

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

БАРБАШОВА МАРІНА ВІКТОРІВНА



УДК 621.318

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ТОНКОСТІННИХ ЛИСТОВИХ МЕТАЛІВ У ТЕХНІЦІ
МАГНІТО-ІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ**

**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.

Робота виконана на кафедрі фізики у Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Гнатов Андрій Вікторович,
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, професор кафедри фізики.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бондаренко Володимир Омелянович,
Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
завідувач кафедри передачі електричної енергії

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

Захист відбудеться « 18 » червня 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 « 15 » травня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



С. М. Глоба

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Неруйнівний контроль на теперішній час займає важливе місце у технологічному процесі виробництва. Одним з важливіших питань розвитку сучасного виробництва є використання різних металів та їх сплавів, це обумовлено як економічними, так і технічними показниками (міцність, доступність в обробці і обслуговуванні, масо-габаритні показники та інші). Методи контролю активно використовуються на стадії вихідного контролю виготовлених матеріалів, заготовок та виробів.

Сучасні області промисловості, такі як автомобіле- та авіабудування, має високий рівень розвитку, тому в цих галузях досить широке застосування мають оброблювальні технології, а саме магнітно-імпульсна обробка металів. У зв'язку з цим перспективним є вирішення питань контролю основних робочих властивостей та параметрів об'єкту обробки, а саме електромагнітних характеристик (питомої електропровідності та магнітної проникності) металічного елементу конструкції автотранспорту. Від цього залежить вибір, як способу, так і методу самої обробки і, відповідно, якості, і ефективності обробки (ремонт, рихтування, відновлення). Рішення даної задачі для використання при магнітно-імпульсній обробці тонкостінних листових металів складно проводити за допомогою відомих методів і засобів контролю.

Таким чином, необхідність розробки нових рішень для контролю як електричних, так і магнітних характеристик, що дозволяють реалізувати на практиці виробничі програми по безпосередньому магнітно-імпульсному притяганню заданих ділянок тонкостінних листових металів, є актуальною науково-практичною задачею, яка визначила напрямок досліджень дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконувалася відповідно до тематики роботи кафедри фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. Здобувач, як виконавець, брав участь у науково-дослідних держбюджетних роботах МОН України: «Дослідження принципів можливостей магнітно-імпульсних технологій для розділення металевих та діелектричних об'єктів» (ДР № 0111U003524) та «Фізика електромагнітних технологій в автомобілебудуванні» (ДР № 0110U005847).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення методів контролю електромагнітних характеристик тонкостінних листових металів для використання при умовах магнітно-імпульсної обробки.

Для досягнення цієї мети в роботі поставлені наступні завдання:

- аналіз методів і засобів контролю електромагнітних характеристик – питомої електропровідності та магнітної проникності тонкостінних листових металів;
- провести теоретичні дослідження з контролю питомої електропровідності тонкостінних листових металів; розробити модельні схеми контролю електричного параметру листових провідників;
- удосконалити метод контролю магнітних проникностей тонкостінних листових металів для використання в магнітно-імпульсній обробці металів;
- провести експериментальну апробацію розроблених засобів контролю магнітної проникності та питомої електропровідності листових провідників. Виконати експеримент-

тальні дослідження для визначення електромагнітних характеристик тонкостінних листових металів в режимі робочих частот діючих магнітно-імпульсних полів.

Об'єкт дослідження – процеси взаємодії імпульсних електромагнітних полів з тонкостінними металами з різними електромагнітними характеристиками.

Предмет дослідження – методи і засоби контролю питомої електропровідності та магнітної проникності тонкостінних листових металів для використання при магнітно-імпульсній обробці.

Методи дослідження. Під час вирішення поставлених задач використані аналітичні методи розв'язання задач електродинаміки, чисельні методи лінійної алгебри, методи диференціального й інтегрального числення. Перевірка дієздатності розробленого методу контролю питомої електропровідності здійснювалося шляхом порівняння експериментальних досліджень на стенді установки з використанням зразків різної товщини з відомими параметрами. Перевірка методу контролю магнітних характеристик тонкостінних листових металів проводилася на експериментальному комплексі, за допомогою даних одержаних вимірювальними датчиками. Експериментальні дослідження проведені на базі лабораторії електромагнітних технологій кафедри фізики Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Наукова новизна отриманих результатів:

– вперше розроблено метод контролю відносної та динамічної магнітної проникності тонкостінних листових металів в режимі реального силового впливу імпульсних магнітних полів на задані ділянки оброблюваних об'єктів, що враховує високі значення напруженості магнітного поля ($\sim 10^6 \div 10^7 \text{ А / м}$);

– вперше розроблено для контролю питомої електропровідності тонкостінних листових металів метод зустрічних магнітних полів, що дозволяє проводити безконтактний контроль електричних характеристик оброблюваних об'єктів, при інтенсивному магнітно-імпульсному впливі;

– одержали подальший розвиток методи контролю електромагнітних характеристик тонкостінних листових металів, в умовах силового магнітно-імпульсного впливу, що враховують амплітудні значення та частотні характеристики збуджуваних полів, і їх залежність від магнітної проникності і питомої електропровідності оброблюваних металів.

Практичне значення одержаних результатів для машинобудування та ремонту і експлуатації транспортних засобів полягає в удосконаленні методів контролю електромагнітних характеристик тонкостінних листових металів націлених на підвищення ефективності магнітно-імпульсної обробки металевих зразків.

Розроблений лабораторний макет пристрою, що дозволяє безконтактно контролювати питому електропровідність тонкостінних листових металів за допомогою індукторів – джерел магнітного поля у вигляді тонкостінних провідних екранів.

Розроблений лабораторний стенд з контролю магнітних проникностей тонкостінних листових металів, який працює в режимі силового впливу імпульсних магнітних полів.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи підтверджується актами впровадження на базі Індустріальної Групи «У.П.Е.К.» (м.Харків) та СТО ЧП «Свистун Г. Д.» (м.Харків).

Результати дисертаційних досліджень використовуються в навчальному процесі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (дисципліна «Прогресивні технології в АТЗ»; курс «Фізика» розділ «Електромагнетизм і його додатки в

практиці сучасного ремонту транспортних засобів»), а також використані при розробці прогресивних технологій зовнішнього безконтактного усунення вм'ятин в кузовних елементах сучасного автотранспорту.

