відношення приросту індуктивності до кількості витків (1 – при частоті 1 кГц, 2 - при частотах 100 Гц та 120 Гц); b – відношення приросту активного опору до кількості витків (1 – при частоті 10 кГц, 2 - при частоті 100 кГц)

Вимірювання характеристик перетворювача проводились портативним цифровим вимірювачем імпедансу DE – 5000. Тестові частоти: 100 Гц, 120 Гц, 1 кГц, 10 кГц, 100 кГц. Рівень сигналу вимірювача складав 0,6 В. Діаметр твірного циліндра спіралі складав 11 мм. Діаметр спірального дроту складав 1,2 мм. Максимальний крок спіралі складав: 25 мм, 35 мм, 40 мм, 45 мм, 60 мм, 70 мм, 100 мм, 140 мм, 150 мм, відповідно, для кількості витків датчику $W_1 = 310$; $W_2 = 355$; $W_3 = 400$; $W_4 = 445$; $W_5 = 490$; $W_6 = 535$; $W_7 = 580$; $W_8 = 625$; $W_9 = 670$. Постійність запропонованих критеріїв для прямолінійного зразка, та їх зміна в сторону зростання при дослідженні спірального зразка, наприклад, для даних на рисунку 6, є фактором, що обумовлює залежність характеристик параметричного електромагнітного перетворювача від кроку накладання спіралі. Крім цього, в четвертому розділі запропонована схема для здійснення контролю ефективної магнітної проникності спірального дроту при збудженні аналітичних сигналів поперечним та повздовжнім магнітними полями. Практична реалізація запропонованого методу контролю проводилась на спіральному дроті із діаметром 1,2 мм, радіусом твірного циліндра спіралі 11 мм, та середнім кроком накладання 30 мм. При цьому, при проведенні вимірювань як в повздовжньому, так і в поперечному магнітному полі, використовувалось два типа вимірювальних обмоток:

1. Вісь яких співпадає, або паралельна до вісі твірного циліндра спіралі ($W_2 = 930$ витків).

2. Вимірювальні обмотки, що щільно охоплюють досліджуваний зразок ($W_3 = 1460$ витків).

Виходячи з аналітичних сигналів, що фіксуються з вимірювальних обмоток першого типу, можна робити висновки відносно величини ефективної магнітної проникності спірального дроту в повздовжньому чи в поперечному магнітному полі. Виходячи з аналітичних сигналів, що фіксуються з вимірювальних обмоток другого типу, можна робити висновки відносно величини магнітної проникності спірального дроту по відношенню до складової напруженості магнітного поля, що направлена по дотичній до дроту, в повздовжньому, чи в поперечному магнітному полі. Значення ефективної повздовжньої магнітної проникності спірального дроту (при відсутності врахування впливу шунтуючого магнітного потоку) отримувались шляхом порівняння фактично виміряних значень напруги на вимірювальних соленоїдах (при наявності зразка) із розрахованими теоретично (при відсутності зразка), із застосуванням формули

$$\mu_a = \frac{\Delta U l + \pi r^2 \mu_0 W_1 W_2 w I}{\pi r^2 \mu_0 W_1 W_2 w I}, \quad (11)$$

де ΔU – приріст напруги на вимірювальному соленоїді. Значення магнітної проникності спірального дроту по відношенню до тангенціальної складової напруженості магнітного поля (H_τ) знаходилось із застосуванням формули

$$\mu_\tau = \frac{\Delta U l + \pi R^2 \mu_0 W_1 W_3 \cos(90 - \alpha) w I}{\pi R^2 \mu_0 W_1 W_3 \cos(90 - \alpha) w I} \quad (12)$$

На рисунку 8 наведені частотні залежності напруги на вимірювальних соленоїдах.

