

Себко Вадим Вадимович

УДК 620.179.14

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ МЕТОДИ І ПРИСТРОЇ ДЛЯ СУМІСНОГО ВИЗНАЧЕННЯ
МАГНІТНИХ, ЕЛЕКТРИЧНИХ, ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТА ТЕМПЕРАТУРИ
ПРОВІДНИХ ВИРОБІВ
(ТЕОРІЯ І РОЗРОБКИ)**

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю
та визначення складу речовин

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Кучерук Володимир Юрійович,
Вінницький національний
технічний університет, м. Вінниця,
професор кафедри метрології та промислової
автоматики;

доктор технічних наук, професор
Сахацький Віталій Дмитрович,
Українська інженерно-педагогічна академія,
м. Харків, завідувач кафедри радіоелектроніки та
комп'ютерних систем;

доктор технічних наук, професор
Обшта Анатолій Феліксович,
Національний університет
“Львівська політехніка”, м. Львів, завідувач
кафедри обчислювальної математики та
програмування.

Захист відбудеться 24.12. 2008 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.102.01 у Київському національному університеті технологій та дизайну за адресою: 01011, м. Київ, вул. Немировича-Данченка, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського національного університету технологій та дизайну за адресою: 01011, м. Київ, вул. Немировича-Данченка, 2.

Автореферат розісланий 21.11.2008 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.102.01

Стаценко В.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Серед багатьох методів і пристроїв неруйнівного контролю особливо виділяються вихороструміві методи та засоби. Значне розширення їх в останній час пов'язано з тим, що вони дозволяють одержувати магнітні, електричні, геометричні та інші фізичні параметри, такі, як температура і наявність домінуючих домішок, а це, в свою чергу, надає можливість отримати найбільш повну інформацію про різноманітні матеріали, вироби різних конфігурацій, а також про технічний стан рідинних феромагнітних середовищ і плазмових газових стовпів. Зусиллями українських та іноземних вчених, а саме: Ключова В.В., Сухорукова В.В., Федосенка Ю.К., Шкарлета Ю.М., Герасимова В.Г., Дорофєєва А.Л., Дмитриєва В.І., Родигина Н.М., Ковашевича І.П., Покровського А.Д., Николаєнка А.Т., Кінга Л., Джагера Дж., Ферстера Ф., Альдена А., Блітца Ж., Маєвського С.М., Троїцького В.А., Безвесільної О.М., Скрипника Ю.О., Білокура І.П., Стадника Б.І., Столярчука П.Г., Луцика Я.Т., Назарчука З.Т., Панасюка В.В., Тетерко А.Я., Петрука В.Г., Стенцеля Й.І., Кісіля І.С., Яковенка В.В., Мирошнікова В.В., Гриневича Ф.Б., Карпаша О.М., а також зусиллями вчених Харківської школи неруйнівного контролю: Большакова В.Б., Ігуменцева Е.А., Себка В.П., Бондаренка В.Е., Стороженка В.А., Сучкова Г.М., та молодих вчених: Хоменка В.Г., Львова С.Г., Ду Хіан Янга, Сомхієвої О.С., Мохаммада Махмуда Мохаммада Дарвіша, Кириченко Р.І. та інших аспірантів і працівників НТУ "ХПІ" було створено теоретичні і практичні основи неруйнівного контролю матеріалів, виробів і середовищ вихорострумівими методами.

Слід відзначити, що, не дивлячись на те, що останнім часом з'явилися багатопараметрові вихороструміві методи, які поряд з електромагнітними та геометричними параметрами виробів дозволяють визначити і температуру, вказані методи і пристрої на базі яких вони реалізуються, або мають низьку достовірність контролю, або не дозволяють одержати повної картини сумісного контролю магнітних, електричних, геометричних параметрів і температури у різних типах теплових вихорострумівих перетворювачів, з різними формами виробів та різноманітними речовинами. До сьогодні не було розглянуто динамічні характеристики теплових вихорострумівих датчиків з різною взаємодією нагрівача з повітряним шаром, а також цього шару з циліндричним металевим виробом, були невідомі сталі часу безконтактних і контактних вихорострумівих перетворювачів, а також сталі часу процесу нагріву виробів. Не було отримано стаціонарні, нестаціонарні і загальні рішення рівнянь теплового балансу вихорострумівого датчика з виробом, що нагрівається. Не знайдено статичні характеристики контактних вихорострумівих перетворювачів з досліджуваними плазмовим газовим стовпом і феромагнітною рідиною. Не розглянуто вплив домінуючих домішок на кількісні значення магнітних, електричних параметрів і еквівалентно на температуру сталевих виробів. Практично не розглянуто особливості роботи теплових вихорострумівих датчиків при використанні виробів різних форм, феромагнітних рідинних і плазмових газових середо-

вищ, отже теорія роботи теплових вихорострумів датчиків до сьогодні була невідома. Практично не було також розвинуто застосування чотирипараметрових вихорострумів методів контролю магнітних, електричних, геометричних параметрів і температури трубчастих, суцільних циліндричних і плоских виробів. Не створено контактний резистивно-індуктивний і безконтактний модифікований вихорострумів методи контролю параметрів магнітних і немагнітних виробів у поперечних магнітних полях. Не запропоновано чотирипараметрові вихорострумів методи контролю магнітних, електричних, геометричних параметрів, а також температури циліндричних і плоских виробів на основі безконтактних вихорострумів перетворювачів, що працюють на кратних частотах зондуючого виробу магнітного поля. Не було створено екранний вихорострумів чотирипараметровий метод сумісного контролю відносної магнітної проникності μ_r , питомої електричної провідності σ_r , температури феромагнітної труби t і коефіцієнта згасання синусоїдального магнітного поля в середині трубчастого виробу.

Розв'язок цих питань надає можливість підвищити достовірність контролю параметрів трубчастих, суцільних циліндричних виробів та феромагнітних пластин, а також плазмових газових стовпів і феромагнітних рідинних середовищ у таких галузях промисловості України, як приладобудування, машинобудування, хімічне виробництво, металургія та ін.

Тому у даному випадку коло рішення подальших задач суттєво розширюється і ускладнюється, створюючи важливу науково-практичну проблему, суть якої полягає у тому, що існуючі методи та засоби контролю параметрів провідних виробів і речовин мають низьку достовірність за рахунок того, що не враховують температуру, при якій визначаються електромагнітні параметри об'єктів, що контролюються, а також за рахунок того, що не відомі динамічні та статичні характеристики різного типу теплових вихорострумів датчиків з різною орієнтацією магнітного поля.

Слід відзначити, що рішення цієї важливої науково-практичної проблеми дозволяє, у свою чергу, здійснювати багатопараметровий контроль провідних виробів нафтогазової, кабельної та машинобудівної продукції, впроваджувати енергозберігаючі технології, а також визначати динамічні і статичні характеристики вихорострумів перетворювачів та автоматизованих приладів і пристроїв, що їх використовують, систем керування та контролю параметрів провідних виробів, матеріалів і речовин. Важливість та актуальність проблеми, яка вирішується, підкреслено цілою низкою постанов та рішень директивних органів України, а саме: Постанова Верховної Ради України, "Про заходи щодо запобігання енергетичній кризі в Україні" від 6 жовтня 2005 року, Постанова Кабінету Міністрів України від 18 квітня 2006 року №516 "Про затвердження Державної програми розвитку машинобудування на 2006 – 2011 роки".

Тема роботи є актуальною і своєчасною, тому що вона присвячена вдосконаленню відомих і створенню нових багатопараметрових вихорострумів методів контролю провідних виробів і речовин, а також визначенню динамічних та статичних характеристик безконтактних і контактних

теплових вихорострумових датчиків.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертація виконана у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" згідно з проектами за конкурсом Міністерства освіти і науки України (МОН), що затверджені науковою радою МОН України наказом № 633 від 5.11.2002 р. Назви тем проектів:

- "Створення теорії багатопараметрового визначення фізико-хімічних характеристик металів та способів її реалізації" (ДР №0103U001532);
- "Відпрацювання основних принципів побудови автоматизованих приладів для безконтактного визначення температури матеріалів і середовищ" (ДР № 0103U001533), (строки виконання обох тем 2003-2005 р.р.);

Дисертантом по першій темі виконано:

- створено алгоритм контролю магнітних, електричних і температурних параметрів ферромагнітного циліндричного виробу шляхом використання нового трипараметрового контактного вихорострумового резистивно-індуктивного методу, що реалізується за допомогою контактного електромагнітного перетворювача (КЕМП), новизна методу підтверджена патентом України на корисну модель (№14958, заяв. 04.10.2005, опубл. 15.06.2006, бюл. - № 6);
- виконано розрахунок чисельних значень відносних похибок вимірювань магнітної проникності μ_r , питомої електричної провідності σ_t і температури t ферромагнітного циліндричного виробу, а також здобувач брав участь в складанні окремих пунктів висновків у розділі чотири.

По другій темі здобувачем виконано:

- наведено приклади практичного використання електромагнітних багатопараметрових методів, які враховують нагрівання виробу, виконано розрахунок чисельних значень відносних похибок вимірювання діаметра d , питомого електричного опору ρ і температури t немагнітного циліндричного виробу;
- запропоновано створення багатопараметрових безконтактних вихорострумових методів сумісного контролю магнітних, електричних, геометричних і температурних параметрів виробів різної форми та речовин;
- на основі визначення вносимих сигналів трансформаторного електромагнітного перетворювача, тобто вносимої нормованої ЕРС і її фази, які залежать від температури, запропоновано застосування модифікованого трипараметрового безконтактного вихорострумового методу контролю діаметра d_t , питомого електричного опору ρ_t і температури t циліндричного немагнітного виробу, що зондується повздовжнім та поперечним магнітним полем.

На теперішній час робота виконувалася за двома держбюджетними темами, які пройшли за конкурсом МОН України і затверджені наказом № 654 від 16.11.2005 р., та пошуковою науково-

дослідною темою кафедри "Хімічної техніки і промислової екології" НТУ "ХПІ" "Методи визначення фізико-механічних параметрів провідних виробів і речовин" (ДР № 0108U001460) (строки виконання 2007-2008 р. р.).

Назви тем проектів:

- "Теоретичні основи побудови магнітних і електромагнітних перетворювачів з циліндричними і плоскими виробами енергетичного обладнання" (ДР № 0106U005160);
- "Створення електромагнітних методів і експериментальних зразків для контролю механічних напружень суцільних виробів і тиску рідини та газів" (ДР № 0106U005162), (строки виконання обох тем 2006-2008 р. р.).

Дисертантом згідно теми (ДР № 0106U005160) обрано інформативні параметри феромагнітних плоских виробів, які включають до себе відносну магнітну проникність μ_{rt} , питомий електричний опір ρ_t , розміри і температуру t феромагнітних пластин.

За темою (ДР № 0106U005162) здобувачем розглянуто існуючі електромагнітні та механічні багатопараметрові методи контролю фізичних величин провідних виробів.

Дисертантом згідно пошукової науково-дослідної теми (ДР № 0108U001460) виконано:

- визначено електричні і геометричні параметри плазмового стовпа люмінесцентної лампи при використанні вихорострумовевого контактного робочого перетворювача (керівник, відповідальний виконавець к.т.н., доцент каф. ХТПЕ Себко В.В.);
- створено вихорострумові методи контролю магнітних, електричних, геометричних параметрів і температури феромагнітних циліндричних виробів та пластин, які засновано на зондуванні провідних виробів магнітним полем двох кратних частот електромагнітних безконтактних перетворювачів (керівник, відповідальний виконавець к.т.н., доцент каф. ХТПЕ Себко В.В.);
- досліджено вплив домінуючої домішки вуглецю на кількісні значення електромагнітних параметрів циліндричних виробів (керівник, відповідальний виконавець к.т.н., доцент каф. ХТПЕ Себко В.В.);
- визначено магнітні, електричні, геометричні і температурні параметри феромагнітної рідини при використанні електромагнітного контактного перетворювача (керівник, відповідальний виконавець к.т.н., доцент каф. ХТПЕ Себко В.В.);
- створено екранний вихорострумовий чотирипараметровий метод контролю провідного трубчастого виробу (керівник, відповідальний виконавець к.т.н., доцент каф. ХТПЕ Себко В.В.).