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: проведено аналіз методів і засобів контролю електромагнітних характеристик тонкостінних листових металів. Розроблено теоретичні фізико-математичні моделі взаємодії зустрічних магнітних полів двох соленоїдів для контролю питомої електропровідності. Отримані основні вирази для знаходження невідомої електропровідності листових металів при умові інтенсивного проникнення полів крізь метал. Розроблено фізико-математичну модель контролю магнітних характеристик листових феромагнетиків та отримані аналітичні вирази для їх визначення при силовому впливі імпульсних полів. Проведено експериментальні дослідження на металах з відомими параметрами та на реальних об'єктах (сталях кузовів автомобілів), які підтверджують теоретичні розрахунки, дієздатність та адекватність проведених в роботі досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися і отримали позитивну оцінку на: Міжнародній науково-технічній конференції «Автомобіль та електроніка. Сучасні технології» (Харків, 2011, 2013); II Всеукраїнська науково-технічній конференція «Теоретичні проблеми та прикладні аспекти сучасної технічної фізики» (Миколаїв, 2012); Міжнародному симпозиумі «Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. SIEMA 2012» (Харків, 2012); IX науковій конференції Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба «Новітні технології для захисту повітряного простору» (Харків, 2013); Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні напрями фундаментальних і прикладних досліджень» (Москва, Росія, 2013); V Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» MINTT – 2013 (Херсон, 2013); IV та V Всеукраїнських науково-практичних конференціях «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» СЕУТТОО (Херсон, 2013, 2014); X Mezinarodni vedecko-prakticka conference «Moderni vymozenosti vedy- 2014» Dil 39. Technicke vedy. (Прага, Чехія, 2014); X Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Strategiczne pytania swiatowej nauki - 2014» (Przemysl, Польща, 2014).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 13 наукових публікаціях, з них: 7 статей у наукових фахових виданнях України (3 - у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз), 1 - у закордонному періодичному фаховому виданні, 1 патент України, 5 – у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 197 сторінок; з них 26 рисунків по тексту; 4 таблиці по тексту; списку використаних джерел з 150 найменувань на 17 сторінках, 3 додатки на 30 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі, визначено об'єкт та предмет дослідження, описано застосовані методи дослідження та зв'язок роботи з

науковими темами, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, надано інформацію про апробацію та публікацію результатів дисертаційних досліджень.

У **першому розділі** проведено аналіз методів і засобів для контролю електромагнітних параметрів металів. На підставі огляду науково-технічної літератури щодо застосування методів і засобів неруйнівного контролю зроблено висновок, щодо їх удосконалення для використання при умовах магнітно-імпульсної обробки. Складним є контроль для металів товщиною меншою величини ефективної глибини проникнення поля, також складність визначення виникає з металами, що володіють магнітними властивостями і т.і. Рішення цих проблем дозволить ідентифікувати найважливіші характеристики процесу магнітно-імпульсної обробки, що визначають не просто ефективність, а практичні можливості технологій з використанням енергії сильних електромагнітних полів. На підставі проведеного аналізу сформовані основні завдання дисертаційної роботи.

У **другому розділі** проведено теоретичні дослідження з контролю електричної характеристики тонкостінних листових металів - питомої електропровідності.

Запропоновано метод «зустрічних» магнітних полів для контролю питомої електропровідності провідників. Сутність методу полягає в суперпозиції магнітних потоків двох незалежних джерел. На два листових зразка з зовнішніх сторін діють «зустрічні» магнітні поля. Термін «зустрічні» означає включення джерел магнітного поля, таким чином, щоб вектора напруженості були спрямовані протилежно, а їх амплітуди такі, щоб в просторі між зразками магнітний потік дорівнювався нулю. Джерелами «зустрічних» полів є два плоскі соленоїда (індуктор 1 та індуктор 2), які розташовані на зовнішніх поверхнях двох металевих зразків (рис. 1). Один з металічних листів є «контрольним» з відомими товщиною і питомою електропровідністю – d_1 і γ_1 , відповідно. Для другого зразка відома тільки його товщина – d_2 , а питома електропровідність γ_2 підлягає визначенню.

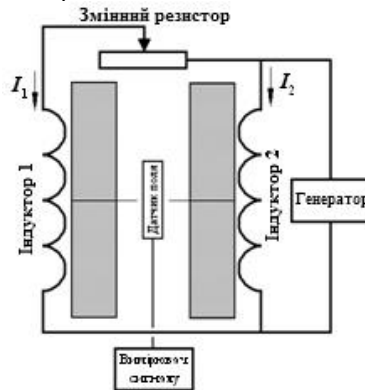


Рисунок 1 – Схема контролю питомої електропровідності плоских листових металів

Для практичної реалізації даної пропозиції по безконтактному контролю питомої електропровідності визначено такі питання:

- вибір конструктивного виконання джерел магнітного поля (індукторів) для збудження плоских магнітних полів, що забезпечують максимум наближення до ідеалізації плоских електромагнітних хвиль;
- отримання робочих співвідношень для контролю невідомої електропровідності, що враховують взаємний вплив провідних конструктивних елементів у реальних вимірювальних системах;

• можливість визначення питомої електропровідності феромагнітних листових металів, умов і робочих співвідношень.

Для вирішення цих питань проведено теоретичні дослідження трьох фізико-математичних моделей з контролю питомої електропровідності тонкостінних листових металів (схема представлена на рис.1):

1. Безконтактний контроль питомої електропровідності немагнітного металу, коли «зустрічні» поля збуджуються масивними соленоїдами - індукторами, обмотки яких виконані з «ідеальних» провідників. Шляхом рішення рівнянь Максвелла, при умовах ненульових тангенціальних складових векторів електромагнітного поля, для даної системи зроблено висновки:

• якщо струми в обмотках соленоїдів рівні і однаково направлені (однакова спрямованість струмів відповідає протилежній спрямованості магнітних потоків в просторі між ними), поле у внутрішній порожнині системи звертається в нуль;

• невідома питома електропровідність металевого листа товщиною d_2 знайдена з виразу

$$\gamma_2 \approx \frac{\gamma_1 \cdot d_1}{d_2} \cdot \frac{H_{2m}}{H_{1m}}, \quad (1)$$

де H_{1m} – амплітудне значення напруженості магнітного поля на граничній поверхні металевого листа – (d_1, γ_1) з боку індуктора 1; H_{2m} – амплітудне значення напруженості магнітного поля на граничній поверхні металевого листа – (d_2, γ_2) з боку індуктора 2.

2. Безконтактного контроль питомої електропровідності листового феромагнетика в системі з індукторами, обмотки яких «прозорі» для збуджуваних магнітних полів. Обмотки індукторів не впливають на характер протікання електромагнітних процесів.

Вимірювальний комплекс складається (рис.1) з паралельно розміщених плоского індуктора - 1, першого немагнітного листового металу (з боку індуктора - 1), другого листового магнітного металу (з боку індуктора - 2) і плоского індуктора - 2. Всі складові комплексу розділені діелектричними проміжками. Індуктори - 1 і 2 підключаються до окремих джерел живлення. Варіюючи параметри сигналів в обмотках індукторів, можна домогтися нульового поля в просторі між листами (індикація проводиться, наприклад, за допомогою котушкового індукційного вимірювача в центральній порожнині між листами).

Немагнітний метал є «контрольним» з відомими параметрами: електропровідністю γ_1 , магнітною проникністю – $\mu_1 \approx \mu_0$ (μ_0 – магнітна проникність вакууму) і товщиною d_1 . Другий листовий метал має відому товщину – d_2 , але невідомі електропровідність – γ_2 і магнітною проникністю – μ_2 .

Шляхом рішення рівнянь Максвелла, при умовах ненульових тангенціальної складової вектора напруженості електричного поля, а також дотичної і нормальної компоненти вектора напруженості магнітного поля, отримано вираз для визначення невідомої питомої електропровідності феромагнетика

$$\gamma_2 \approx \frac{\gamma_1 \cdot d_1}{d_2} \cdot \frac{I_{2m}}{I_{1m}}, \quad (2)$$

де I_{1m}, I_{2m} – амплітудне значення струму в індуктори 1 і 2, відповідно.