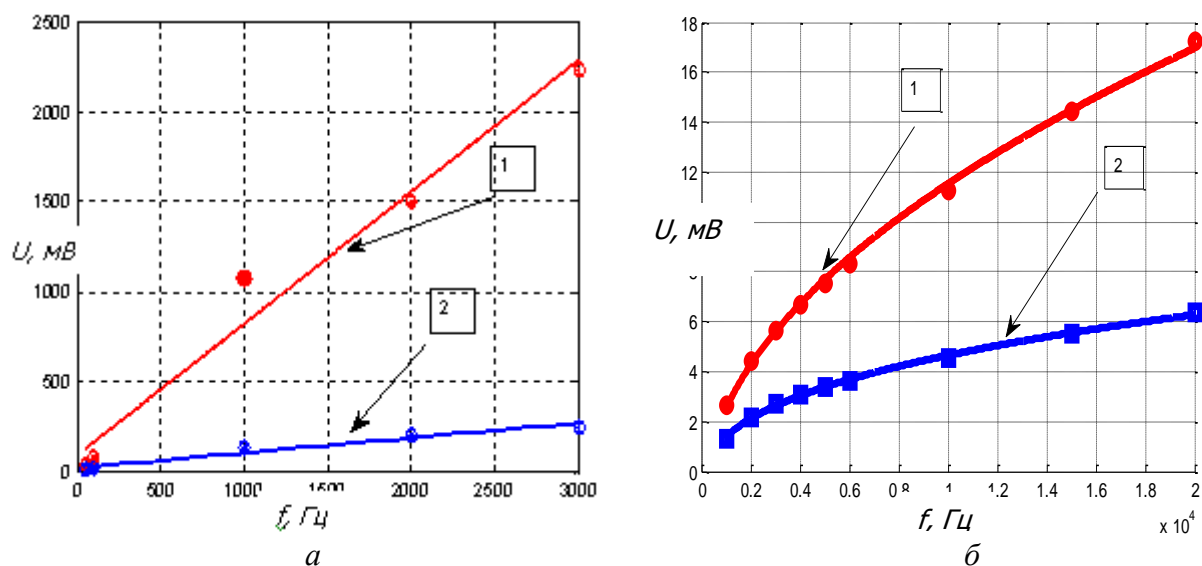


Рисунок 8 – Частотні залежності напруги на вимірювальних соленоїдах при збудженні аналітичних сигналів: *a* – повздовжнім магнітним полем (1 – напруга, на вимірювальному соленоїді, вісь якого паралельна до вісі твірного циліндра спіралі, 2 – напруга, на вимірювальній обмотці, що щільно охоплює досліджуваний зразок); *б* – поперечним магнітним полем (2 – напруга, на вимірювальному соленоїді, вісь якого паралельна до вісі твірного циліндра спіралі, 1 – напруга, на вимірювальній обмотці, що щільно охоплює досліджуваний зразок);

Значення ефективної магнітної проникності, знайдені за формулою (11) обумовлені не лише магнітними властивостями матеріалу а й наявністю певного шунтуючого магнітного потоку, який не перетинає переріз досліджуваного зразка, проте перетинає витки вимірювального соленоїда W_2 . Схема заміщення для визначення магнітного опору для магнітного потоку, який перетинає витки вимірювального соленоїда W_2 наведена на рисунку 9.

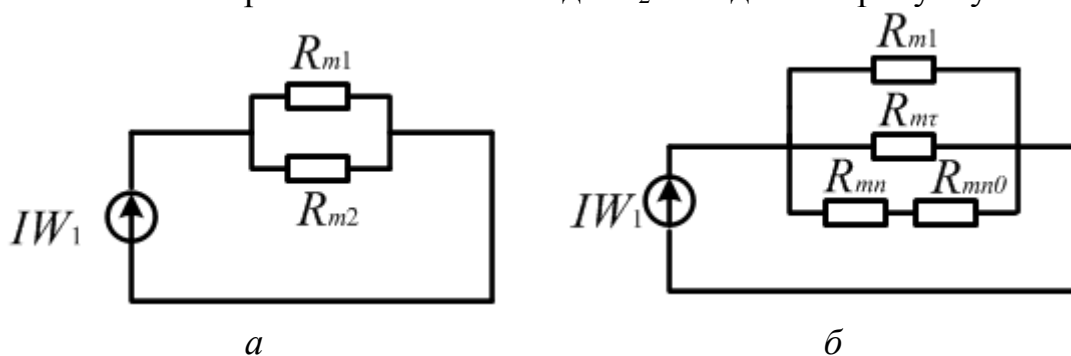


Рисунок 9 – Схема заміщення для визначення магнітного опору для магнітного потоку, що перетинає витки вимірювального соленоїда W_2 : *a* – при дослідженні прямолінійного дроту; *б* – при дослідженні спірального дроту.