Мета і задачі дослідження. Підвищення достовірності контролю провідних виробів та речовин за рахунок сумісного визначення геометричних та електромагнітних параметрів об'єктів, що контролюються з температурою, при реалізації три- та чотирипараметрових вихорострумових методів за допомогою різних типів теплових вихорострумових датчиків.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

- надати теоретичне обґрунтування визначенню динамічних характеристик безконтактних та контактних теплових вихорострумових датчиків при різних зовнішніх змінах температури нагрівача і повітряного шару між нагрівачем та виробом, що, у свою чергу, дозволяє визначити змінення температури при якій здійснюється контроль електромагнітних параметрів, у кожний момент часу;
- удосконалити існуючі вихорострумові методи визначення геометричних і електромагнітних параметрів трубчастих, суцільних циліндричних та плоских виробів за рахунок сумісного контролю магнітних, електричних і геометричних параметрів з температурою, що, у свою чергу, дозволяє підвищити достовірність контролю різноманітних виробів; навести формулу для визначення температурного коефіцієнту опору (ТКО) матеріалу виробу, котрий може бути невідомим; отримати формули для визначення температури, при якій контролюються електромагнітні параметри провідних виробів;
- запропонувати чотирипараметровий екстремальний вихорострумовий метод сумісного контролю радіуса a , відносної магнітної проникності μ_{rt} , питомого електричного опору ρ_t і температури t феромагнітних циліндричних виробів, який засновано на здійсненні повної компенсації ЕРС теплового трансформаторного вихорострумового датчика (ТВД) без виробу;
- створити чотирипараметровий вихорострумовий безконтактний метод сумісного контролю параметрів феромагнітного плоского виробу, тобто відносної магнітної проникності μ_{rt} , питомої електричної провідності σ_t , площі поперечного перерізу пластини dh_t і температури t , заснований на зондуванні феромагнітної пластини полем кратних частот теплового ТВД;
- отримати нові універсальні функції перетворювання для параметричного вихорострумового датчика (ПВД), що працює на кратних частотах магнітного поля зонduючого феромагнітні циліндричні вироби та пластини; створити алгоритм чотирипараметрового контролю циліндричних виробів, що зонduються полем кратних частот ПВД у широкому діапазоні змінення відносної магнітної проникності μ_{rt} ;
- на основі нових функцій перетворювання отриманих для ПВД, що працює на кратних частотах магнітного поля, зонduючого феромагнітні плоскі вироби, створити вихорострумовий метод чотирипараметрового сумісного контролю феромагнітних пластин;
- удосконалити існуючий вихорострумовий контактний метод визначення електромагнітних параметрів, за рахунок сумісного контролю величин μ_{rt} і σ_t з температурою t (при якій контролюються електромагнітні параметри феромагнітних циліндричних виробів); дослідити відомі універсальні функції перетворювання вихорострумового контактного робочого перетворювача (КРП) з урахуванням змінення температури виробу;
- отримати нові універсальні функції перетворювання для теплового КРП, на основі яких

створити контактний резистивно-індуктивний трипараметровий вихорострумний метод контролю циліндричних виробів;

- дослідити вплив домінуючої домішки вуглецю на кількісні значення електромагнітних параметрів циліндричних виробів (матеріал сталь А - 20) і еквівалентно на температуру у діапазоні змінення відсоткового складу вуглецю від 0,1% до 5,5%;

- запропонувати екранний вихорострумний чотирипараметровий метод сумісного контролю відносної магнітної проникності μ_{rt} , питомої електричної провідності σ_t , температури t труби і коефіцієнта згасання синусоїдального магнітного поля h_t в середині трубчастого феромагнітного виробу;

- дослідити технічні можливості використання теорії КРП стосовно контролю параметрів плазмового стовпа люмінесцентної лампи і феромагнітної рідини (машинного мастила з дисперсним феромагнітним порошком).

Об'єкт дослідження – процес проникнення змінного магнітного поля (повздовжнього і поперечного) у провідне середовище, яке зазнає зовнішнього нагрівання, котрий створює проблемну ситуацію підвищення достовірності контролю магнітних, електричних, геометричних і температурних параметрів провідних виробів, плазмових газових стовпів та феромагнітних рідин, а також визначення динамічних і статичних характеристик теплових вихорострумних датчиків.

Предмет дослідження – багатопараметрові вихорострумні методи (безконтактні, контактні, екранні) сумісного контролю магнітних, електричних, геометричних і температурних параметрів провідних виробів, плазмових газових стовпів і феромагнітних рідинних середовищ, а також динамічні та статичні характеристики вихорострумних датчиків з виробами, що нагріваються.

Методи дослідження засновані на використанні стаціонарних і нестаціонарних рівнянь дифузії тепла в повітряні і металеві середовища, а також визначенні сталих часу розвитку теплового процесу в різноманітних середовищах – все це використовувалося при визначенні динамічних характеристик теплових вихорострумних датчиків; на інтегральному і диференційному численні при створенні нових безконтактних, контактних і екранних вихорострумних методів контролю параметрів трубчастих, суцільних циліндричних і плоских провідних виробів; на теорії похибок та степеневих рядів, що, у свою чергу, було застосовано при визначенні чисельних значень похибок багатопараметрових вимірювань; теорія електричних і магнітних кіл використовувалася при визначенні статичних характеристик контактних вихорострумних перетворювачів з досліджуваними плазмовим газовим стовпом і феромагнітною рідиною, а також при здійсненні контролю багатьох параметрів провідних виробів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

- дано теоретичне обґрунтування визначенню динамічних характеристик теплових вихорострумних датчиків при впливі на виріб, що нагрівається, різних режимів змінення температури

нагрівача і повітряного шару, що, у свою чергу, дозволяє визначити миттєві значення температур, при яких здійснюється контроль електромагнітних параметрів виробів;

- створено чотирипараметровий екстремальний вихорострумний метод контролю феромагнітних циліндричних виробів, що реалізується за допомогою теплового ТВД, який відрізняється від відомих вихорострумних методів на основі ТВД, тим, що наслідком його реалізації є підвищення достовірності контролю електромагнітних параметрів, за рахунок сумісного контролю величин a , μ_{rt} і σ_t разом з температурою t ; метод засновано на повній компенсації об'єму повітря на розмірі виробів, що контролюються, тільки раз за весь час вимірювань, тому чотирипараметровий екстремальний вихорострумний метод, дозволяє здійснювати контроль циліндричних феромагнітних зразків у широкому діапазоні змінення їх діаметрів;

- удосконалено вихорострумний метод визначення відносної магнітної проникності μ_{rt} і питомої електричної провідності σ трубчастого виробу за рахунок сумісного контролю цих параметрів з температурою t , що, у свою чергу, дозволило підвищити достовірність контролю електромагнітних параметрів труб; при цьому у загальному випадку визначається температурний коефіцієнт опору (ТКО) матеріалу виробу по результатах вимірювання двох значень температур t і t_1 , до яких здійснюється нагрів трубчастого виробу;

- вперше запропоновано чотирипараметровий вихорострумний метод контролю феромагнітної пластини, який засновано на зондуванні плоского виробу магнітним полем кратних частот теплового ТВД, слід відзначити, що використання кратних частот магнітного поля під час контролю плоских виробів приводить, у свою чергу, до суттєвого спрощення функцій перетворення, а також вимірювальних та розрахункових процедур, метод дозволяє здійснювати сумісний контроль відносної магнітної проникності μ_{rt} , питомого електричного опору ρ_t , площі поперечного перерізу dh_t і температури t феромагнітного плоского виробу;

- вперше запропоновано чотирипараметровий вихорострумний контроль циліндричних і плоских виробів, заснований на зондуванні провідних зразків магнітним полем кратних частот ПВД; отримано універсальні функції перетворення для ПВД з плоскими виробами, що зондуються магнітним полем кратних частот у широкому діапазоні змінення відносної магнітної проникності μ_{rt} ;

- з урахуванням впливу температури отримано універсальні функції перетворення для теплового комбінованого вихорострумного датчика (КВД); на основі цих функцій знайшов подальший розвиток безконтактний модифікований трипараметровий вихорострумний метод контролю діаметра d_t , питомого електричного опору ρ_t і температури t немагнітного виробу, який використовує повздовжнє і поперечне магнітне поле теплових вихорострумних датчиків;

- удосконалено контактний вихорострумний метод визначення параметрів μ і σ за ра-

хунок сумісного контролю магнітних та електричних параметрів разом з температурою t виробу, що реалізується за допомогою теплового КРП, з урахуванням впливу температури досліджено відомі функції перетворювання КРП; отримано формулу для визначення температури t , при якій здійснюється контроль параметрів μ_{rt} і σ_t виробу;

- створено контактний резистивно-індуктивний трипараметровий вихорострумний метод сумісного контролю відносної магнітної проникності μ_{rt} , питомого електричного опору ρ_t і температури t на основі універсальних функцій перетворювання, отриманих для теплового КРП; визначено похибки вимірювань параметрів μ_{rt} , ρ_t і t виробу, при реалізації контактної резистивно-індуктивного трипараметрового вихорострумного методу;

- досліджено вплив домінуючої домішки вуглецю на кількісні значення електромагнітних параметрів і еквівалентно на температуру циліндричних сталевих виробів, показано, що зростання відсоткового складу вуглецю у сталі А-20 приводить до зменшення чисельних значень відносної магнітної проникності μ_r і питомої електричної провідності σ , визначено відносні похибки вимірювань γ_{μ_r} і γ_{σ} для діапазону збільшення домінуючої домішки вуглецю у сталі А-20 з 0,1% до 5,5%; встановлено, що збільшення відсоткового складу вуглецю еквівалентно зростанню температури сталевих виробів;

- вперше запропоновано екранний вихорострумний чотирипараметровий метод сумісного контролю відносної магнітної проникності μ_{rt} , питомої електричної провідності σ_t , температури t феромагнітної труби і коефіцієнта згасання h_t синусоїдального повздовжнього магнітного поля у трубчастому виробі; особливістю цього методу є те, що утримується постійна глибина проникнення δ магнітного поля, а змінення електромагнітних параметрів, які обумовлені впливом температури, компенсуються шляхом варіації частоти f ;

- досліджено технічні можливості використання теорії КРП при контролі багатьох параметрів плазмового газового середовища та машинного мастила з феромагнітним дисперсним порошком.

Таким чином, отримані нові науково-обґрунтовані теоретичні та практичні результати є значним досягненням для розвитку теорії і практики вихорострумних методів та пристроїв неруйнівного контролю, що їх використовують.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

створені основи теорії визначення динамічних характеристик теплових вихорострумних датчиків, знайдені статичні характеристики вихорострумного контактної робочого перетворювача з досліджуваними плазмовим газовим стовпом люмінесцентної лампи і феромагнітною рідиною, запропоновані у дисертації багатопараметрові безконтактні та контактні вихорострумні методи сумісного контролю магнітних, електричних, геометричних і температурних параметрів трубчастих,

суцільних циліндричних та плоских виробів, удосконалені існуючі електромагнітні методи за рахунок сумісного контролю геометричних, магнітних та електричних параметрів разом з температурою провідних виробів, створений екранний вихорострумний чотирипараметровий метод сумісного контролю відносної магнітної проникності μ_r , питомої електричної провідності σ , температури t феромагнітної труби і коефіцієнта згасання синусоїдального магнітного поля h_r , який характеризує екранні властивості труби, знайдені параметри металевих виробів, що зондуються магнітними полями різної орієнтації – все це надає можливість підвищити достовірність контролю електромагнітних параметрів провідних виробів та речовин, що контролюються, розраховувати, конструювати та створювати електромагнітні установки (у тому числі автоматизовані), на основі використання різних типів теплових вихорострумних датчиків, а також визначати динамічні і статичні характеристики вихорострумних датчиків з "холодними" і нагрітими провідними виробами та речовинами. Знайдені параметри металевих виробів і феромагнітного рідинного середовища, результати дослідження впливу домінуючої домішки вуглецю на кількісні значення електромагнітних параметрів і еквівалентно на температуру сталевих виробів – дозволяють провести оцінювання динамічних та статичних характеристик теплових вихорострумних датчиків з різною орієнтацією магнітного поля та автоматизованих пристроїв, що їх використовують, встановити режими роботи різних типів теплових вихорострумних датчиків з провідними виробами, що нагріваються та речовинами. Розроблені методики визначення динамічних характеристик вихорострумних датчиків з циліндричними виробами, запропоновані в дисертації безконтактні, контактні та екранні методи сумісного контролю магнітних, електричних, геометричних і температурних параметрів виробів різних конфігурацій, було впроваджено на заводі "Електромашина" (м. Харків), на заводі "Південкабель" (м. Харків), на підприємстві ТОВ СУПП фірма "Дігаз" (м. Харків), науково-виробничому підприємстві НПП "Комета" ООО (м. Харків), а також у навчальному процесі на кафедрі "ХТПЕ" НТУ "ХП" у лекційних курсах "Взаємозамінність, стандартизація і технічні вимірювання", "Сертифікація продукції та обладнання", "Методи і засоби контролю обладнання харчових виробництв", "Сертифікація обладнання та харчової продукції", "Метрологія, стандартизація, сертифікація та акредитація" та інших. Економічний ефект від реалізації розробок запропонованих у дисертації, дорівнює 102 тис. грн.