Таким чином, залежність (2) визначає, що магнітні властивості досліджуваного зразка не впливають на результати контролю електропровідності запропонованим методом при досить низьких частотах сигналів в обмотках індукторів.

3. Безконтактний контроль питомої електропровідності листового феромагнетика за допомогою «зустрічних» магнітних полів в системі з індукторами, обмотки яких представляються тонкостінними провідними шарами, що відділяють систему від вільного півпростору. Дана модель представляється адекватною для можливості її технічної реалізації, оскільки дозволяє кількісно врахувати вплив металу обмоток на електромагнітні процеси, а також на вигляд робочих співвідношень для контролю невідомої питомої електропровідності досліджуваного зразка.

Працездатність запропонованого способу залежить від багатьох факторів. Але обов'язковою серед них є низькочастотний режим, що забезпечує достатню «прозорість» елементів системи для діючих полів, що означає їх інтенсивне проникнення крізь листові метали і обмотки індукторів.

Основним результатом проведеного аналізу є те, що при вирішенні рівняння Максвелла для даної фізико-математичної моделі отримано вираз, який вказує на можливість контролю питомої електропровідності як магнітного, так і немагнітного металу. Якщо прийняти, що часові залежності струмів в обмотках індукторів однакові, відмінні тільки їх амплітуди – $I_{1,2m}$, то

$$\gamma_2 = \left(\frac{\gamma_1 \cdot d_1}{d_2} \right) \cdot \left(\frac{I_{2m}}{I_{1m}} \cdot \left(1 + \frac{\gamma_i d_i}{\gamma_1 d_1} \right) - \frac{\gamma_i d_i}{\gamma_1 d_1} \right), \quad (3)$$

де γ_i, d_i – питома електропровідність і товщина металу обмотки індукторів, які представлені тонкостінними провідними шарами.

Метод «зустрічних магнітних полів» дозволяє контролювати питому електропровідність тонкостінних листових феромагнітних зразків, причому у випадку «абсолютно прозорих» обмоток індукторів робоче співвідношення для питомої електропровідності включає не напруженості магнітних полів на зовнішніх границях листових металів, а струми, які збуджують систему.

У третьому розділі запропоновано метод контролю магнітних характеристик тонкостінних листових зразків при використанні в магнітно-імпульсній обробці металів.

Сутність методу полягає у наступному: у тілі феромагнітної листової заготовки від центру до периферії виконуються два прямокутні вирізи. Їх взаємне розташування: або по радіусах під прямим кутом, або по діаметру в протилежні сторони (рис. 2). В одному з них повністю видалений метал і замість вилученого металу кріпиться плоска прямокутна вставка з діелектрика. В іншому залишена смужка металу. Поперечні розміри вставки і металевої смужки такі, що на них можна надіти вимірювальний індукційний датчик, що представляє собою багатовитковий котушковий зонд, виконаний на порожнистому діелектричному каркасі.

Феромагнітна листовая заготовка з вирізом встановлюється на робочу поверхню індуктора - інструменту магнітно-імпульсного притягання. У режимі силового впливу, індуквані електричні сигнали з обмоток ідентичних датчиків безпосередньо або через інтегратор подаються на вхід осцилографа. Відношення сигналів з обмоток датчиків дасть величину магнітної проникності феромагнітної заготовки в режимі реального імпульсного силового впливу.

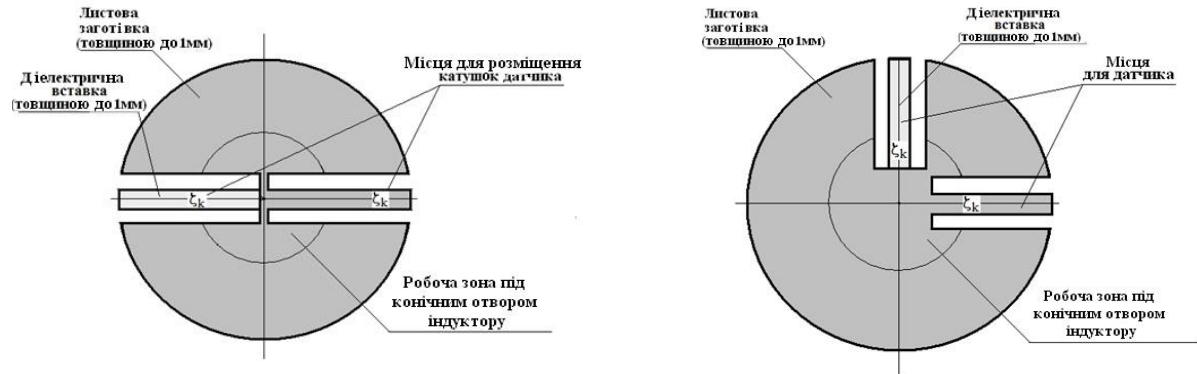


Рисунок 2 – Об'єкт дослідження (ферромагнітна листова заготовка)

Достовірність робочих співвідношень повинна підтверджуватися фізично обґрунтованою коректною постановкою завдань і досить строгими математичними викладками. Тому для отримання аналітичних виразів використані фундаментальні залежності, що описують процеси в теорії електромагнітного поля – рівняння Максвелла та матеріальні зв'язки між характеристиками полів.

Для оцінки інтегральних характеристик, які описують процес загалом, проведено усереднення по часу і просторовим координатам – $\{t, \zeta_k\}$.

У результаті рішення динамічна (μ_H) і відносна (μ_r) проникності є функцією часу і координати розташування обмотки вимірювача. Це означає, що магнітні характеристики повинні описуватися просторово-часовим розподілом в оброблюваних заготовках.

Усереднення магнітних характеристик по просторовим змінним проведено з урахуванням функціональних залежностей від дискретних значень узагальнених координат – ζ_k , фіксує місця розташування датчиків у робочій зоні індукторної системи

$$\bar{\mu}_H = \frac{\sum_{k=1}^N \left(\int_0^T \varepsilon_{\mu_r \neq 1}(t, \zeta_k) \cdot dt \right)}{\sum_{k=1}^N \left(\int_0^T \varepsilon_{\mu_r = 1}(t, \zeta_k) \cdot dt \right)}, \quad (4)$$

де $\varepsilon_{\mu_r \neq 1}(t, \zeta_k)$ - збуджувана ЕРС у котушці датчика, розміщеного на діелектрику; $\varepsilon_{\mu_r = 1}(t, \zeta_k)$ - збуджувана ЕРС у котушці датчика, розміщеного на заготовці; N – число точок розташування обмоток датчика; T – тривалість імпульсу;

$$\bar{\mu}_r = \frac{\sum_{k=1}^N \left[\int_0^T \left(\int_0^x \varepsilon_{\mu_r \neq 1}(t, \zeta_k) \cdot dx \right) dt \right]}{\sum_{k=1}^N \left[\int_0^T \left(\int_0^x \varepsilon_{\mu_r = 1}(t, \zeta_k) \cdot dx \right) dt \right]}. \quad (5)$$

Формули (4) і (5) являють собою співвідношення для розрахунку середніх значень магнітних характеристик листових заготовок в МІОМ.

Робочі співвідношення приведені до виду, що дозволяють характеризувати як просторово-часову залежність проникностей, так і давати інтегральну інформацію про магнітний стан обробленої заготовки за усередненими показниками магнітних властивостей її металу.