На рисунку 9 R_{m1} – магнітний опір для частини магнітного потоку, що перетинає витки вимірювального соленоїда W_2 , проте не перетинає досліджуваний зразок; R_{m2} – магнітний опір для частини магнітного потоку, що

перетинає витки вимірювального соленоїда W_2 , і, крім того, перетинає досліджуваний зразок; $R_{m\tau}$ – магнітний опір по відношенню до тангенціальної складової магнітної індукції в досліджуваному зразку B_τ і, відповідно, до тангенціальної складової магнітного потоку; R_{mn} – магнітний опір по відношенню до нормальної складової магнітної індукції в досліджуваному зразку B_n і, відповідно, до нормальної складової магнітного потоку; IW_1 – намагнічуюча сила; R_{mn0} – магнітний опір по відношенню до нормальної складової магнітного потоку. Наявність останньої складової обумовлена тим, що нормальна складова магнітної індукції B_n лише частково, у відповідності із схемою наведеною на рисунку 1, перетинає зразок, після чого перетинає немагнітний проміжок. В такому випадку доцільно замінити спіральний феромагнітний дріт суцільним феромагнітним тілом більш простої геометричної форми. В даному випадку використовувалась апроксимація суцільним циліндром. Для визначення ефективної магнітної проникності дроту із врахуванням впливу шунтуючих магнітних потоків використовувалась формула, отримана шляхом визначення взаємної індукції між намагнічуючим соленоїдом (W_1) та вимірювальним соленоїдом (W_2) на основі використання схеми заміщення на рисунку 9 а.

$$\mu_{ef} = \frac{l_1 M_{12} - W_1 W_2 \mu_0 (S_{w2} - S)}{W_1 W_2 S} \quad (13)$$

де S – площа перерізу циліндра, яким замінювався спіральний зразок, S_{w2} – площа перерізу вимірювального соленоїда W_2 . M_{12} – коефіцієнт взаємної індукції між намагнічуючим соленоїдом W_1 та вимірювальним соленоїдом W_2 , який визначається експериментально.

Результати застосування формул (11), (12), (13), при проведенні контролю в повздовжньому полі, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Значення відносної ефективної магнітної проникності спірального дроту в повздовжньому магнітному полі без врахування впливу шунтуючого магнітного потоку μ_e , значення магнітної проникності спірального дроту по відношенню до дотичної складової напруженості магнітного поля μ_τ та значення ефективної магнітної проникності μ_{ef}

Відносна магнітна проникність	Частота, Гц				
	50	100	1000	2000	3000
μ_e	1,2	1,19	1,58	1,1	1,09
μ_τ	189	189	128	96	79
μ_{ef}	4,5	4	9	2,6	2,7

Певна нерівномірність зміни ефективної магнітної проникності із зростанням частоти обумовлена випадковими похибками вимірювання (наприклад, на рисунку 8 а при частоті 1000 Гц).

У **додатках** наведено акти впровадження результатів дисертаційної роботи на ПАО «Завод «Південкабель» і в навчальний процес кафедри «Електроізоляційна та кабельна техніка» НТУ «ХПІ». А також формули (за *Jackson*) для визначення коефіцієнтів втрат на вихрові струми в заземлених в

одній точці оболонках кабелів трьохфазної лінії, що використовувались при розрахунках, проведених в першому розділі.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу створення методу контролю ефективних магнітних властивостей феромагнітного дроту, із врахуванням особливостей його застосування в якості броні силових кабелів.