Особистий внесок здобувача в результатах роботи полягає в наступному:

– створено теоретичні основи визначення динамічних характеристик теплових вихорострумних датчиків при різних варіантах нагріву кільцевого повітряного шару і самого виробу; визначено сталі часу вихорострумних датчиків, а також сталі часу процесу нагріву повітряного шару і виробу, причому сталі часу розглянутих перетворювачів є значно меншими у порівнянні зі тепловими сталими часу циліндричного виробу, що, у свою чергу, дозволяє визначати температуру

виробів при якій здійснюється контроль електромагнітних параметрів у кожний момент часу;

- створено чотирипараметровий екстремальний вихорострумний метод сумісного контролю радіуса a , відносної магнітної проникності μ_{rt} , питомого електричного опору ρ_t та температури t циліндричних феромагнітних виробів, заснований на повній компенсації об'єму повітря на розмірі виробу, що реалізується на базі теплового ТВД;

- за рахунок температури t , при якій контролюються магнітні, електричні і геометричні параметри феромагнітного виробу, удосконалено вихорострумний метод визначення параметрів циліндричних виробів, тобто величин a , μ_{rt} і σ_t , який засновано на досягненні екстремуму фазового кута сумарної ЕРС теплового ТВД, досліджено векторну діаграму ЕРС ТВД і фазових кутів при наявності і відсутності нагрівання виробу, отримано формулу для визначення температури виробів при реалізації удосконаленого вихорострумного чотирипараметрового методу;

- удосконалено вихорострумний метод визначення електромагнітних параметрів феромагнітної труби за рахунок сумісного контролю величин μ_{rt} і σ_t з температурою t , що, у свою чергу, приводить до підвищення достовірності контролю електромагнітних параметрів трубчастих виробів; отримано чисельні значення ТКО для магнітних та немагнітних матеріалів, наведено формули для визначення температури магнітних і немагнітних трубчастих виробів;

- досліджено безконтактний модифікований трипараметровий вихорострумний метод контролю діаметра, питомої електричної провідності і температури немагнітного циліндричного виробу, що зондується повздовжнім і поперечним полем теплових вихорострумних датчиків; при розгляді окремого випадку сумісного контролю трьох параметрів мідного і алюмінієвого зразків, отримано результати експериментального визначення величин d , σ_t і t за допомогою теплового ТВД, знайдено значення відносних похибок вимірювань параметрів виробів, тобто γ_d , γ_{σ_t} і γ_t ;

- вперше запропоновано чотирипараметровий вихорострумний метод сумісного контролю параметрів μ_{rt} , ρ_t , dh_t і температури t феромагнітної пластини, заснований на зондуванні плоского виробу магнітним полем кратних частот теплового ТВД;

- розроблено алгоритм сумісного контролю чотирьох параметрів феромагнітних циліндричних виробів, що зондуються полем кратних частот ПВД у широкому діапазоні змінення відносної магнітної проникності μ_{rt} ; запропоновано чотирипараметровий вихорострумний метод контролю феромагнітних плоских виробів на основі отриманих в дисертації універсальних функцій перетворення для ПВД з плоскими виробами, що зондуються магнітним полем кратних частот;

- удосконалено контактний вихорострумний метод за рахунок сумісного контролю відносної магнітної проникності μ_{rt} , питомого електричного опору ρ_t з температурою t , що, у свою чергу, надає можливість підвищити достовірність вихорострумного контролю циліндричних феромагнітних виробів, цей вихорострумний трипараметровий метод реалізується за допомогою

теплового КРП; з урахуванням впливу температури досліджено відомі функції перетворювання КРП, отримано формулу для визначення температури;

- створено контактний резистивно-індуктивний трипараметровий вихорострумний метод сумісного контролю електромагнітних параметрів і температури, який засновано на знайдених автором дисертації, універсальних функціях перетворювання для теплового КРП;

- отримано формулу для визначення температури феромагнітного циліндричного виробу при якій здійснюється контроль електромагнітних параметрів, під час розгляду контактного екстремального вихорострумного методу;

- досліджено вплив домінуючої домішки вуглецю на кількісні значення магнітних, електричних параметрів і еквівалентно на температуру сталевих виробів в діапазоні від 0,1% до 5,5%;

- створено екранний вихорострумний чотирипараметровий метод сумісного контролю відносної магнітної проникності μ_{rt} , питомої електричної провідності σ_t , температури феромагнітної труби t і коефіцієнта згасання синусоїдального магнітного поля h_t , який характеризує екранні властивості труби;

- знайдено статичні характеристики КРП при дослідженнях плазмового газового стовпа люмінесцентної лампи та машинного мастила з дисперсним феромагнітним порошком; вирішена задача, яка пов'язана з сумісним визначенням радіуса a_p , відносної магнітної проникності μ_{trp} , питомого електричного опору ρ_{tp} і температури t_p під час контролю феромагнітної рідини.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідалися на Міжнародних науково-технічних конференціях "Метрологія та вимірвальна техніка" (Харків, 1999, 2002, 2006 р.р.); Міжнародних науково-технічних конференціях "Силова електроніка і енергоефективність" (Алушта, 2001, 2002, 2003 р.р.); Міжнародній науково-практичній конференції "Наука і соціальні проблеми суспільства: людина, техніка, технологія, довкілля" (Харків, 2001р.); 10-ій, 12-ій і 14-ій Міжнародних науково-практичних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (Харків, 2002, 2004, 2006 р.р.); Міжнародному симпозиумі "Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика" (Харків, 2002 р.); Міжнародній науково-практичній конференції "Сучасні наукові досягнення – '2007" (Дніпропетровськ, 2007 р.); Міжнародній науково-практичній конференції "Стратегічні питання мирової науки – 2007" (Дніпропетровськ, 2007 р.); 4-ій Міжнародній науково-технічній конференції "Інформаційна техніка та електромеханіка" (Луганськ, 2007р.); 2-ій Міжнародній науково-практичній конференції "Науковий прогрес на межі тисячоліть – 2007" (Дніпропетровськ, 2007 р.).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 38 наукових працях (з них 26 у фахових виданнях), 3-х патентах України на корисну модель, 8-ми матеріалах наукових конференцій, а також у 1-му навчальному посібнику.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, шости розділів з підсумками, загальних висновків та додатків. Повний обсяг дисертації – 438 стор., з них 54 ілюстрації на 36 стор., 15 табл. на 9 стор., 5 додатків на 40 стор., 483 найменування використаних літературних джерел на 55 стор., усього машинописного тексту 298 стор.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступній частині обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з держбюджетними темами відповідно плану фундаментальних та прикладних НДР Міністерства освіти і науки України, сформульована мета та завдання теоретичних і практичних досліджень, наукова новизна і практична цінність отриманих у роботі результатів, наведено дані про впровадження результатів дисертації, про особистий внесок здобувача, про публікації та апробацію результатів роботи, а також обсяг і структура дисертації. У цій же частині сформульована важлива для народного господарства науково-практична проблема, яка вирішена в дисертації, суть цієї проблеми полягає у тому, що існуючі методи та засоби контролю параметрів провідних виробів і речовин мають низьку достовірність за рахунок того, що не враховують температуру, при якій визначаються електромагнітні параметри об'єктів, що контролюються, а також за рахунок того, що не відомі динамічні та статичні характеристики різного типу теплових вихорострумів датчиків з різною орієнтацією магнітного поля.

У першому розділі розглянуто існуючі методи і засоби для контролю електромагнітних, геометричних та інших фізико-хімічних параметрів матеріалів, виробів та речовин. Інформативними параметрами об'єктів, що контролюються, як відомо, є відносна магнітна проникність μ_r , питома електрична провідність σ (питомий електричний опір ρ), геометричні параметри (радіус a циліндра, або площа поперечного перерізу пластини S_0), а також температура t і домінуючі домішки. Розглянуто існуючі методи та пристрої для вихорострумів контролю матеріалів, виробів і середовищ. Слід відзначити, що до теперішнього часу, при реалізації вихорострумів багатопараметрових методів не було досліджено визначення динамічних характеристик процесу нагріву виробу і сталих часу вихорострумів перетворювачів (безконтактних і контактних). Не було досліджено статичні характеристики контактних вихорострумів перетворювачів з плазовими газовими стовпами і рідинними феромагнітними середовищами. У першому розділі в огляді існуючих вихорострумів методів та засобів розглянуто також сучасні багатопараметрові електромагнітні методи контролю провідних виробів, повітряних та немагнітних рідинних середовищ, вказано, що не дивлячись на те, що останнім часом з'явилися багатопараметрові методи, які поряд з геометричними і електромагнітними параметрами дозволяють визначити температуру об'єктів, що контролюються, описані існуючі методи і пристрої на базі яких вони реалізуються, не дозволяють одержати повної картини про сумісний контроль магнітних, електричних, геометричних параметрів та температури у різних типах теплових вихорострумів перетворювачів, теорія роботи яких на

сьогодні невідома, з різними формами виробів та різноманітними речовинами, зокрема існуючі вихорострумкові методи мають низьку достовірність контролю.

У другому розділі досліджено теоретичні основи перехідних процесів нагріву металевого циліндричного виробу та повітряного шару між виробом і нагрівачем у теплових вихорострумкових перетворювачів. Спочатку на основі нестационарного рівняння теплового балансу знаходять температуру нагрівача (розташованого у тепловому вихорострумковому перетворювачі), який включає до себе ніхромовий дріт довжиною 2,1 м і діаметром 0,6 мм. Отримано вираз для визначення температури дроту нагрівача, тобто

$$t = \frac{P_n}{mc} (\tau_2 - \tau_1), \quad (1)$$

де P_n – корисна потужність нагрівача; m – маса дроту; c – питома теплоємність матеріалу дроту, τ_1 і τ_2 – початковий і кінцевий часи нагріву дроту.

Формула (1) знайдена при умові нехтування стаціонарними складовими рівняння теплового балансу, причому залишається тільки нестационарний складовий. Прирощення тепла нагрівача передається спочатку у повітряний шар між виробом і нагрівачем (у середині теплового вихорострумкового перетворювача), а потім у циліндричний металевий виріб, знайдена температура дроту нагрівача по формулі (1) складає 101,2°C. Розглянуто два теплових режими нагріву гріючого пристрою: стрибком та періодично. При змінній температурі нагрівача стрибком визначено динамічні характеристики повітряного шару між виробом і обмоткою нагрівача.

Знайдено формулу, яка характеризує поведінку нагріву повітряного шару, у порівнянні з нагрівом стрибком нагрівача, причому для прирощення температури маємо таке співвідношення

$$\Delta t_{\text{пов}} = \Delta t_{\text{н}} (1 - e^{-\tau/T_{\text{пов}}}), \quad (2)$$

де $\Delta t_{\text{пов}}$ – амплітуда прирощення повітряного шару; $\Delta t_{\text{н}}$ – амплітуда прирощення температури нагрівача; e – основа натурального логарифму; $T_{\text{пов}}$ – стала часу повітряного шару; τ – час нагріву повітряного шару.

При одержуванні цього виразу враховується у рівнянні теплового балансу тільки складова, пов'язана з теплопровідністю повітряного шару, а такі складові, які характеризують конвективні втрати, не враховуються, тому що повітряний шар був закритий з усіх боків і складова, пов'язана з випромінюванням у вигляді електромагнітних хвиль, також була мала, тому що прирощення температури шару теж мале.

Стала часу нагріву повітряного шару знаходиться з формули

$$T_{\text{пов}} = \frac{m_{\text{пов}} c_{\text{пов}}}{G_{\text{тпов}}}, \quad (3)$$

де $G_{\text{тпов}}$ – тепла провідність повітряного шару, що займає повітряний трубчастий циліндр із ра-

діусами $a_{н2}$ і a (внутрішній радіус нагрівача і радіус виробу); $c_{пов}$ – питома теплоємність повітряного шару; $m_{пов}$ – маса повітряного трубчастого циліндру.

Далі, користуючись довідковими даними такими, як: $c_{пов} = 1,005$ кДж/(кг·К), $m_{пов} = 1,229 \cdot 10^{-4}$ кг, $G_{тпов} = 0,196$ Вт/(м·К) було визначено чисельне значення сталої часу повітряного шару $T_{пов} = 0,6275$ с.

Час установлення стаціонарного режиму прогріву циліндра з повітрям визначається по формулі

$$\tau_{уст} = T_{пов} \ln \frac{\Delta t_{н}}{\Delta t_{н} - \Delta t_{пов}}. \quad (4)$$

Розрахунки показують, що $\tau_{уст} = 2,8865$ с, тобто повітряний трубчастий циліндр нагрівається достатньо швидко, при цьому виконання нагріву стрибком повітряного шару здійснюється шляхом внесення нагрівача в середину вихорострумового перетворювача.