За допомогою даного методу контролю магнітних параметрів встановлюється швидкість зміни відносної магнітної проникності у функціональній залежності від напруженості, що дозволяє апроксимувати поведінку фундаментальної характеристики феромагнетика в області більш сильних полів.

Відмінні особливості запропонованого методу полягає у простоті, що пов'язана з використанням добре відомих індукційних датчиків магнітного поля, а також можливість контролю магнітних характеристик листових металів з товщиною, набагато меншою ефективною глибини проникнення поля у відповідне провідне середовище, в полях з напруженістю, відповідної робочим режимам магнітно-імпульсної обробки металів.

У **четвертому розділі** проведено експериментальні дослідження та практична апробацію запропонованих методів контролю електромагнітних характеристик тонкостінних листових металів в режимі реальних робочих частот діючих полів.

Перша частина експериментів присвячена контролю магнітних характеристик листових феромагнетиків. Об'єкт досліджень – заготівка з тонкостінної листової сталі автомобіля «Citroen» товщиною $\sim 0,001\text{м}$ з вирізами, що дозволяють розміщення котушок індукційних датчиків. В одному з вирізів зберігається металевий виступ (рисунок 3а, праворуч), у другому - кріпиться діелектрична вставка (рисунок 3а, ліворуч). Індукційний датчик через інтегратор (рисунок 2б) підключається до осцилографа.

Обладнання – магнітно-імпульсна установка МІУС-2, створена в лабораторії електромагнітних технологій Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, узгоджувальний пристрій і одновиткова індукторна система з внутрішнім отвором конічної форми (рисунок 4). Порожнина отвору – робоча зона інструменту.

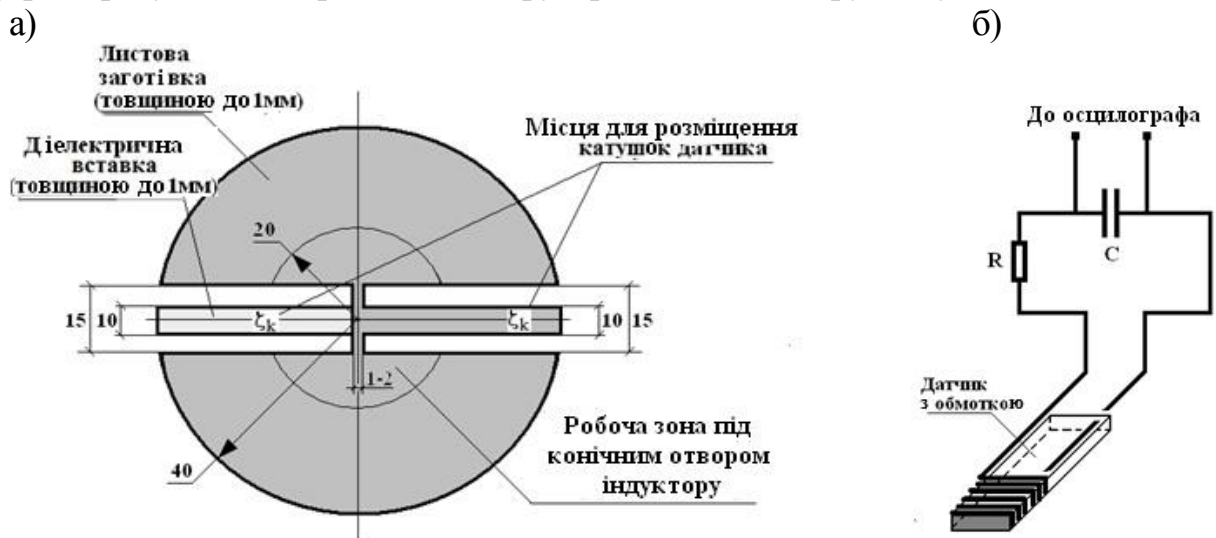


Рисунок 3 – Об'єкт дослідження та схема підключення індукційного датчика в експерименті з контролю магнітних характеристик у МІОМ

а) – ескіз листової заготівки; б) – схема підключення індукційного вимірювача (через інтегратор)



Рисунок 4 – Експериментальне обладнання

а) – магнітно-імпульсна установка МІУС - 2 (зверху – виносний інструмент в захисному корпусі з кабельним підключенням); б) – масивний одновитковий індуктор з внутрішнім отвором конічної форми

Порівняльна достовірність проведених вимірювань забезпечувалася використанням одного індукційного датчика, переміщуваного по виступах від однієї виділеної точки до іншої. Експерименти проводилися в режимі одноразових розрядів ємнісного накопичувача (листові зразка не деформувалися).

Перші експерименти проводилися для двох значень напруги на ємнісному накопичувачі: $U \approx 900\text{В}$ і $U \approx 1800\text{В}$. Обраний діапазон енергій повинен проілюструвати диференціацію магнітних властивостей досліджуваного зразка в режимах, коли при багаторазовому повторенні силових впливів в залежності від їх кількості мало місце поява вм'ятин різної глибини.

Кінцеві результати контролю магнітних характеристик досліджуваного зразка при магнітно-імпульсній дії зведені в таблицю 1.

Таблиця 1 – Результати визначення магнітних характеристик досліджуваного зразка

$\frac{r}{R}$	Відн. магнітна проникність, $\bar{\mu}_r(\zeta_k)$, $U = 900\text{В}$	Динам. магнітна проникність, $\bar{\mu}_H(\zeta_k)$, $U = 900\text{В}$	Відн. магнітна проникність, $\bar{\mu}_r(\zeta_k)$, $U = 1800\text{В}$	Динам. магнітна проникність, $\bar{\mu}_H(\zeta_k)$, $U = 1800\text{В}$
0,2	2,40	2,50	1,26	1,55
0,4	2,17	2,34	1,33	1,85
0,6	1,88	2,54	1,30	1,49
0,8	1,81	2,40	1,27	1,52
1,0	1,87	2,47	1,37	1,60
Сер. величини	$\bar{\mu}_r \approx 2,026$	$\bar{\mu}_H \approx 2,45$	$\bar{\mu}_r \approx 1,306$	$\bar{\mu}_H \approx 1,602$

За максимумами напруги на виході інтегратора в фіксованих точках робочої зони визначені амплітудні значення напруженості магнітного поля (рис.5). Виявлено, що максимальна напруженість магнітного поля (тангенціальна складова) складає $\sim 1,25 \cdot 10^6 \text{А/м}$, а усереднена по радіусу $\sim 1,05 \cdot 10^6 \text{А/м}$. Дані величини служать орієнтиром для оцінки амплітуди збуджуваного поля, достатнім для подолання межі пластичності металу оброблюваного листового феромагнетика і його деформування притяганням до індуктора.