1. Розроблено метод контролю ефективної магнітної проникності спірального феромагнітного дроту броні одножильних силових кабелів в лабораторних умовах. В даному випадку контроль доцільно проводити за допомогою застосування джерел однорідного повздовжнього магнітного поля. Таким чином вдається моделювати як дотичну, так і нормальну компоненти напруженості магнітного поля, наявність яких характерна для роботи спірального дроту в поперечному полі жили кабелю. Застосування розробленого методу контролю дозволяє враховувати внесок поперечної магнітної проникності в ефективну магнітну проникність спірального дроту.

2. Обґрунтована чутливість характеристик параметричного електромагнітного перетворювача до кроку накладання спірального дроту при проведенні вимірювань в повздовжньому полі. В якості критеріїв для обґрунтування такої чутливості варто приймати відношення приросту індуктивності чи активного опору до кількості витків.

3. Сформульовані способи розташування вимірювальних обмоток при проведенні контролю в повздовжньому та поперечному магнітних полях. Максимум інформації про магнітні властивості спірального дроту вдається отримувати шляхом застосування двох типів вимірювальних обмоток. До першого типу відносяться обмотки, вісь яких співпадає, або паралельна до вісі твірного циліндра спіралі. До другого типу відносяться вимірювальні обмотки, що щільно охоплюють досліджуваний зразок. При цьому, таке розташування вимірювальних обмоток другого типу дає можливість робити висновки відносно магнітної проникності дроту по відношенню до дотичної складової напруженості магнітного поля.

4. Розроблено експериментальний стенд для збудження аналітичних сигналів в спіральному дроті броні, при використанні жили кабелю в якості джерела поперечного магнітного поля. Найбільш доцільним є застосування вимірювальної обмотки із витками, що накладені під певним кутом по відношенню до жили кабелю. При відносно невеликих частотах (50 Гц – 2 кГц для досліджуваних тут зразків) матеріал дроту працює в магнітостатичному режимі, при більших значеннях частоти необхідно враховувати зменшення взаємної індукції між жилою та вимірювальною обмоткою за рахунок екранування намагнічуючого поля.

5. Розроблена модель впливу шунтуючого магнітного потоку на результати контролю, при визначенні ефективної магнітної проникності в повздовжньому магнітному полі. Запропонована модель заснована на

визначенні взаємної індуктивності між намагнічуючим та вимірювальним соленоїдами при паралельному з'єднанні магнітних опорів для магнітного потоку в досліджуваному дроту (при його апроксимації суцільним циліндром) та шунтуючого магнітного потоку. Застосування зазначеної моделі дозволяє виключити вплив магнітного потоку через основу твірного циліндра спіралі на сигнали електромагнітного перетворювача і тим самим підвищити чутливість запропонованого методу.

6. Практичне значення результатів проведених досліджень полягає в розробці методу контролю ефективної магнітної проникності спірального ферромагнітного дроту броні в повздовжньому, магнітному полі, що дозволяє оцінювати вплив кроку накладання дроту броні на його ефективні магнітні параметри. Основні результати роботи впроваджено на ПАО «Завод «Південкабель» (м. Харків) – для впровадження рекомендацій щодо раціонального вибору кроку накладання дротяної броні, а також в навчальний процес кафедри електроізоляційної та кабельної техніки НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Костюков И. А.* Общие вопросы обеспечения электромагнитной совместимости силовых кабельных линий, их пропускная способность и способы конструктивного исполнения экранов / *И. А. Костюков* // *Электротехника і електромеханіка*. – Харків : Друкарня «Мадрид», 2013. – № 4. – С. 65–68.

2. *Костюков И. А.* Приближенная оценка радиальной составляющей магнитной индукции и напряженности магнитного поля в стальной проволоке брони силового кабеля / *И. А. Костюков* // *Вістник НТУ «ХП»*. – Харків : НТУ «ХП», 2013. – № 59 (1032). – С. 70–78.

3. *Костюков И. А.* Повышение точности при оценке компонент напряженности магнитного поля в стальной проволоке брони силового кабеля / *И. А. Костюков* // *Вісник НТУ «ХП»*. – Харків : НТУ «ХП», 2014. – № 20 (1063). – С. 39–46.