Також було розглянуто перехідний процес нагріву феромагнітного виробу діаметром 20 мм і довжиною 0,7 м (вважаємо, що прирощення температури повітряного шару $\Delta t_{пов}$ змінюється стрибком). Слід відзначити, що для здійснення режиму змінення температури $\Delta t_{пов}$ стрибком, треба дуже швидко внести виріб у повітряне середовище між нагрівачем і обмоткою перетворювача. Формула, яка пов'язує залежності величин $\Delta t_{пов}$ і $\Delta t_{в}$, має вигляд

$$\Delta t_{в} = \Delta t_{пов} (1 - e^{-\tau/T_{в}}), \quad (5)$$

де $T_{в}$ – стала часу виробу.

При відомих чисельних значеннях $m_{в} = 1,7364$ кг, $G_{тв} = 0,16$ Вт/(м·К), $c_{в} = 0,502$ кДж/(кг·К) визначено динамічні характеристики виробу, що нагрівається. Чисельні значення сталої часу і часу установлення стаціонарного режиму прогріву виробу склали відповідно: $T_{в} = 5,45$ с, $\tau_{уст} = 25$ с.

Наступний, розглянутий у другому розділі дисертації, режим нагріву повітряного шару від нагрівача - це періодичне змінення прирощення температури нагрівача. Тоді нестационарне диференціальне рівняння, яке характеризує поведінку нагріву повітряного циліндру між нагрівачем і виробом з урахуванням правої синусоїдальної частини, має вигляд

$$T_{пов} \Delta t'_{пов} + \Delta t_{пов} = \Delta t_{mn} \sin \omega_{н} t, \quad (6)$$

де Δt_{mn} – амплітудне значення приросту температури нагрівача; $\omega_{н}$ – циклічна частота зміни $\Delta t_{н}$; $T_{пов}$ – стала часу, яка знаходиться із виразу (3).

Будемо шукати розв'язання рівняння (6) у вигляді двох частин. Стаціонарну частину $\Delta t_{пов}^*$ рішення можна виразити як

$$\Delta t_{пов}^* = \Delta t_{mn} e^{j\omega_{н}\tau}. \quad (7)$$

Застосувавши відомий символічний метод операцій з комплексними величинами, запишемо

диференційне рівняння (6) у вигляді

$$T_{\text{пов}} \frac{d \Delta t_{\text{мпов}} e^{j\omega_n \tau}}{d\tau} + \Delta t_{\text{мпов}} e^{j\omega_n \tau} = \Delta t_{\text{мн}} e^{j\omega_n \tau}, \quad (8)$$

де $\Delta t_{\text{мпов}}$ – амплітудне значення приросту температури повітряного шару.

Із рівняння (8) знайдено вираз для визначення модуля приросту температури повітряного шару у такому вигляді

$$|\Delta t_{\text{мпов}}| = \frac{\Delta t_{\text{мн}}}{|1 + j\omega_n T_{\text{пов}}|} = \frac{\Delta t_{\text{мн}}}{\sqrt{1 + \omega_n^2 T_{\text{пов}}^2}}. \quad (9)$$

Із формули (9) випливає, що модуль приросту температури повітряного шару менший, ніж модуль приросту температури нагрівача. Визначено чисельне значення модуля приросту температури повітряного шару, тобто $\Delta t_{\text{мпов}} = 94,153^\circ\text{C}$. Знайдено фазовий кут $\varphi_{\text{пов}}$ між приростами температури повітряного шару і нагрівача, який складає $\varphi_{\text{пов}} = -21,507$ град. Знак "-" свідчить про те, що приріст температури $\Delta t_{\text{пов}}$ відстає за фазою від приросту температури нагрівача $\Delta t_{\text{н}}$.

У підсумку стаціонарний розв'язок диференційного рівняння (6) запишемо у вигляді

$$\Delta t_{\text{пов}}^* = \frac{\Delta t_{\text{мн}}}{\sqrt{1 + \omega_n^2 T_{\text{пов}}^2}} \sin \omega_n \tau - \varphi_{\text{пов}}. \quad (10)$$

Нестационарний розв'язок рівняння (6) має такий вигляд

$$\Delta t_{\text{пов}}^{**} = \frac{\Delta t_{\text{мн}}}{\sqrt{1 + \omega_n^2 T_{\text{пов}}^2}} e^{-\tau/T_{\text{пов}}} \sin \varphi_{\text{пов}}. \quad (11)$$

Використовуючи початкові умови, повний розв'язок рівняння (6) має такий вигляд

$$\Delta t_{\text{пов}} = \frac{\Delta t_{\text{мн}}}{\sqrt{1 + \omega_n^2 T_{\text{пов}}^2}} \left[\sin \omega_n \tau - \varphi_{\text{пов}} + e^{-\tau/T_{\text{пов}}} \sin \varphi_{\text{пов}} \right]. \quad (12)$$

Досліджено перехідний процес нагріву циліндричного виробу (вважаємо, що приросту температури повітряного шару $\Delta t_{\text{пов}}$, у середині вихорострумового перетворювача змінюється періодично)

$$T_{\text{в}} \Delta t'_{\text{в}} + \Delta t_{\text{в}} = \Delta t_{\text{мпов}} \sin \omega_n \tau - \varphi_{\text{пов}}, \quad (13)$$

де $\Delta t'_{\text{в}}$ - це похідна приросту температури виробу; $\Delta t_{\text{мпов}}$ – амплітуда коливань приросту температури повітряного циліндру.

Знайдено повний розв'язок рівняння (13)

$$\Delta t_{\text{в}} = \frac{\Delta t_{\text{мпов}}}{\sqrt{1 + \omega_n^2 T_{\text{в}}^2}} \left[\sin \omega_n \tau - \varphi_{\text{пов}} + \varphi_{\text{в}} + e^{-\tau/T_{\text{в}}} \sin \varphi_{\text{пов}} + \varphi_{\text{в}} \right]. \quad (14)$$

Як випливає з виразу (14), повне рішення диференційного рівняння (13) складається із ста-

ціонарного розв'язку $\Delta t_B^* = f(\tau)$ і нестационарного розв'язку $\Delta t_B^{**} = f(\tau)$. На рис. 1 наведено залежності Δt_B , Δt_B^* , Δt_B^{**} і $\Delta t_{\text{пов}}$ від часу нагріву τ .

Розглянуті вище два режиму нагріву дозволяють досліджувати загальний випадок змінення температури зовнішнього середовища і як воно впливає на температуру виробу.

Дійсно, на рис. 2 наведено дві залежності, які характеризують перехідні процеси: нагрів виробу характеризує крива 1, а крива 2 характеризує змінення температури повітря і реєстрацію цього процесу перетворювачем. Для цього розбивають криву 1 на ділянки, гладкі ділянки I, III і IV відтворюються у вигляді рядів Фур'є і складаються по гармонікам часу на кожній ділянці кривої 1, ділянки II і V характеризують змінення температури повітря стрибком і відпрацювання датчиком змінення температури Δt експоненті.

Таким чином, маючи змінення температури стрибком і періодично, можна здобути відпрацювання датчиком загального випадку впливу зовнішньої температури середовища на виріб.

Розроблено методику визначення сталих часу намагнічувальної обмотки безконтактних ПВД або ТВД, розглянуто різні випадки знаходження сталих часу безконтактного вихорострумowego перетворювача: без виробу, перетворювача з феромагнітним виробом (при проходженні постійного за часом струму), та при зондуванні виробу змінним за часом магнітним полем з частотою $f = 41,32$ Гц. Чисельні значення сталих часу складають відповідно: $T_{\text{п}} = 0,288 \cdot 10^{-3}$ с (для намагнічувальної обмотки без виробу), $T_{\text{п}} = 3,88 \cdot 10^{-3}$ с (для вихорострумowego перетворювача з виробом, що зондується постійним за часом полем), $T_{\text{п.екв}} = 1,91 \cdot 10^{-3}$ с (при зондуванні виробу змінним за часом магнітним полем). При цьому сталі часу розглянутих вихорострумowych перетворювачів суттєво менші, ніж сталі часу процесу нагріву виробу, що, в свою чергу, надає можливість здійснювати контроль процесу нагріву виробу у кожний момент часу.

У третьому розділі вдосконалено існуючі і створено нові багатопараметрові вихорострумові безконтактні методи сумісного контролю параметрів трубчастих, суцільних циліндричних і плоских виробів на основі застосування теплового трансформаторного вихорострумowego датчика (ТВД). Вдосконалено існуючий вихорострумовий метод визначення електромагнітних параметрів трубчастого феромагнітного виробу за рахунок сумісного контролю величин μ_{rt} і σ_t з температурою t , отримано формулу для визначення температури феромагнітного трубчастого виробу.

Наведено формулу для визначення температурного коефіцієнту опору (ТКО) α при двох відомих температурах t і t_1 , до яких нагрівається виріб, при цьому α знаходиться при виконанні кожного виміру, як правило, цей коефіцієнт є невідомим для багатьох матеріалів. Формула для визначення α має вигляд

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_1}{t\rho_1 - t_1\rho} . \quad (15)$$

Отримано результати чисельних значень ТКО α для нікелю, сталі – 3 і міді. Удосконалено вихорострумний метод визначення двох електромагнітних параметрів (μ_r і σ_t) трубчастого виробу за рахунок сумісного контролю цих величин з температурою t , при якій вони знаходяться. Контроль трьох параметрів трубчастих виробів μ_r , σ_t і t здійснювався для двох випадків (при цьому вхідні данні відомі і беруться при початковій температурі). Як показують дослідження, наприклад, для першого випадку при температурах $t = 20, 100, 150^\circ\text{C}$, $\mu_r \cdot \tilde{E}_H$ складає: $\mu_r \cdot \tilde{E}_H_{-20^\circ} = 100$, $\mu_r \cdot \tilde{E}_H_{-40^\circ} = 109,38$, $\mu_r \cdot \tilde{E}_H_{-450^\circ} = 115,23$. Питома електрична провідність для цих же температурних крапок складає: $\sigma_{20^\circ} = 0,559 \cdot 10^7$ См/м, $\sigma_{100^\circ} = 0,44 \cdot 10^7$ См/м, $\sigma_{150^\circ} = 0,389 \cdot 10^7$ См/м. При цьому температура для розглянутого першого випадку дорівнює: $t_{20^\circ} = 19,67^\circ\text{C}$, $t_{100^\circ} = 100,2^\circ\text{C}$, $t_{150^\circ} = 149,76^\circ\text{C}$. Для другого випадку маємо відповідно: $\mu_r \cdot \tilde{E}_H_{-20^\circ} = 150$, $\mu_r \cdot \tilde{E}_H_{-400^\circ} = 164,06$, $\mu_r \cdot \tilde{E}_H_{-450^\circ} = 172,85$; $\sigma_{20^\circ} = 0,5586 \cdot 10^7$ См/м, $\sigma_{100^\circ} = 0,51 \cdot 10^7$ См/м, $\sigma_{150^\circ} = 0,485 \cdot 10^7$ См/м; отриманні значення температури для другого випадку складають: $t_{20^\circ} = 18,37^\circ\text{C}$, $t_{100^\circ} = 98,21^\circ\text{C}$, $t_{150^\circ} = 148,12^\circ\text{C}$.

Розглянуто два високочастотних трипараметрових вихорострумних метода контролю параметрів немагнітного трубчастого виробу, що нагрівається: радіуса a , питомого електричного опору ρ_t і температури t труби за допомогою теплового ТВД, при цьому на високій частоті змінення поля при визначенні залежних від температури вносимої $E_{\text{вн}}$ і сумарної $E_{\Sigma t}$ ЕРС теплового ТВД, контролюються всі три вказаних параметри немагнітного трубчастого виробу, що нагрівається. Завдяки двом універсальним функціям перетворення, які наведено з урахуванням змінення температури виробу, досліджено безконтактний модифікований трипараметровий вихорострумний метод контролю геометричних, електричних і температурних параметрів немагнітного циліндричного виробу при зондуванні його повздовжнім та поперечним магнітним полем теплових вихорострумних перетворювачів. Удосконалено відомий вихорострумний метод визначення діаметра і питомого електричного опору, за рахунок контролю цих параметрів разом з температурою, отримано експериментальні результати вимірювання величин d_t , ρ_t і t . Запропоновано чотирипараметровий вихорострумний метод сумісного контролю параметрів a , μ_r , σ_t і t , заснований на досягненні екстремуму уявної частини вносимої нормованої ЕРС теплового ТВД, тобто $\text{Im}E_{\text{вн}}$, який відрізняється від відомого тим, що здійснюється повна компенсація ЕРС ТВД без виробу, а у відомого метода є такий недолік, як часткова компенсація ефектів повітряного зазору у залежності від діаметра досліджуваного виробу. Удосконалено вихорострумний метод визначення величин a , μ_r , σ_t циліндричного виробу за рахунок сумісного контролю електромагнітних та геометричних параметрів разом з температурою t , цей метод засновано на досягненні екстремуму фазового кута

сумарної ЕРС теплового ТВД, яка також залежить від температури, розглянуто векторну діаграму ЕРС і фазових кутів ТВД при наявності і відсутності нагрівання виробу. Встановлено, що при нагріванні виробу (з ростом температури) ЕРС $E_{\Sigma t}$ більша, ніж $E_{\Sigma'}$ (ця ж ЕРС без нагріву), а фазовий кут при нагріванні $\varphi_{0\max t}$ менший, ніж такий же кут без нагріву.