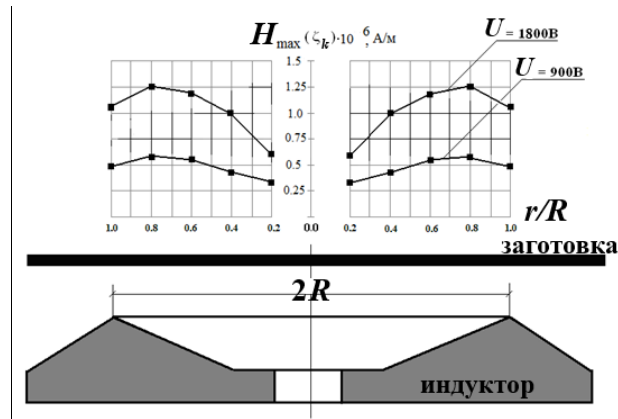


Рисунок 5 – Радіальний розподіл напруженості збуджуваного магнітного поля в робочій зоні індукторної системи при різних значеннях напруги

Характер і поведінку залежності магнітної проникності від напруженості фізично повністю узгоджується із залежністю, яка представлена у фундаментальних роботах з досліджень феромагнетиків (наприклад, в монографії Я. Туровського), а також з чисельною апроксимацією для магнітної проникності при амплітудах напруженості збуджуваного поля, характерних для МІОМ.

Проведено аналіз усередненої динамічної проникності

$$d\bar{\mu}_r(\bar{H})/d\bar{H} = 1/\bar{H} \cdot [\bar{\mu}_n(\bar{H}) + \bar{\mu}_r(\bar{H})]. \quad (6)$$

Вираз визначає першу динамічну характеристику поведінки магнітних властивостей, а саме, «швидкість» зміни проникності при варіації напруженості поля в індукторній системі. Результати дослідження цієї поведінки показали, що абсолютна величина швидкості зміни магнітної проникності досить мала. При наближенні до амплітуди поля, коли має місце деформування, перша похідна змінюється досить слабо, що означає збереження значення відносної магнітної проникності, близького до одиниці, але відмінного від неї. Дане твердження узгоджується з простими фізичними міркуваннями.

В таблиці 2 наведено результати контролю для сталей обшивок автомобілів американського концерну «Ford Motor Company». У порівнянні з аналогами для європейської фірми «Citroen» ці дані дають деяке узагальнююче уявлення про магнітних характеристиках сталей, застосовуваних у світовому автомобілебудуванні.

Таблиця 2 – Результати визначення магнітних характеристик сталей обшивок автомобілів

Марка сталі	Усеред. відн. магн. проникність в робочій зоні інструменту, $\bar{\mu}_r _{U=900B}$,	Усеред. відн. магн. проникність в робочій зоні інструменту, $\bar{\mu}_r _{U=1800B}$,
IF	2.25	1.36
BH 210	2.188	1.41
BH 240	2.334	1.44
Усередн. по маркам сталей	$\bar{\mu}_r \approx 2.26$	$\bar{\mu}_r \approx 1.4$

Порівняння цих даних та інформації з таблиці 1 для сталі автомобільної обшивки фірми «Citroen» показує, що відносна магнітна проникність сталевих обшивок сучасних автомобілів, що випускаються як американськими, так і європейськими виробниками, в режимі магнітно-імпульсного притягання приблизно однакова і приймає значення в інтервалах: $\bar{\mu}_r|_{U=900\text{В}} \in [2.026, 2.26]$ і $\bar{\mu}_r|_{U=1800\text{В}} \in [1.306, 1.4]$.

При магнітно-імпульсному притяганні тонкостінних листових феромагнетиків, величина відносної магнітної проникності оброблюваних металів відмінна від одиниці, що відповідає повному насиченню, і приймає значення в діапазоні $\mu_r \geq 1.3$.

Друга частина експериментальних досліджень присвячена контролю питомої електропровідності тонкостінних листових металів.

Експериментальний лабораторний стенд представлений наступними складовими: а) індукторна система з двох джерел магнітного поля і двох листових металів; б) блок елементів, що включає схему подачі живлення від джерела потужності до індукторів, дротяні реостати для регулювання струму та вимірювальні шунти; в) джерело потужності; г) система для контролю напруженості магнітного поля в робочих зонах системи.

Схема експериментального комплексу (система для безконтактного контролю питомої електропровідності листових металів) представлена на рисунку б.

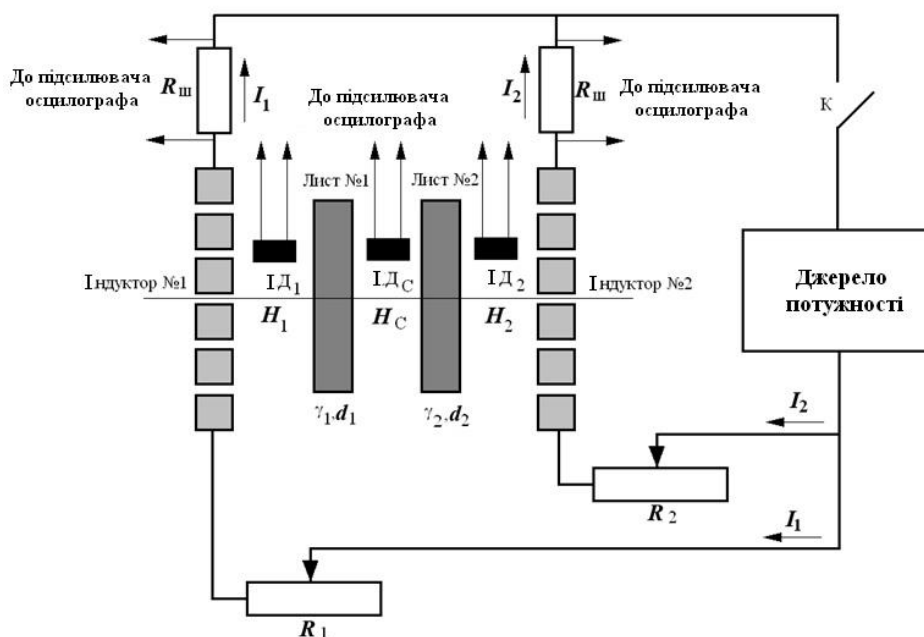


Рисунок б – Схема експериментального комплексу для безконтактного контролю питомої електропровідності листових металів, елементи схеми: джерело потужності, індуктори № 1-2, змінні дротяні резистори – $R_{1,2}$, вимірювальні шунти – $R_{ш}$, індукційні датчики – $ІД_{1,2}$ з інтеграторами, листові метали – лист № 1-2, вимірювані величини: дотичні величини напруженості магнітного поля – $H_{1,2}$, струми в обмотках індукторів – $I_{1,2}$.

Проведені дослідження включали ряд експериментів:

1) Визначення достовірності безконтактного методу контролю питомої електропровідності. Ключові співвідношення, що зв'язують збуджуючі струми – $I_{1,2}$ і дотичні компоненти напруженості магнітного поля в зонах між листовими металами і обмотками власне ін-

дукторів – $H_{1,2}$ при нульовому значенні – $H_C \approx 0$ і досить низьких частотах електромагнітних процесів з виразів представлених вище, мають вигляд:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\gamma_1 d_1 + \gamma_i d_i}{\gamma_2 d_2 + \gamma_i d_i}, \quad (7)$$

$$\frac{H_2}{H_1} \approx \frac{\gamma_2 \cdot d_2}{\gamma_1 \cdot d_1}. \quad (8)$$

Експерименти проводилися із зразками з мідної фольги різної товщини (провідні елементи індукторів - також мідна фольга). Різні співвідношення струмів і напруженостей в цьому випадку визначаються тільки товщинами експериментальних зразків. Цей факт, очевидно, свідчить на користь достовірності формул і пропонованого способу визначення питомої електропровідності листових металів.