4. *Костюков И. А.* Исследование вносимых индуктивностей и активных сопротивлений при сканировании спиральной ферромагнитной проволоки полем параметрического вихретокового преобразователя. / *И. А. Костюков* // *Электротехника і електромеханіка*. – Харків: Друкарня Мадрид», 2014. – № 5. – С. 25–29.

5. *Костюков И. А.* Анализ спектров напряжения на измерительной обмотке трансформаторного вихретокового преобразователя. / *И. А. Костюков* // *Вісник НТУ «ХП»*. – Харків : НТУ «ХП», 2014. – № 41 (1084). – С. 87–91.

6. *Костюков И. А.* Экспериментальное определение продольной компоненты магнитного потока в ферромагнитной проволочной броне одножильного силового кабеля. / *И. А. Костюков* // *Электротехника і електромеханіка*. – Харків : Друкарня «Мадрид», 2014. – № 6. – С. 66–71.

7. *Костюков И. А.* Продольные и вихревые токи в экранах и оболочках одножильных силовых кабелей / *И. А. Костюков* // Электрические сети и системы. – Киев. : Гнозис, 2013. – № 5. – С. 76 – 80.

8. *Костюков І. О.* Математичне моделювання стаціонарних і нестаціонарних електрофізичних процесів в кабельній лінії, що складається з трьох однофазних кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену при різних схемах з'єднання екранів кабелів / *І. О. Костюков, С. Г. Ломов* // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : міжнар. наук.-техн. конф., 15-17 травня 2012 р. : тези допов.– Харків : НТУ «ХП». – 2012. – Ч. 2. – С. 213.

Здобувачем виконаний огляд та аналіз електромагнітних процесів, пов'язаних із протіканням повздовжніх та вихрових струмів в екранах (оболонках) силових кабелів в трьохфазних кабельних лініях.

9. *Костюков І. О.* Деякі аспекти впливу конструкції захисних елементів на тепловий режим кабельних ліній / *І. О. Костюков, С. Г. Ломов* // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : міжнар. наук.-техн. конф., 29-31 травня 2013 р. : тези допов.– Харків : НТУ «ХП». – 2013. – Ч. 2. – С. 205.

Здобувачем поставлена задача щодо розробки методу контролю впливу кроку накладання броні силового кабелю на його ефективну магнітну проникність.

10. *Костюков І. О.* Визначення внесених до параметричного вихрострумowego перетворювача індуктивностей, при різних кроках досліджуваного спірального дроту. / *І. О. Костюков* // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : міжнар. наук.-техн. конф., 15-17 жовтня 2014 р. : тези допов.– Харків : НТУ «ХП». – 2014. – Ч. 2. – С. 221.

АНОТАЦІЇ

Костюков І.О. Метод контролю ефективної магнітної проникності феромагнітного спірального дроту броні силових кабелів. На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовини. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2015 р.

Дисертацію присвячено розробці методу контролю ефективної магнітної проникності феромагнітного дроту спіральної форми броні силових кабелів.

Запропонований метод контролю ефективної магнітної проникності спірального дроту броні силових кабелів в повздовжньому магнітному полі. Показана чутливість параметричного електромагнітного перетворювача до кроку накладання спірального дроту. В якості критеріїв, чутливих до збільшення ефективної магнітної проникності при збільшенні кроку накладання

спірального дроту, доцільно приймати відношення приросту індуктивності та активного опору електромагнітного перетворювача до його кількості витків. Розроблено лабораторний стенд для збудження аналітичних сигналів повздовжнім та поперечним магнітними полями. Обґрунтовані можливі способи розташування вимірювальних соленоїдів при проведенні вимірювань в повздовжньому та в поперечному магнітному полі. Наведені формули, для визначення ефективної повздовжньої магнітної проникності спірального дроту та магнітної проникності, по відношенню до дотичної складової напруженості магнітного поля при проведенні контролю в повздовжньому магнітному полі.

Ключові слова: прилади неруйнівного контролю, електромагнітний перетворювач, ефективна магнітна проникність, методи збудження аналітичних сигналів, повздовжнє магнітне поле.