Створено чотирипараметровий вихорострумний безконтактний метод контролю феромагнітної пластини, заснований на використанні двох кратних частот магнітного поля теплового ТВД, зонduючого плоский виріб. Метод створено на базі запропонованих універсальних функцій перетворення, які характеризують залежності відношення нормованих вносимих ЕРС на першій і другій кратних частотах магнітного поля від фазових кутів $\varphi_{\text{вн}1t}$ і $\varphi_{\text{вн}2t}$ на цих же частотах відповідно (за допомогою цих функцій перетворення визначено величину μ_{rt}). Наприклад, перша функція має вигляд

$$N_{\text{пт}}^{**} = \frac{E_{\text{вн}1t} \cdot 4}{E_{\text{вн}2t}} = \frac{\sqrt{1 - \mu_{rt} \operatorname{Re}_1 \Pi_t^2 + \mu_{rt} \operatorname{Im}_1 \Pi_t^2}}{\sqrt{1 - \mu_{rt} \operatorname{Re}_2 \Pi_t^2 + \mu_{rt} \operatorname{Im}_2 \Pi_t^2}} = f(\varphi_{\text{вн}1t}), \quad (16)$$

де індекси "1" і "2" мають відношення до кратних частот f_1 і f_2 ; $E_{\text{вн}1t}$ і $E_{\text{вн}2t}$ – вносимі ЕРС теплового ТВД на першій і другій кратній частоті, у даному випадку треба враховувати, що $x_{2t} = 2x_{1t}$ і це означає, що $f_2 = 4f_1$; $\operatorname{Re}_1 \Pi_t$ і $\operatorname{Re}_2 \Pi_t$ – реальні частини параметру Π , який залежить від узагальненого параметру x і температури, $\operatorname{Im}_1 \Pi_t$ і $\operatorname{Im}_2 \Pi_t$ – уявні частини цього ж параметру Π .

Другий параметр феромагнітного плоского виробу, площу поперечного перерізу пластини S_{0t} , визначають із залежностей питомих нормованих вносимих ЕРС $N_{\text{п}1t}$ і $N_{\text{п}2t}$ теплового ТВД на першій і другій кратних частотах від фазових кутів $\varphi_{\text{вн}1t}$ і $\varphi_{\text{вн}2t}$, таким чином, при знайденому раніше значенні μ_{rt} , знаходимо спочатку величину η (форм-фактора), а потім площу поперечного перерізу пластини S_{0t} за допомогою теплового ТВД. І нарешті, з інших функцій перетворення, тобто залежностей x_{1t} і x_{2t} від $\varphi_{\text{вн}1t}$ і $\varphi_{\text{вн}2t}$, було визначено питомий електричний опір ρ_{1t} і ρ_{2t} для двох кратних частот магнітного поля теплового ТВД по формулах

$$\rho_{1t} = \frac{d_1^2 N_{\text{п}1t}(\varphi_{\text{вн}1t}) \pi f_1 \mu_0 \mu_{rt} N_{\text{пт}}^{**}(\varphi_{\text{вн}1t})}{x_{1t}^2 \mu_{rt}(\varphi_{\text{вн}1t})}, \quad (17)$$

$$\rho_{2t} = \frac{d_2^2 N_{\text{п}2t}(\varphi_{\text{вн}2t}) \pi f_2 \mu_0 \mu_{rt} N_{\text{пт}}^{**}(\varphi_{\text{вн}2t})}{x_{2t}^2 \mu_{rt}(\varphi_{\text{вн}2t})}, \quad (18)$$

де - d_1 і d_2 товщини пластини на кратних частотах f_1 і f_2 теплового ТВД; x_{1t} і x_{2t} - узагальнені магнітні параметри на частотах f_1 і f_2 , які залежать від температури; μ_0 - магнітна стала, тут у круглих дужках стоять параметри, від яких залежать величини перед дужками.

Було також визначено температуру феромагнітної пластини для двох кратних частот

$$t_1 = \frac{1 + \alpha t_H}{\alpha} \left(\frac{d_1^2 N_{п1t}; \Phi_{вн1t} \pi f_1 \mu_0 \mu_{rt} N_{п1t}^{**}; \Phi_{вн1t} - 1}{x_{1t}^2 \rho_{rt}; \Phi_{вн1t} - \rho_H} \right) + t_H; \quad (19)$$

$$t_2 = \frac{1 + \alpha t_H}{\alpha} \left(\frac{d_2^2 N_{п2t}; \Phi_{вн2t} \pi f_2 \mu_0 \mu_{rt} N_{п2t}^{**}; \Phi_{вн2t} - 1}{x_{2t}^2 \rho_{rt}; \Phi_{вн2t} - \rho_H} \right) + t_H, \quad (20)$$

де t_H - відома початкова температура; ρ_H - питомий електричний опір, який є відомим при початковій температурі.

У третьому розділі також наведено чисельні значення похибок вимірювань багатьох параметрів виробів при використанні теплового ТВД, так наприклад, відносні похибки сумісних вимірювань діаметра d , питомого електричного опору ρ_t і температури t немагнітного циліндричного виробу складають відповідно: 0,5%; 2,3%; 4,1%. Отримано значення відносних похибок вимірювань магнітних, електричних і температурних параметрів феромагнітної пластини, які складають: $\gamma_{\mu_{rt}} = 0,53\%$; $\gamma_{\rho_t} = 1,67\%$; $\gamma_t = 4,24\%$.

У четвертому розділі розроблено алгоритм контролю чотирьох параметрів феромагнітних циліндричних виробів, що зондуються магнітним полем кратних частот параметричного вихорострумового датчика (ПВД) у широкому діапазоні змінення відносної магнітної проникності μ_{rt} . Отримано універсальні функції перетворювання для ПВД з досліджуваними плоскими виробами, що зондуються магнітним полем кратних частот.

Перша функція перетворювання – це залежність відношення повного нормованого вносимого опору на першій частоті f_{1t} до повного нормованого вносимого опору на другій кратній частоті f_{2t} магнітного поля ПВД від фазового вносимого кута електричного опору обмотки ПВД з плоским виробом $\Phi_{внп1t}$ на першій частоті. Друга функція перетворювання, за допомогою якої здійснюється контроль площі поперечного перерізу пластини, є залежність повного питомого нормованого опору ПВД з плоским феромагнітним виробом на першій частоті магнітного поля f_{1t} від цього ж фазового кута. Третя функція перетворювання характеризує собою залежність узагальненого параметру $x_{п1t}$ феромагнітної пластини на першій частоті магнітного поля ПВД від фазового кута $\Phi_{внп1t}$ на цій же частоті f_{1t} .

Наведені вище, нові універсальні функції перетворювання надано в дисертації у широкому діапазоні змінення відносної магнітної проникності μ_{rt} феромагнітних плоских виробів, що зондуються магнітним полем кратних частот ПВД. Слід відзначити, що використання кратних частот магнітного поля ПВД під час здійснення чотирипараметрового контролю феромагнітних плоских виробів, приводить до суттєвого спрощення алгоритмів вимірювальних та розрахункових процедур.

На основі цих функцій перетворювання, створено чотирипараметровий вихорострумовий безконтактний метод контролю параметрів феромагнітних плоских виробів, при цьому запропоно-

ваний алгоритм контролю чотирьох параметрів циліндричних і плоских виробів, що зондуються магнітним полем кратних частот ПВД, практично не відрізняється, а суттєво відрізняються тільки функції перетворювання.

Перша функція перетворювання має такий аналітичний вигляд

$$z_{\text{внп}}^{**} = \frac{z_{\text{внп}1t}^*}{z_{\text{внп}2t}^*} = \frac{4z_{\text{внп}1t}^*}{z_{\text{внп}2t}^*} = \sqrt{\frac{1 - \mu_{rt} \sqrt{1 - e^{-x_{\text{п}1t}} \cos x_{\text{п}1t} + e^{-x_{\text{п}1t}} \sin x_{\text{п}1t}} + \mu_{rt} \sqrt{1 - e^{-x_{\text{п}1t}} \cos x_{\text{п}1t} - e^{-x_{\text{п}1t}} \sin x_{\text{п}1t}}}{1 - \mu_{rt} \sqrt{1 - e^{-x_{\text{п}2t}} \cos x_{\text{п}2t} + e^{-x_{\text{п}2t}} \sin x_{\text{п}2t}} + \mu_{rt} \sqrt{1 - e^{-x_{\text{п}2t}} \cos x_{\text{п}2t} - e^{-x_{\text{п}2t}} \sin x_{\text{п}2t}}}} = f(\Phi_{\text{внп}1t}), \quad (21)$$

де $z_{\text{внп}1t}^*$ і $z_{\text{внп}2t}^*$ - питомі вносимі нормовані електричні опори обмотки ПВД з феромагнітним плоским виробом на першій і другій кратних частотах змінення зондуємого магнітного поля.

Далі при відомому фазовому куті $\Phi_{\text{внп}1t}$, отримано другу функцію перетворювання для ПВД з плоским виробом

$$z_{\text{внп}1t}^* = \frac{z_{\text{внп}1t} l}{\omega_{1t} \mu_0 S_k W_k^2 \eta} = \sqrt{1 - \mu_{rt} \sqrt{1 - e^{-x_{\text{п}1t}} \cos x_{\text{п}1t} + e^{-x_{\text{п}1t}} \sin x_{\text{п}1t}} + \mu_{rt} \sqrt{1 - e^{-x_{\text{п}1t}} \cos x_{\text{п}1t} - e^{-x_{\text{п}1t}} \sin x_{\text{п}1t}}} = f(\Phi_{\text{внп}1t}). \quad (22)$$

Наприклад, на рис. 3 - 5 представлено залежності відношення $z_{\text{внп}1t}^*/z_{\text{внп}2t}^*$ від $\Phi_{\text{внп}1t}$, $z_{\text{внп}1t}^*$ від $\Phi_{\text{внп}1t}$, а також $x_{\text{п}1t}$ від $\Phi_{\text{внп}1t}$ для феромагнітних пластин ($\mu_{rt} = 1,2; 1,3; 1,5; 2$) при використанні ПВД, працюючого на кратних частотах.

За першою функцією перетворювання, тобто $z_{\text{внп}1t}^* = f(\Phi_{\text{внп}1t})$, знаходять величину μ_{rt} плоского виробу, за допомогою другої функції перетворювання знаходять спочатку величину форм-фактора η , що надає можливість визначити площу поперечного перерізу S_{0t} пластини, після цього, використовуючи залежність $x_{\text{п}1t}$ від $\Phi_{\text{внп}1t}$ для ПВД з плоским виробом, було визначено питому електричну провідність σ_t феромагнітного плоского виробу, що зондується магнітним полем кратних частот, при різних температурах

$$\sigma_t = \frac{\eta_1^2 \cdot x_{\text{п}1t}^2 \cdot \Phi_{\text{внп}1t}; \mu_{rt} \cdot d_k^2 \cdot h_k^2}{d_1^2 \cdot f_{1t} \cdot \pi \mu_0 \cdot S_{0t}^2 \cdot \Phi_{\text{внп}1t}; \mu_{rt} \cdot \Phi_{\text{внп}1t}}. \quad (23)$$

Формулу для визначення температури t феромагнітної пластини знайдено у вигляді

$$t = \frac{1 + \alpha t_H}{\alpha} \left[\left(\frac{d_1^2 \cdot \sigma_t \pi \mu_{rt} \cdot \Phi_{\text{внп}1t}; \mu_{rt} \cdot f_{1t} \mu_0 \cdot S_{0t}^2 \cdot \Phi_{\text{внп}1t}; \mu_{rt}}{\eta_1^2 \cdot d_k^2 \cdot h_k^2 \cdot x_{\text{п}1t}^2 \cdot \Phi_{\text{внп}1t}; \mu_{rt}} \right) - 1 + t_H \right], \quad (24)$$

де d_k і h_k - відповідно товщина і ширина каркасу ПВД з плоским виробом, що зондується

магнітним полем кратних частот.

У п'ятому розділі вдосконалено існуючий вихорострумний контактний метод визначення електромагнітних параметрів циліндричного виробу за рахунок сумісного контролю величин μ_{rt} і σ_t з температурою t (при якій визначаються ці параметри), за допомогою теплового вихорострумного контактного робочого перетворювача КРП. На фрагментах універсальних функцій перетворення, відомих раніше, поставлені температурні крапки для $t = 20; 60; 100; 150; 180^\circ\text{C}$.