Результати проведених досліджень і оцінок за формулами (7) та (8) показали проведення контролю з точністю $\sim 10 \div 20 \%$, що прийнятно для вирішення завдань магнітно-імпульсної обробки металів.

2. Контроль питомої електропровідності реальних металевих покриттів сучасних автомобілів. При проведенні експериментів в якості реперного листового зразка використана мідна фольга товщиною – $d_1=50$ мкм з питомою електропровідністю – $\gamma_1 = \gamma_{Cu} = 5,61 \cdot 10^7$ 1/Ом·м.

Листові зразки металевих покриттів автомобілів з питомою електропровідністю – $\gamma_2=?$, що підлягає визначенню: а/м «Ford» (марка ВН-240 , товщина – $d_2=0,75$ мм), а/м «Mitsubishi» (товщина – $d_2=1,0$ мм), а/м «Subaru» (товщина – $d_2=0,8$ мм), нержавіюча сталь 08X17Т (товщина – $d_2=0,8$ мм).

Експерименти проводилися ручним регулюванням струмів в індукторах – джерелах магнітного поля, за допомогою малоіндуктивних дротяних реостатів домагалися мінімально можливого значення дотичної компоненти напруженості магнітного поля у внутрішній порожнині між листовими металами. Зафіксовані амплітудні значення струмів підставлялися у відповідну формулу для питомої електропровідності, отриману за допомогою співвідношення (7).

$$\gamma_2 = \left(\frac{\gamma_1 \cdot d_1}{d_2} \right) \cdot \left(\frac{I_{2m}}{I_{1m}} \cdot \left(1 + \frac{\gamma_i d_i}{\gamma_1 d_1} \right) - \frac{\gamma_i d_i}{\gamma_1 d_1} \right). \quad (9)$$

Отримані результати зведені в таблицю 3.

Таблиця 3 – Результати експерименту для металічних покриттів сучасних автомобілів

Листовий метал	а/м «Ford», ВН-240	а/м «Mitsubishi»	а/м «Subaru»	а/м «Reno»	а/м «Citroen»	Нержавіюча сталь, 08X17Т
γ_2 , 1/Ом·м	$1.56 \cdot 10^7$	$1.72 \cdot 10^7$	$1.0 \cdot 10^7$	$1.26 \cdot 10^7$	$1.07 \cdot 10^7$	$0.32 \cdot 10^7$

Основним результатом виконаних випробувань є практичне відпрацювання методики безконтактного визначення питомої електропровідності листових металів для задач магнітно-імпульсної обробки металів.

Використання отриманих результатів показано у чисельних розрахунках, на прикладі, інструменту магнітно-імпульсної рихтування на основі індукційної індукторної системи з одновитковим соленоїдом в порожнині масивного екрану.

Низькочастотного режим для діючих полів системи (тобто $\omega \cdot \tau \ll 1$, де ω - кругова частота збуджуючого сигналу, $\tau = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \gamma \cdot d^2$ - характерний час дифузії поля в магнітний провідний шар з питомою електропровідністю - γ і відносною магнітної проникністю - μ_r) виконується за рахунок контролю питомої електропровідності заготовки. А саме, якщо

- товщина заготовки $d=0.001$ м, $\mu=2,5$ та $\gamma \in [0,4 \cdot 10^7; 1,72 \cdot 10^7]$ 1/(Ом·м), то умова тонкостінності зберігається для робочої частоти струм в індукторі $f \in [1014; 236]$ Гц, відповідно;

- $d=0.00075$ м, $\mu=2,5$ и $\gamma \in [0,4 \cdot 10^7; 1,72 \cdot 10^7]$ 1/(Ом·м), то $f \in [1803; 420]$ Гц, відповідно.

Зв'язок контролю відносної магнітної проникності заготовки і порушуваних зусиль, що виникають у даній індукційної індукторній системі, представлений чисельними оцінками з початковими умовами, які відповідають реальним експериментальним умовам. Ємність накопичувача $C=1000$ мкФ, робоча частота $f=1$ кГц, відносний декремент загасання $\delta_0 = 0,2$, (амплітуда струму в індукторі 19.61 кА при запасаній енергії ємнісного накопичувача $W = 12,5$ кДж). Джерело поля - плоский одновитковий циліндричний соленоїд з $R_1 = 0,035$ м, $R_2 = 0,038$ м. Заготовка - плоский феромагнітний металевий лист товщиною $d = 0,001$ м. Відстань між робочими поверхнями екрану і заготовки $h = 0,002$ м.

Сили притягання в даній індукційній індукторній системі - це сила притягання листової заготовки, зумовлена дією допоміжного екрану (взаємне притягання провідників з однаково спрямованими індуктованими струмами - закон Ампера), і сила притягання, обумовлена магнітними властивостями металу власне заготовки. Проведені розрахунки показали, що при $\mu \in [1,0; 2,5]$, то радіальний розподіл сил притягання - Ампера лежить в інтервалі $P_A \in [38; 91,4]$ кГ/см²; $\mu \in [1,5; 2,5]$, то магнітна сила в металі у робочій зоні індуктору $P_{МАГв\text{ідн}} \in [0,9; 2,16]$ кГ/см². Аналіз радіального розподілу сил притягання Ампера дозволяє виділити на поверхні листової заготовки область, де їх дія буде найефективніша.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу удосконалення методів контролю електромагнітних характеристик тонкостінних листових металів для використання при умовах магнітно-імпульсної обробки.

1. За результатами проведеного аналізу методів і засобів контролю електромагнітних характеристик металів визначено, що доцільним є використання удосконалених методів контролю цих параметрів при використанні їх у техніці магнітно-імпульсної обробки металів, де об'єктом дослідження являється тонкостінні листові метали.

2. Проведено теоретичні дослідження методів контролю питомої електропровідності тонкостінних листових металів, заснованих на взаємодії «зустрічних» магнітних полів двох соленоїдів. Розроблено модельні схеми контролю питомої електропровідності листових провідників. Аналіз електромагнітних процесів в різних фізико-математичних моделях для контролю електропровідності показав, що їх дієвість можлива виключно в низькочастотному режимі збуджуваних полів, коли має місце їх інтенсивне проникнення крізь листові метали. Отримано робочі аналітичні

співвідношення для контролю питомої електропровідності. Обґрунтована практична працездатність конструктивного варіанту реальної вимірювальної системи з висновком про незалежність робочих співвідношень для визначення електропровідності від магнітних властивостей об'єкта досліджень, що дозволяє контроль електрофізичних характеристик провідників будь-якої природи.

3. Розроблено метод контролю магнітних характеристик тонкостінних листових металів в режимі силового притягання заданих ділянок при впливі імпульсних полів. Отримано робочі співвідношення для контролю магнітних характеристик, які приведені до вигляду, що дозволяє встановлювати як просторово-часову залежність проникностей, так і давати інтегральну інформацію про значення їх параметрів в оброблюваній заготовці.