Костюков И.А. Метод контроля эффективной магнитной проницаемости спиральной ферромагнитной проволоки брони силовых кабелей. На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2015 г.

Диссертация посвящена разработке метода контроля эффективной магнитной проницаемости спиральной ферромагнитной проволоки брони силовых кабелей.

Предложен метод контроля эффективной магнитной проницаемости спиральной проволоки брони силовых кабелей в продольном магнитном поле, основанный на моделировании касательной и нормальной компонент напряженности магнитного поля, выделенных по отношению к поверхности проволоки, при ее работе в продольном зондирующем магнитном поле и в поперечном поле жилы кабеля. Показана чувствительность параметрического электромагнитного преобразователя к шагу наложения спиральной проволоки. В качестве критериев, чувствительных к увеличению эффективной магнитной проницаемости при увеличении шага наложения спирали, в данном случае, целесообразно принимать отношение приращения индуктивности и активного сопротивления электромагнитного преобразователя к его количеству витков.

Разработан лабораторный стенд для возбуждения аналитических сигналов, фиксируемых с измерительных обмоток, которые определенным образом охватывают исследуемый образец, продольным и поперечным магнитными полями. Согласно разработанному методу контроля информацию об электромагнитных характеристиках объекта контроля можно получать путем использования двух типов измерительных обмоток. К первому типу относятся обмотки ось которых параллельна к оси образующего цилиндра спирали. Ко второму типу относятся обмотки, которые плотно охватывают исследуемую проволоку.

Обоснованы возможные способы расположения измерительных соленоидов при проведении измерений в продольном и в поперечном магнитном поле. Максимум информации об электромагнитных свойствах проволоки в данном случае можно получать применяя два типа измерительных обмоток: ось которых совпадает или параллельна к оси образующего цилиндра спирали, а также обмоток которые плотно охватывают исследуемый образец. Приведены формулы для определения эффективной продольной магнитной проницаемости спиральной проволоки, а также магнитной проницаемости спиральной проволоки, выделенной по отношению к касательной компоненте напряженности магнитного поля, при проведении контроля в продольном магнитном поле. Разработана модель для определения влияния шунтирующего магнитного потока (через основание образующего цилиндра спирали) на результаты контроля. Применение указанной модели позволяет повысить чувствительность разработанного метода контроля, за счет нивелирования влияния шунтирующего магнитного потока на результаты измерений.

Ключевые слова: приборы неразрушающего контроля, электромагнитный преобразователь, эффективная магнитная проницаемость, методы возбуждения аналитических сигналов, продольное магнитное поле.

Kostiukov I.A. Method for control of effective magnetic permeability of spiral ferromagnetic wire of power cable armour. Manuscript.

Dissertation for scientific degree of candidate of technical sciences in speciality 05.11.13 – Instruments and methods of control and composition determination of substances. – National Technical University “Kharkiv Politechnical Institute”, 2015.

The dissertation is dedicated to the development of electromagnetic method for determination of effective magnetic permeability of spiral ferromagnetic wire that is used as power cable armour.

Proposed method for effective magnetic permeability control in uniform longitudinal magnetic field is based on modeling magnetic field components (with respect to the spiral wire) similar to the same components of transverse magnetic field caused by power cable core. Sensitivity of electromagnetic eddy-current transformer probe signals to the length of step of spiral wire is also shown. The laboratory stand for excitation of analytical signal in longitudinal and transverse magnetic fields is developed. Formulas for determination of effective magnetic permeability in longitudinal magnetic field and magnetic permeability with respect to the tangent component of longitudinal magnetic field are proposed.

Key words: devices for non-destructive control, electromagnetic probe, effective magnetic permeability, methods of analytical signals excitation, longitudinal magnetic field.



Підписано до друку 20.04.2015 р. Формат 60x84/16.
Папір офсетн. Друк – офсетний. Умовн. друк. арк. 0,9
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Замовлення № 25

Надруковано у копії-центрі «Моделіст»
(ФО-П Миронов М. В., Свідоцтво ВО4№022953)
м. Харків, вул. Червонопрапорна, 3 літер Б-1
Тел. 7-170-354
www.modelist.in.ua