Створено контактний резистивно-індуктивний трипараметровий вихорострумний метод сумісного контролю магнітної проникності μ_{rt} , питомого електричного опору ρ_t і температури t феромагнітного циліндричного виробу.

Цей метод засновано на нових універсальних функціях перетворення, отриманих для теплового КРП (при цьому, в дисертації знайдено розрахункові і графічні залежності параметрів теплового КРП), наприклад, графічні залежності надано на рис. 6 а, б.

Формула для визначення температури через знайдені величини параметрів теплового КРП має вигляд

$$t = \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \left(\frac{\mu_0 f_t d^2}{4x_t^2 L_{\text{вхл}} L_{\text{внт}} \rho_t} - 1 \right) + t_1. \quad (25)$$

Розглянуто методику оцінювання відносних похибок вимірювань параметрів μ_{rt} , ρ_t і t циліндричного феромагнітного виробу при використанні теплового КРП, за допомогою якого реалізується контактний резистивно-індуктивний трипараметровий вихорострумний метод, отримано чисельні значення відносних похибок вимірювань трьох параметрів виробу, наприклад, при $t = 140^\circ\text{C}$ чисельні значення цих похибок склали відповідно: $\delta\mu_{rt}/\mu_{rt} = 0,4\%$, $\delta\rho_t/\rho_t = 1,08\%$, $\delta t/t = 3,75\%$. Побудовано залежності $\delta\mu_{rt}/\mu_{rt}$, $\delta\rho_t/\rho_t$ і $\delta t/t$ від температури t циліндричного феромагнітного виробу.

Одержана формула для визначення температури t циліндричного виробу через знайдені величини μ_{rt} і σ_t , при розгляді контактного екстремального вихорострумного методу контролю параметрів циліндричного виробу, яка має вигляд

$$t = \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \left[\frac{x_{1t}^2}{2\pi a^2 \mu_0 \mu_{rt} f_1 \sigma_t} - 1 \right] + t_1, \quad (26)$$

де x_{1t} – значення залежного від температури, узагальненого параметру при екстремумі.

Досліджено чутливість вихорострумного контактного малогабаритного робочого перетворювача з частотним виходом, причому середня чутливість складає $49 \text{ Гц}/^\circ\text{C}$. Знайдено сталі часу контактного робочого перетворювача КРП при проходженні по циліндричному виробу постійного і змінного за часом електричного струму, а також при дослідженні широкого частотного діапазону змінного струму. Із одержаних результатів випливає, що при протіканні постійного струму через

циліндричний виріб, стала часу КРП є максимальною і дорівнює $T_{к=} = 2,09$ мс; при $f = 80$ Гц, $T_{к} = 1,52$ мс; при $f = 600$ Гц, $T_{к} = 0,315$ мс; при $f = 1100$ Гц, $T_{к} = 0,194$ мс. Також було знайдено сталі часу КРП на змінному струмі при різних температурах виробу, а саме: $t = 20, 100, 150^{\circ}\text{C}$. При цьому $T_{к1} = 0,6$ мс ($t = 20^{\circ}\text{C}$); $T_{к2} = 0,32$ мс ($t = 100^{\circ}\text{C}$); $T_{к3} = 0,19$ мс ($t = 150^{\circ}\text{C}$), у даному випадку відповідно використовувалися частоти струму 231,6 Гц, 411,7 Гц, 643,3 Гц.

У шостому розділі було досліджено вплив домінуючої домішки вуглецю на кількісні значення електромагнітних параметрів і еквівалентно на температуру циліндричних сталевих виробів, при змінненні відсоткового складу вуглецю у сталі А-20 від 0,1 до 5,5%. Показано, що з ростом відсоткового складу вуглецю відносна магнітна проникність і питома електрична провідність зменшуються з μ_r 196,52 при домішки $C = 0,1\%$ до 116,85 при $C = 5,5\%$, а σ від $0,732 \cdot 10^7$ См/м ($C = 0,1\%$) до $0,531 \cdot 10^7$ См/м ($C = 5,5\%$), таким чином, зменшення величин μ_r і σ складає приблизно 40% і 31% відповідно. Встановлено, що підвищення складу домінуючої домішки вуглецю приводить до зростання питомого електричного опору ρ і як слід, до зменшення узагальненого параметру x , а це в свою чергу, означає, що збільшення відсоткового складу вуглецю еквівалентно зростанню температури, наприклад, якщо нагріти чистий метал до температури 150°C , то це буде еквівалентно підвищенню відсоткового складу вуглецю від 0,1% до 5,5%.

Досліджено тепловий екранний вихорострумний трубчастий пристрій. Створено екранний вихорострумний чотирипараметровий метод сумісного контролю відносної магнітної проникності μ_r , питомої електричної провідності σ , температури t феромагнітної труби і коефіцієнта згасання h_t синусоїдального повздовжнього магнітного поля у трубчастому виробі.

На рис. 7 представлено схему екранного вихорострумного трубчастого пристрою, яка включає до себе: К – каркас з намагнічувальною обмоткою; С – соленоїд; ГП – гріючий пристрій для зміннення температури феромагнітної труби; ЕВД – екранний вихорострумний датчик, який знаходиться в середині труби; ДСН – джерело синусоїдальної напруги; ВЧ – вимірювач частоти; КВ – котушку взаємодуктивності; ВФ – вимірювач фази; ФТ – феромагнітний трубчастий зразок; ВН і ВН1 – вимірювачі напруги; А – амперметр.

Під час роботи пристрою вимірювач напруги ВН визначає ЕРС, яку наводить ЕВД, тобто ЕРС E_{3t} , ЕРС E_0 вимірюється з вторинної обмотки котушки взаємодуктивності КВ і реєструється вимірювачем напруги ВН1, а потім подається до вимірювача фази ВФ, при цьому котушка взаємодуктивності КВ дозволяє вимірювати фазовий кут φ_{3t} між ЕРС E_0 і E_{3t} , який реєструється ВФ, гріючий пристрій ГП змінює температуру феромагнітної труби.

Перед усім, для проведення подальших досліджень треба знати магнітний потік в середині труби, фазовий кут зсуву φ_{3t} , магнітну індукцію труби, а також ЕРС ЕВД E_{3t} , причому всі ці величини у даному випадку, залежать від температури трубчастого виробу, що нагрівається.

Величину μ_r визначають за формулою

$$\mu_r = \frac{E_{3t} a}{2 \cdot 4,44 f_t \mu_0 H_0 S_d W_d d} - \frac{b}{2d} + 1,$$

де H_0 – напруженість магнітного поля зовні труби, параметри якої контролюються на основі згасання магнітного поля; S_d – площа поперечного перерізу ЕВД; W_d – число витків ЕВД; d – товщина стінки феромагнітної труби, a – зовнішній радіус трубчастого виробу, що нагрівається, b – його внутрішній радіус; f_t – частота змінення поля, яка залежить від температури.

Формула для визначення питомої електричної провідності σ_t трубчастого виробу, що нагрівається, має вигляд

$$\sigma_t = \frac{\operatorname{tg} \varphi_{3t}}{\pi d b f_t \mu_0}. \quad (28)$$

Вираз для знаходження температури феромагнітної труби має вигляд

$$t = \frac{1 + \alpha t_h}{\alpha} \left[\frac{\sigma_t \pi d b \mu_0 f_t}{\operatorname{tg} \varphi_{3t}} - 1 \right] + t_h. \quad (29)$$

При цьому для визначення температури труби пропонується використовувати умову постійного значення глибини проникнення магнітного поля δ , у свою чергу, змінення електромагнітних параметрів від впливу температури можна компенсувати шляхом варіації частоти магнітного поля.

Наведено формулу для визначення коефіцієнта згасання h_t , яка має вигляд

$$h_t = b \left[\frac{1 + 2 \mu_r - 1 \frac{d}{b}}{\mu_r a} \right]. \quad (30)$$

Розглянуто одинарний індуктивний перетворювач з магнітопроводом, у повітряному зазорі якого контролюються товщини листів, плоских виробів, стрічок та діаметри прутків до 5 мм.

У шостому розділі досліджено можливість застосування теорії контактного робочого перетворювача КРП до контролю параметрів плазмового стовпа люмінесцентної лампи стандартного типу: довжина $l = 0,9$ м, діаметр $d = 40$ мм. Показано, що плазмовий стовп сильно рідкий в середині лампи і має середній питомий електричний опір $\rho_{\text{пл}} = 0,0657$ Ом·м, це приводить до того, що необхідно збільшувати частоту змінного струму до 10 МГц, щоб отримати значення $x_{\text{пл}} = 0,52$, при цьому використовується основна гармоніка магнітного поля. Встановлено, що ефективний радіус плазмового стовпа $a_{\text{пл}} = 15$ мм, тобто він менший за радіус лампи $a = 20$ мм, оскільки на внутрішній поверхні скла лампи існує охолодження плазми. Розглянуто можливість використання теорії роботи теплового КРП стосовно контролю параметрів феромагнітної рідини (машинного мастила з дисперсним феромагнітним порошком). Трубка, яка зроблена зі скла, разом з феромагнітною рідиною і повздовжнім електричним струмом у даному випадку є КРП, оскільки струм створює своє

магнітне поле, то феромагнітні частки порошку притягуються одна до одної, створюючи монолітну структуру стрижня. При використанні теплового КРП розв'язана задача сумісного визначення μ_{rp} , радіусів рідини a_{1p} і a_{2p} (на двох частотах $f_1 = 95621$ Гц і $f_2 = 175521$ Гц), величини ρ_p при різних температурах, а також температури t феромагнітної рідини.

Чисельні значення магнітних, електричних, геометричних параметрів феромагнітної рідини склали відповідно: $\mu_{r20^\circ\text{C}p} = 54,84$; $a_{1p} = 9,13 \cdot 10^{-3}$ м, $a_{2p} = 8,76 \cdot 10^{-3}$ м; $\rho_{p20^\circ\text{C}} = 3,5 \cdot 10^{-4}$ Ом·м, $\rho_{p60^\circ\text{C}} = 3,958 \cdot 10^{-4}$ Ом·м, $\rho_{p100^\circ\text{C}} = 4,4159 \cdot 10^{-4}$ Ом·м, $\rho_{p160^\circ\text{C}} = 5,1028 \cdot 10^{-4}$ Ом·м; значення температур феромагнітної рідини склали: $t_{20^\circ\text{C}} = 20^\circ\text{C}$, $t_{60^\circ\text{C}} = 59,807^\circ\text{C}$, $t_{100^\circ\text{C}} = 99,781^\circ\text{C}$, $t_{160^\circ\text{C}} = 159,745^\circ\text{C}$; $t_{20^\circ\text{C}} = 20^\circ\text{C}$, $t_{60^\circ\text{C}} = 62,994^\circ\text{C}$, $t_{100^\circ\text{C}} = 103,336^\circ\text{C}$, $t_{160^\circ\text{C}} = 163,853^\circ\text{C}$. Розглянуто трипараметровий контроль розчину сірчаної кислоти.

У дисертації було виконано розрахунки методичної і інструментальної складових достовірності контролю, а також загальної достовірності контролю при нормальних законах розподілу вимірювальних величин та похибок вимірювання. Показано, що запропоновані у дисертації багатопараметрові вихорострумові методи контролю параметрів провідних виробів, дозволяють підвищити достовірність контролю у порівнянні зі існуючими вихорострумовими методами.

Запропоновано варіант автоматизації процесу непрямих багатопараметрових вимірювань на прикладі сумісного визначення радіуса a , відносної магнітної проникності μ_r , питомого електричного опору ρ_t і температури t провідних виробів.

ВИСНОВКИ

У дисертації створено теоретичні узагальнення і нові рішення науково-практичної проблеми, суть якої полягає у тому, що існуючі методи та засоби контролю параметрів провідних виробів і речовин мають низьку достовірність за рахунок того, що не враховують температуру, при якій визначаються електромагнітні параметри об'єктів, що контролюються, а також за рахунок того, що не відомі динамічні та статичні характеристики різного типу теплових вихорострумових датчиків з різною орієнтацією магнітного поля.

Таким чином, отримані нові науково-обґрунтовані теоретичні та практичні результати є значним досягненням для розвитку теорії і практики вихорострумових методів та пристроїв неруйнівного контролю, що їх використовують.