4. Проведена експериментальна апробація методів і засобів по контролю і визначенню електромагнітних характеристик тонкостінних листових металів:

- показано, дієздатність комплексу для безконтактного контролю питомої електропровідності листових металів з індукторами - джерелами магнітного поля у вигляді тонкостінних провідних екранів. Доведена достовірність контролю питомої електропровідності запропонованим способом з точністю $\sim 10 \div 20 \%$, що практично прийнятно для вирішення завдань магнітно-імпульсної обробки металів;

- проведено експериментальні дослідження, що підтверджують теоретичні положення методики контролю магнітних характеристик тонкостінних листових заготовок при магнітно-імпульсній обробці металів. Показано, що при магнітно-імпульсному притяганні тонкостінних листових феромагнетиків величина відносної магнітної проникності оброблюваних металів відмінна від одиниці і приймає значення в діапазоні $\mu_r \geq 1,3$ (коли напруженість магнітного поля (тангенціальна складова) лежить в інтервалі $[0,2 \cdot 10^6 \text{ А/м}; 1,25 \cdot 10^6 \text{ А/м}]$). Успішно апробована методика контролю напруженості магнітного поля в робочій зоні індукторної системи в реальному режимі силового впливу при магнітно-імпульсній обробці металів;

- експериментально отримана залежність відносної магнітної проникності від величин напруженості поля, характерних для реального магнітно-імпульсного притягання, яка фізично узгоджується з відомими даними, що свідчить про достовірність результатів проведених експериментів.

- проведена оцінка отриманих результатів, на прикладі, інструменту магнітно-імпульсного рихтування на основі індукційної індукторної системи з одновитковим соленоїдом в порожнині масивного екрану. Показано, що контролюючі питому електропровідність не порушується електродинамічна тонкостінність металів, а контроль магнітної проникності дозволяє виділити на поверхні листової заготовки область сил притягання Ампера, де їх дія буде найефективніша

5. Результати роботи впроваджено на базі Індустріальної Групи «У.П.Е.К.» (м.Харків) та СТО ЧП «Свистун Г. Д.» (м.Харків), використовуються в навчальному процесі ХНАДУ (дисципліна «Прогресивні технології в АТЗ»; курс «Фізика» розділ «Електромагнетизм і його додатки в практиці сучасного ремонту транспортних засобів»), а також використані при розробці прогресивних технологій зовнішнього безконтактного усунення вм'ятин в кузовних елементах сучасного автотранспорту в лабораторії електромагнітних технологій ХНАДУ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Барбашова М. В. Бесконтактный способ измерения удельной электропроводности листовых металлов / Ю. В. Батыгин, А. В. Гнатов, М. В. Барбашова [и др.] // *Електротехніка і електромеханіка*. – Харків, 2012. – № 1. – С. 58–61.

Здобувачем проведені чисельні оцінки та розрахунки за отриманими аналітичним співвідношенням для знаходження питомої електропровідності листового металу.

2. Барбашова М.В. Способ определения электрофизических параметров металлов, применяемых в автомобилестроении / М. В. Барбашова // *Автомобильный транспорт* – Харків: Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 2012. – №31.– С. 153 – 158.

3. Барбашова М.В. Анализ электромагнитных процессов в системе для измерения удельной электропроводности листовых металлов с «тонкостенными» обмотками / Ю.В. Батыгин, М. В. Барбашова, Е. А. Чаплыгин // *Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”*. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2013. – №15(988). – С. 110 – 121.

Здобувачем отримані аналітичні співвідношення для розрахунку основних електромагнітних характеристик представленої системи.

4. Барбашова М.В. Измерение удельной электропроводности листовых металлов с использованием магнитно-импульсных технологий / М. В. Барбашова // *Науковий Вісник Херсонської державної морської академії*. – Херсон: ХДМА, 2013. – №1(8). – С. 140 – 149.

5. Барбашова М.В. Измерение удельной электропроводности листовых металлов системой с обмотками индукторов в виде тонкостенных металлов / Ю.В. Батыгин, М. В. Барбашова, Е. А. Чаплыгин // *Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”*. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2013. – №35(1008). – С. 70 – 82.

Здобувачем проведені чисельні оцінки та розрахунки за отриманими аналітичним співвідношенням для знаходження питомої електропровідності листового металу.

6. Барбашова М.В. Теория измерений магнитной проницаемости ферромагнетиков в магнитно-импульсной обработке металлов / Е. А. Чаплыгин, М. В. Барбашова // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова*. – Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2014. - № 2. - С. 180 – 183.

Здобувачем отримані аналітичні вирази для визначення магнітних характеристик листових ферромагнетиків.

7. Барбашова М.В. Экспериментальная апробация систем для измерения магнитных проницаемостей листовых металлов / Е.А. Чаплыгин, М.В. Барбашова, О. С. Сабокарь // *Електротехніка і електромеханіка*. – Харків, 2014. – № 4. – С. 56–60.

Здобувачем отримано залежності відносної магнітної проникності металу від напруженості магнітного поля та першої динамічної характеристики магнітних властивостей металу для напруженостей полів, які характерні в МІОМ.

8. Пат. 77282 України, В21 Д 26/14. Пристрій вимірювання питомої електропровідності листових металів за співвідношенням між напруженостями магнітного поля / Батигін Ю.В., Гнатов А.В., Чаплигін Є.О., Барбашова М.В., Сабокар О.С., заявник та патентовласник Харківський нац. автом.-дорожн. ун-т. – № u2012 08297; заявл. 06.07.2012; опубл. 11.02.2013, Бюл. № 3.

Здобувачем обґрунтовано співвідношення для вимірювання питомої електропровідності листових металів.

9. Барбашова М.В. Физические основы магнитно-импульсного притяжения тонкостенных листовых металлов – перспективы в развитии электромагнитной штамповки / Ю.В. Батыгин, А.В. Гнатов, Е.А. Чаплыгин, М.В. Барбашова // Сборник материалов II Всеукраинской научно-технической конференции «Теоретические проблемы и прикладные аспекты современной технической физики» (Николаев, 24-25 сентября, 2012 г.) – Николаев: 2012. – 40 с. – С. 5 – 9.

Здобувачем проведено аналіз фізичних основ магнітно-імпульсного притягання тонкостінних листових металів.

10. Барбашова М.В. Анализ способов бесконтактного измерения удельной электропроводности листовых металлов при магнитно-импульсной обработке (МИОМ) / М. В. Барбашова // Сборник материалов V Международной научно-практической конференции «Современные информационные и инновационные технологии на транспорте MINTT-2013» (Херсон, 28-30 мая 2013 г.) в двух томах. – Т.2. – Херсон: ХДМА, 2013. – 240 с. – С.90-93.

11. Барбашова М.В. Измерение магнитной проницаемости ферромагнетиков при силовом воздействии импульсных полей. Теоретическое обоснование метода / Е. А. Чаплыгин, М. В. Барбашова, О.С. Сабокар // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований», (Москва, 4–5 марта 2013 г.).– Москва: 2013. – Т. 1. – С. 117–119.

Здобувачем отримані робочі співвідношення для виміру магнітної проникності при силовому впливі імпульсних магнітних полів.

12. Барбашова М.В. Экспериментальная апробация бесконтактного метода контроля удельной электропроводности листового металла / А. В. Гнатов, М. В. Барбашова, О. С. Сабокар // Збірник матеріалів 5-тої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», (Херсон, 1-3 жовтня 2014).– Херсон : ХДМА, 2014.– 436 с. – С. 28 – 32.

Здобувачем проведено аналіз основних досягнень і публікацій та обробку експериментальних даних.