Основні результати роботи:

1. Надано теоретичне обґрунтування визначенню динамічних характеристик безконтактних і контактних теплових вихорострумових датчиків. Досліджена динаміка нагріву повітряного шару між нагрівачем та виробом при змінненні температури нагрівача стрибком і періодично, наведено формулу, яка характеризує поведінку нагріву повітряного шару у порівнянні з нагрівом

стрибком нагрівача; при змінненні прирощення температури нагрівача періодично визначено стаціонарне, нестационарне і повне рішення диференційного рівняння, яке описує процес нагрівання повітряного шару; визначено сталу часу і час установлення процесу нагріву повітряного шару, які склали відповідно $T_{\text{пов}} = 0,6275$ с, $\tau_{\text{уст}} = 2,8865$ с. Досліджено перехідні процеси нагріву циліндричного суцільного виробу при змінненні температури повітряного шару стрибком і періодично, знайдено сталу часу циліндричного виробу при змінненні температури повітряного шару стрибком, яка складає $T_{\text{в}} = 5,45$ с, а час установлення процесу нагріву $\tau_{\text{уст}} = 25$ с. Показано також, що при змінненні прирощення температури повітряного шару періодично амплітуда прирощення температури виробу зменшується, а фазовий кут цього прирощення відстає від фазового кута прирощення температури повітряного шару. Досліджено відпрацювання тепловим вихорострумовим перетворювачем загального випадку змінення температури зовнішнього середовища. Знайдено сталі часу намагнічувальних обмоток трансформаторного вихорострумового датчика (ТВД) або параметричного вихорострумового датчика (ПВД), при зондуванні феромагнітного виробу постійним і змінним синусоїдальним магнітним полем, встановлено, що при використанні постійного поля, стала часу складає $T_{\text{п}} = 3,88 \cdot 10^{-3}$ с, а при зондуванні виробу змінним магнітним полем $T_{\text{п.екв}} = 1,91 \cdot 10^{-3}$ с. При цьому сталі часу розглянутих перетворювачів є значно меншими у порівнянні зі тепловими сталими часу циліндричних виробів, що, у свою чергу, дозволяє здійснювати контроль температури виробів у кожний момент часу.

2. Удосконалено існуючі вихорострумові методи визначення геометричних і електромагнітних параметрів трубчастих, суцільних циліндричних та плоских виробів за рахунок сумісного контролю магнітних, електричних, геометричних параметрів разом з температурою, що, у свою чергу, дозволило підвищити достовірність контролю виробів різних конфігурацій. При цьому дослідження здійснювалися за допомогою теплового трансформаторного вихорострумового датчика (ТВД). Наведено формулу для визначення температурного коефіцієнта опору (ТКО), який може бути невідомим, при цьому ТКО визначається по результатах вимірювання двох значень температури t і t_1 , до яких здійснюється нагрівання виробу. Отримано формули для визначення температури (при якій здійснювався контроль електромагнітних параметрів) виробів різної форми. Знайдено результати експериментальних досліджень параметрів d_t , ρ_t і t мідного і алюмінієвого зразків для окремого випадку трипараметрового сумісного контролю геометричних, електричних і температурних параметрів немагнітних зразків при реалізації удосконаленого в дисертації вихорострумового методу.

3. Створено чотирипараметровий екстремальний вихорострумовий метод сумісного контролю радіуса a , відносної магнітної проникності μ_r , питомого електричного опору ρ_t і температури t феромагнітних циліндричних виробів, який засновано на здійсненні повної компенсації ЕРС теплового ТВД без виробу. Наведено основні співвідношення для визначення чотирьох параметрів

виробів.

4. Вперше запропоновано чотирипараметровий вихорострумний безконтактний метод сумісного контролю параметрів феромагнітного плоского виробу: відносної магнітної проникності μ_{rt} , питомої електричної провідності σ_t , площі поперечного перерізу пластини dh_t і температури t , заснований на зондуванні феромагнітної пластини магнітним полем кратних частот теплового ТВД.

5. Отримано нові універсальні функції перетворювання для параметричного вихорострумного датчика (ПВД), що працює на кратних частотах магнітного поля зонduючого феромагнітні циліндричні вироби та пластини. Для широкого діапазону змінення відносної магнітної проникності μ_{rt} , створено алгоритм чотирипараметрового вихорострумного контролю циліндричних виробів, що зонduються магнітним полем кратних частот ПВД.

6. Створено чотирипараметровий вихорострумний метод контролю феромагнітних плоских виробів, який засновано на нових універсальних функціях перетворювання, отриманих для ПВД з феромагнітними плоскими виробами, що зонduються магнітним полем кратних частот.

7. Удосконалено існуючий вихорострумний контактний метод визначення μ_{rt} і σ за рахунок сумісного контролю електромагнітних параметрів феромагнітного циліндричного виробу з температурою t , причому реалізація цього трипараметрового контактного вихорострумного методу, здійснюється на основі теплового вихорострумного контактного робочого перетворювача (КРП). Досліджено відомі універсальні функції перетворювання КРП з урахуванням змінення температури виробу. Отримано формулу для визначення температури при якій контролюються електромагнітні параметри виробу.

8. Створено контактний резистивно-індуктивний трипараметровий вихорострумний метод контролю феромагнітних циліндричних виробів на основі отриманих у дисертації, універсальних функцій перетворювання для теплового КРП. Отримано формулу для визначення температури t циліндричного виробу через величини μ_{rt} і σ_t , при розгляді контактного екстремального вихорострумного методу контролю параметрів циліндричних виробів. Визначено сталі часу КРП при проходженні по циліндричному виробу постійного і змінного за часом електричного струму, а також при дослідженні широкого частотного діапазону змінного струму, також було знайдено сталі часу КРП на змінному струмі для різних температур циліндричного феромагнітного виробу.

9. Досліджено вплив домінуючої домішки вуглецю на кількісні значення магнітних, електричних параметрів і еквівалентно на температуру сталевих виробів, показано, що з ростом відсоткового складу вуглецю від 0,1% до 5,5% магнітна проникність і питома електрична провідність зменшуються: μ_r з 196,52 при домішці $C = 0,1\%$ до 116,85 при $C = 5,5\%$, а σ з $0,732 \cdot 10^7$ См/м ($C = 0,1\%$) до $0,531 \cdot 10^7$ См/м ($C = 5,5\%$), таким чином, зменшення величин μ_r і σ складає приблизно 40% і 31% відповідно. Встановлено, що збільшення відсоткового складу вуглецю у сталі А-20 ек-

вівалентно зростанню температури, наприклад, якщо нагріти чистий метал до температури 150°C, це, у свою чергу, еквівалентно підвищенню відсоткового складу вуглецю від 0,1% до 5,5%.

10. Створено екранний вихорострумний чотирипараметровий метод контролю відносної магнітної проникності μ_{rt} , питомої електричної провідності σ_t , температури t трубчастого виробу і коефіцієнта згасання синусоїдального магнітного поля в середині феромагнітної труби h_t . При цьому для визначення температури труби, запропоновано використання умови постійного значення глибини проникнення магнітного поля δ , слід відзначити, що змінення електромагнітних параметрів, що обумовлено впливом температури, можна компенсувати шляхом варіації частоти магнітного поля.

11. Досліджено технічні можливості використання теорії контактного робочого перетворювача (КРП) стосовно контролю параметрів плазмового газового стовпа люмінесцентної лампи та феромагнітного рідинного середовища (машинного мастила з дисперсним феромагнітним порошком). Вирішена задача, яка пов'язана з сумісним визначенням параметрів феромагнітної рідини при використанні теплового КРП, а саме: μ_{rp} , a_p , ρ_p при різних температурах, а також температури t_p феромагнітної рідини. Показано, що збільшення температури рідини з феромагнітним порошком на сигналах КРП відображується як збільшення числа часток порошку, тому контроль електромагнітних і температурних параметрів феромагнітної рідини є дуже важливим для визначення її технічного стану. Розглянуто трипараметровий контроль немагнітної речовини за допомогою теплового КРП.

12. Наведено оцінювання достовірності контролю параметрів провідних виробів при реалізації запропонованих у дисертації вихорострумних методів. Запропоновано варіант автоматизації процесу непрямих вимірювань на прикладі визначення параметрів a , μ_r , ρ_t і t провідних виробів.

13. За матеріалами дисертації одержано три патенти, надруковано двадцять шість фахових статей, результати роботи було впроваджено на заводі "Електромашина" (м. Харків), на заводі "Південкабель" (м. Харків), на підприємстві ООО СУПП фірма "Дігаз" (м. Харків), науково-виробничому підприємстві НПП "Комета" ООО (м. Харків), а також у навчальному процесі на кафедрі "Хімічної техніки і промислової екології" (НТУ "ХП").

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Себко В.В. "Динамічні характеристики перетворювача температури" з курсів "Датчики автоматизованих систем неруйнівного контролю" і "Теплові методи контролю" (навчально-методичний посібник). – Харків: НТУ "ХП". – 2001. – 96 с.
2. Себко В.В., Себко В.П., Москаленко О.И. Определение компонентов сигналов контактного вихретокового преобразователя температуры // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. - 2000. – Вып. 92. - С. 59-63.

Здобувачем знайдено чутливість контактного вихорострумowego перетворювача температури, а також було отримано максимальне значення цієї чутливості.

3. Себко В.В. Многофункциональное вихретоковое устройство для совместного измерения радиуса, магнитной проницаемости, удельного электрического сопротивления и температуры цилиндрических изделий // Технічна електродинаміка. – Київ: Ін-т електродинаміки НАНУ. - 2002. – Тем. випуск, Ч. 3. - С. 101-104.
4. Себко В.В. Погрешности совместного измерения диаметра, удельного электрического сопротивления и температуры изделия в продольном магнитном поле // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. – Луганськ: СНУ. - 2002. – № 8 [54]. - С. 224-228.
5. Себко В.В. Определение постоянной времени намагничивающей обмотки электромагнитного преобразователя // Радіоелектроніка і інформатика. - Харківський національний університет радіоелектроніки. – Харків: ХНУРЕ. - 2006. – Вип. 3. - С. 12-15.
6. Себко В.В. О влиянии доминирующих примесей на электромагнитные параметры цилиндрического изделия // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". - 2006. – № 5. - С. 42-43.
7. Себко В.В. Трехпараметровый электромагнитный контроль трубчатых изделий // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". - 2006. – Вип. 42. - С. 32-38.
8. Себко В.В., Филоненко Д.В., Себко В.П. Экстремальный трехпараметровый контактный электромагнитный метод с учетом воздействия температуры на изделие // Український метрологічний журнал. – Харків. - 2006. – Вип. 2. – С. 16-19.

Здобувачем через величини μ_t і σ_t знайдено формулу для визначення температури, при розгляді контактного екстремального вихорострумowego методу контролю параметрів циліндричних виробів.

9. Себко В.В. Определение электромагнитных параметров проводящих цилиндрических изделий контактным методом с учетом текущей температуры // Український метрологічний журнал. – Харків. - 2006. – Вип. 3. – С. 24-27.
10. Себко В.В. Бесконтактное определение радиуса, электропроводности и температуры, немагнитного трубчатого изделия // Український метрологічний журнал. – Харків. - 2006. – Вип. 4. – С. 25-27.
11. Себко В.В. Вихретоковый контроль геометрических, электрических и температурных параметров немагнитных цилиндрических изделий // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ "ХПІ". - 2006. – № 4. - С. 85-89.
12. Себко В.В. Определение электромагнитных параметров трубы с учетом ее нагрева // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". - 2006. – № 6. - С. 33-35.
13. Себко В.В. Контроль четырех параметров вихретокового параметрического датчика на основе

кратных частот поля // Технічна електродинаміка. – Київ: Ін-т електродинаміки НАНУ. - 2006. – Тем. випуск, Ч. 2. - С. 67-68.