13. Барбашова М.В. Анализ процессов в индукционной индукторной системе с идентичными листовыми немагнитными металлами / А. В. Гнатов, М. В. Барбашова, С. А. Шиндерук // Материалы X Международной научно-практической конференции «Современные возможности науки - 2014», Технические науки, (Прага, 27 января - 5 февраля 2014 г.).– Прага, 2014. – С. 8 - 13.

Здобувачем проведено аналіз протікання імпульсних магнітних процесів в системі з ідентичними листовими немагнітними металами.

АНОТАЦІЇ

Барбашова М. В. Удосконалення методів контролю електромагнітних характеристик тонкостінних листових металів у техніці магнітно-імпульсної обробки. - 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 «ХПІ» МОН України, Харків, 2015.

Дисертація присвячена удосконаленню методів контролю електромагнітних характеристик тонкостінних листових металів в умовах магнітно-імпульсної обробки, що дозволяють підвищити ефективність індукторних систем, як інструментів магнітно-імпульсного притягання. У роботі вперше розроблені метод зустрічних магнітних полів для визначення питомої електропровідності листових металів (дозволяє робити безконтактний контроль параметра оброблюваних об'єктів в сучасних магнітно-імпульсних технологіях), а також метод контролю магнітної проникності об'єктів обробки в режимі реального силового притягання заданих ділянок тонкостінних листових металів за допомогою імпульсних магнітних полів.

У роботі проведено аналіз методів і засобів контролю електромагнітних характеристик (питомої електропровідності і магнітної проникності) об'єктів магнітно-імпульсної обробки. Показано, що для практики магнітно-імпульсних технологій необхідними та актуальними є розробки нових методів контролю електромагнітних характеристик об'єктів обробки - тонкостінних листових металів. Проведено теоретичні дослідження з контролю електромагнітних характеристик тонкостінних листових металів - питомої електропровідності. Показано, що метод «зустрічних» магнітних полів дозволяє контролювати питому електропровідність не тільки немагнітних тонкостінних листових металів, а й феромагнітних зразків. Отримано, робочі співвідношення для контролю магнітних характеристик досліджуваних зразків (реальних кузовних сталей). Проведені експериментальні дослідження та практична апробація методів контролю електромагнітних характеристик тонкостінних листових металів в режимі реальних робочих частот діючих полів.

Ключові слова: неруйнівний контроль, тонкостінний листовий метал, електромагнітні характеристики, магнітно-імпульсна обробка, випробувальна техніка.

Барбашова М. В. Совершенствование методов контроля электромагнитных характеристик тонкостенных листовых металлов в технике магнитно-импульсной обработки. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения вещества. – Национальный технический университет «ХПИ» МОН Украины, Харьков, 2015.

Диссертация посвящена совершенствованию методов контроля электромагнитных характеристик тонкостенных листовых металлов для использования в условиях магнитно-импульсной обработки, позволяющие повысить эффективность индукторных систем, как инструментов магнитно-импульсного притяжения. В работе впервые разработаны метод встречных магнитных полей для определения удельной электропроводности листовых металлов (позволяющий производить бесконтактный

контроль параметра обрабатываемых объектов в современных магнитно-импульсных технологиях), а также метод контроля магнитной проницаемости объектов обработки в режиме реального силового притяжения заданных участков тонкостенных листовых металлов с помощью импульсных магнитных полей.

В работе проведен анализ методов и средств контроля электромагнитных характеристик металлов, а также методов магнитно-импульсного притяжения. На основании обзора современной научно-технической литературы относительно применения методов и устройств неразрушающего контроля сделано вывод об их ограниченных возможностях. Сложность возникает для контроля электромагнитных параметров листовых металлов толщина которых меньше величины эффективной глубины проникновения поля, для металлов с магнитными свойствами и др. Решение этих недостатков позволит идентифицировать важнейшие характеристики процесса магнитно-импульсной обработки, которые определяют не просто эффективность, а практическую возможности технологий с использованием энергии сильных электромагнитных полей.

В диссертационной работе разработаны теоретические положения и получены выражения для определения удельной электропроводности тонкостенных листовых металлов, на основании расчета физико-математической модели взаимодействия «встречных» магнитных полей двух соленоидов, которая базируются на суперпозиции магнитных потоков в центре исследуемой системы. Определено, что метод «встречных» магнитных полей позволяет контролировать удельную электропроводность не только немагнитных тонкостенных листовых металлов, но и ферромагнитных образцов.

Разработан метод контроля магнитных характеристик тонкостенных листовых металлов (динамической и относительной магнитных проницаемостей) в режиме силового притяжения заданных участков при воздействии импульсных полей. Получены рабочие соотношения для определения магнитных характеристик, которые приведены к виду, позволяющему устанавливать как пространственно-временную зависимость проницаемостей, так и давать интегральную информацию о магнитном состоянии обрабатываемой заготовки по усредненным показателям магнитных свойств её металла.

Проведены экспериментальные исследования и практическая апробация предложенных методов контроля электромагнитных характеристик тонкостенных листовых металлов в режиме реальных рабочих частот действующих полей. Показана, дееспособность комплекса для бесконтактного определения удельной электропроводности листовых металлов с индукторами – источниками магнитного поля в виде тонкостенных проводящих экранов. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие теоретические положения методики контроля магнитных характеристик тонкостенных листовых заготовок при магнитно-импульсной обработке металлов.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, тонкостенный листовой металл, электромагнитные характеристики, магнитно-импульсная обработка, испытательная техника.

Barbashova M. V. Improvement of methods testing the electromagnetic characteristics of thin-walled sheet metals in electromagnetic forming.

Thesis for a Candidate Degree in Engineering. Speciality 05.11.13 – Instruments and methods of testing, and definition of composition matter. – National Technical University Kharkov Polytechnical Institute (NTU KhPI). – Kharkiv, 2015.

This dissertation is devoted to improvement of methods testing of electromagnetic characteristics of thin-walled sheet metals in condition of magnetic-pulse treatment, allowing to increase efficiency of inductor systems as tools magnetic-pulse attraction. For the first time a method of counter magnetic fields to make testing the electrical conductivity of sheet metal (allowing to make contactless measurement of parameter of processed objects in modern magnetic-pulse technologies) is developed. The method of testing magnetic permeability processing of objects in the mode force attraction of thin-walled sheet metals by means of pulsed magnetic fields.

In dissertation the analysis of methods and devices of a magnetic- of testing of their electromagnetic characteristics – electrical conductivity and magnetic permeability of objects magnetic-pulse processing is carried out. It has shown that for practice of magnetic-pulse technologies development new methods of testing electromagnetic characteristics of objects of processing - thin-walled sheet metals, are necessary and actually. Theoretical researches on testing of electromagnetic characteristics of thin-walled sheet metals - electrical conductivity are carried out. It is shown, that the method of «counter magnetic fields» allows to testing electrical conductivity not only non-magnetic thin-walled sheet metals, but also ferromagnetic samples. The settlement ratios for testing of magnetic characteristics of investigated are received. Experimental researches of methods testing electromagnetic characteristics of thin-walled sheet metal in real operating frequency of active fields.

Key words: non-destructive testing, thin-walled sheet metal, electromagnetic characteristics, electromagnetic forming, test equipment.