14. Себко В.В., Себко В.П., Агарков В.В. Характеристики индуктивных преобразователей перемещений // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". - 2006. – Вип. 35. - С. 113-116.
Здобувач скорегував функції перетворення одинарного індуктивного датчика, також була проведена корекція характеристики цього датчика, що, у свою чергу, дозволило зменшити вплив факторів, які заважають на результати контролю.
15. Себко В.В. Два способи розрахунку похибок вимірювання електричних параметрів вихрового датчика струму // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". - 2006. – Вип. 36. - С. 105-114.
16. Себко В.В. Экранное трубчатое многопараметровое вихретоковое устройство // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". - 2006. – Вип. 39. - С. 18-29.
17. Себко В.В. Определение параметров ферромагнитной жидкости с помощью контактного рабочего преобразователя КРП // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". - 2006.- Вип. 44. – С. 15-25.
18. Себко В.В. Контроль четырех параметров ферромагнитных изделий на одной частоте зондирующего продольного магнитного поля ТВД // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ "ХПІ". - 2007. – № 1. - С. 34-36.
19. Себко В.В. Четырехпараметровый вихретоковый метод определения параметров плоских ферромагнитных изделий основанный на кратных частотах магнитного поля параметрического вихретокового датчика // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ "ХПІ". - 2007. – № 1. - С. 85-92.
20. Себко В.В. Три варианта расчета погрешностей многопараметровых измерений // Український метрологічний журнал. – Харків. - 2007. – Вип. 1. – С. 12-15.
21. Себко В.В. Методика оценки погрешностей совместного измерения магнитной проницаемости, удельного электрического сопротивления и температуры ферромагнитного изделия контактным резистивно-индуктивным методом //Електротехніка і електромеханіка.- Харків: НТУ "ХПІ".- 2007.- №2.- с.48-51.
22. Себко В.В. Использование модифицированного трехпараметрового вихретокового метода в поперечном магнитном поле // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків: НТУ "ХПІ". - 2007.- Вип. 11. – С. 14 – 20.
23. Себко В.В. Исследование динамических характеристик контактного рабочего преобразователя

- КРП // Науковий журнал "Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації". – Східно-український національний університет імені В. Даля. – Луганськ: СНУ. – 2007. – №2 (15). – С. 112-117.
24. Себко В.В. Исследование переходного процесса нагрева слоя воздуха между нагревателем и изделием при изменении температуры нагревателя по периодическому закону // Електротехніка і електромеханіка. - Харків: НТУ "ХПІ". - 2007. - № 3. - с. 57-60.
25. Себко В.В. Трансформаторный вихретоковый датчик с пластиной, зондируемой полем кратных частот // Український метрологічний журнал. – Харків. – 2007. – Вип. 2. – с. 26-29.
26. Себко В.В. Определение компонентов сигналов контактного рабочего преобразователя КРП при исследовании плазменной газообразной среды // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". -Харків: НТУ "ХПІ". - 2007.- Вип 24 – С. 79-83.
27. Себко В.В. Використання теорії теплового контактного вихорострумowego перетворювача (КРП), стосовно сумісного контролю трьох параметрів немагнітної речовини // Восточно – Европейский журнал передовых технологий. – Харьков: - 2008. – Вып. 3/4 (33). - С. 39-43.
28. Себко В.В. Спосіб сумісного неруйнівного контролю електромагнітних параметрів і температури циліндричних виробів. Патент України на корисну модель № 14958; Заяв. 04.10.2005; Опубл. 15.06.2006; Бюл. - № 6.
29. Себко В.В. Безконтактний модифікований спосіб контролю параметрів немагнітних виробів сумісно з температурою. Патент України на корисну модель № 18632; Заяв. 22.05.2006; Опубл. 15.11.2006; Бюл. - № 11.
30. Себко В.В. Екранний чотирипараметровий спосіб сумісного контролю параметрів феромагнітних трубчастих виробів. Патент України на корисну модель № 24138; Заяв. 19.12.2006; Опубл. 25.06.2007; Бюл. - № 9.
31. Себко В.В., Москаленко О.И. К расчету параметров контактного электромагнитного преобразователя температуры // Наукові праці II Міжнародної науково-технічної конференції "Метрологія та вимірювальна техніка". – Харків. - 1999. – С. 49-51.
Здобувачем запропоновано розглянути методику визначення параметрів контактного вихорострумowego перетворювача температури.
32. Себко В.В. Контактный многопараметровый вихретоковый преобразователь на основе резистивно-индуктивного метода // Наукові праці III Міжнародної науково-технічної конференції "Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія – 2002)". – Харків. - 2002. – С. 213-217.
33. Себко В.В., Кузнецов Б.И. Точностные характеристики контактного электромагнитного преобразователя, использующего резистивно-индуктивный метод // Тези доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, осві-

та, здоров'я". – Харків: НТУ "ХПІ". - 2004. – С. 389.

Здобувачем виконано розрахунки відносних похибок вимірювань магнітного, електричного параметрів і температури циліндричного виробу, при реалізації резистивно-індуктивного контактного методу контролю ферромагнітних циліндричних виробів, а також наведено чисельні значення похибок вимірювань.

34. Себко В.В. Нагрев воздушного кольцевого слоя в проходном электромагнитном преобразователе. – Наукові праці XIV Міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я". – Харків: НТУ "ХПІ". - 2006. – С. 119-124.

35. Себко В.В., Ноздрачева Е.Л., Хассан Муссу Диаб, Алаа Файад Макки, Вараксин Ю.А. Расчет относительных погрешностей измерения магнитных, электрических и температурных параметров плоского ферромагнитного изделия с помощью ТЭД, реализующего экстремальный вихре-токовый метод // Наукові праці V Міжнародної науково-технічної конференції "Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія – 2006)". – Харків. - 2006. – Т. 2. - С. 221-226.

Здобувачем запропоновано контролювати електромагнітні параметри плоских виробів сумісно з температурою, а також отримано чисельні значення відносних похибок вимірювань магнітних, електричних і температурних параметрів ферромагнітної пластини.

36. Себко В.В. Вихретоковый четырехпараметровый метод, реализуемый наружными обмотками на трубчатом изделии и внутренним электромагнитным датчиком // Материалы II-ой Международной научно-практической конференции "Современные научные достижения – 2007". – Днепропетровск. – 2007. – Т. 7. – С. 55-60.

37. Себко В.В. Динамический процесс нагрева изделия при периодическом изменении температуры воздушного слоя, окружающего изделие // Материалы Международной научно-практической конференции "Стратегические вопросы мировой науки - 2007". – Днепропетровск. – 2007. – Т. 6. – С. 68-75.

38. Себко В.В. Переходный процесс нагрева металлического изделия (изменение температуры воздушного слоя скачком) // Материалы II-ой Международной научно-практической конференции "Научный прогресс на рубеже тысячелетий – 2007".- Днепропетровск: изд-во "Наука и образование".- 2007.- Т. 15.- С. 32-38.

39.

АНОТАЦІЇ

Себко В.В. Електромагнітні методи і пристрої для сумісного визначення магнітних, електричних, геометричних параметрів та температури провідних виробів (Теорія і розробки). – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю

05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Київський національний університет технологій та дизайну, Київ, 2008.

Дисертацію присвячено актуальним питанням, які полягають у тому, що існуючі методи та засоби контролю параметрів провідних виробів і речовин мають низьку достовірність за рахунок того, що не враховують температуру, при якій визначаються електромагнітні параметри об'єктів, що контролюються, а також за рахунок того, що не відомі динамічні та статичні характеристики різного типу теплових вихорострумів датчиків з різною орієнтацією магнітного поля. У рамках цих питань було удосконалено існуючі електромагнітні методи за рахунок сумісного контролю електромагнітних і геометричних параметрів провідних виробів разом з температурою і створено нові багатопараметрові безконтактні та контактні вихорострумів методи сумісного контролю параметрів трубчастих, суцільних циліндричних і плоских виробів.

Запропоновано екранний чотирипараметровий вихорострумів метод контролю відносної магнітної проникності μ_r , питомої електричної провідності σ , температури феромагнітної труби t і коефіцієнта згасання синусоїдального магнітного поля в середині труби h_t . Розглянуто вплив домінуючої домішки вуглецю на кількісні значення електромагнітних параметрів μ_r і σ , а також еквівалентно на температуру сталевих виробів. Створено контактний резистивно-індуктивний трипараметровий вихорострумів метод сумісного контролю електромагнітних параметрів і температури, а також запропоновано чотирипараметрові вихорострумів методи контролю плоских феромагнітних виробів, що зондуються полем кратних частот трансформаторного і параметричного вихорострумів датчиків. Досліджено можливість використання теорії контактного робочого перетворювача КРП стосовно контролю параметрів плазмового стовпа люмінесцентної лампи та машинного мастила з дисперсним феромагнітним порошком.

Наведено оцінювання достовірності контролю параметрів провідних виробів при реалізації запропонованих у дисертації вихорострумів методів. Запропоновано варіант автоматизації процесу непрямих вимірювань на прикладі сумісного визначення параметрів a , μ_r , ρ_t і t провідних виробів.

Ключові слова: достовірність контролю, динамічні та статичні характеристики, сумісний контроль, вплив домінуючої домішки, кратні частоти, плазмовий стовп, феромагнітна рідина.

Себко В.В. Электромагнитные методы и устройства для совместного определения магнитных, электрических, геометрических параметров и температуры проводящих изделий (Теория и разработки). – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. - Киевский национальный университет технологий и дизайна, Киев, 2008.

В диссертации созданы теоретические обобщения и новые решения научно-практической проблемы, состоящей в том, что существующие методы и устройства контроля параметров проводящих изделий и веществ имеют низкую достоверность, за счет того, что не учитывают температуру, при которой определяются электромагнитные параметры контролируемых объектов, а также за счёт того, что не известны динамические и статические характеристики различного типа тепловых вихретоковых датчиков с разной ориентацией магнитного поля.

В рамках этой проблемы были усовершенствованы существующие бесконтактные и контактные вихретоковые методы определения электромагнитных и геометрических параметров за счет совместного контроля этих параметров с температурой и созданы новые трёх- и четырёхпараметровые бесконтактные, контактные и экранные вихретоковые методы контроля параметров трубчатых, цилиндрических и плоских проводящих изделий.

Предложен бесконтактный четырёхпараметровый экстремальный вихретоковый метод совместного контроля относительной магнитной проницаемости μ_r , удельной электрической проводимости σ_t , радиуса a и температуры t ферромагнитных цилиндрических изделий. Метод основан на проведении полной компенсации ЭДС E_0 теплового трансформаторного вихретокового датчика (ТВД) без изделия. Следует отметить, что совместное определение электромагнитных параметров с температурой, приводит к повышению достоверности контроля проводящих изделий. Этот четырёхпараметровый вихретоковый метод даёт возможность контролировать ферромагнитные изделия в широком диапазоне изменения их диаметров. Исследован бесконтактный модифицированный трёхпараметровый вихретоковый метод контроля электрических, геометрических параметров и температуры немагнитного цилиндрического изделия, использующий продольное и поперечное магнитное поле тепловых вихретоковых датчиков.

Предложен четырёхпараметровый вихретоковый метод совместного контроля магнитных, электрических, геометрических и температурных параметров ферромагнитной пластины, основанный на использовании кратных частот магнитного поля теплового ТВД, зондирующего плоское изделие.

Найдены новые функции преобразования для параметрического вихретокового датчика (ПВД), работающего на кратных частотах магнитного поля зондирующего цилиндрические и плоские изделия. На основании этих функций преобразования на базе ПВД, создан четырёхпараметровый вихретоковый метод контроля параметров ферромагнитных пластин в широком диапазоне изменения μ_r .

Создан контактный резистивно-индуктивный трёхпараметровый вихретоковый метод контроля параметров μ_r , σ_t и t ферромагнитного цилиндрического изделия, основанный на двух универсальных функциях преобразования, полученных в настоящей диссертации для теплового

КРП.

Исследовано влияние доминирующей примеси углерода на количественные значения электромагнитных параметров и эквивалентно на температуру стальных изделий.

Создан экранный вихретоковый четырёхпараметровый метод совместного контроля электромагнитных параметров (μ_r и σ_t), температуры t ферромагнитной трубы и коэффициента затухания h_t синусоидального магнитного поля в середине трубы, исследовано тепловое экранное вихретоковое трубчатое устройство. Экранный вихретоковый четырёхпараметровый метод основан на поддержании постоянной глубины δ проникновения магнитного поля, в свою очередь, изменение электромагнитных параметров трубчатого образца, вызванное воздействием температуры компенсируется путем варьирования частоты f_t .

Исследована возможность применения теории контактного рабочего преобразователя КРП к контролю параметров плазменного столба люминесцентной лампы и ферромагнитной жидкой среды (машинного масла с дисперсным ферромагнитным порошком). Решена задача, связанная с совместным контролем параметров ферромагнитной жидкости с помощью теплового КРП: относительной магнитной проницаемости $\mu_{rж}$, радиуса $a_{ж}$, удельного электрического сопротивления $\rho_{rж}$ при разных температурах жидкости, а также температуры t .

В диссертации были выполнены расчёты методической, инструментальной составляющих достоверности контроля и общей достоверности контроля при нормальных законах распределения измеряемых величин и погрешностей измерений. Показано, что предложенные в диссертации многопараметровые вихретоковые методы контроля параметров проводящих изделий, дают возможность повысить достоверность контроля по сравнению с известными вихретоковыми методами. Предложен вариант автоматизации процесса косвенных измерений на примере совместного определения радиуса a , относительной магнитной проницаемости μ_r , удельного электрического сопротивления ρ_t и температуры t проводящих изделий.

Ключевые слова: достоверность контроля, динамические и статистические характеристики, совместный контроль, влияние доминирующей примеси, кратные частоты, плазменный столб, ферромагнитная жидкость.

Sebko V.V. Electromagnetic methods and devices for both definition of magnetic, electric, geometric parameters and temperature of guides manufactured articles (Theory and developments). – Manuscript.

The thesis for a technical science doctor's degree by specialty 05.11.13 - devices and methods of control and determinations of substances composition. - Kyiv National University of Technologies & Design, Kyiv, 2008.

The dissertation is devoted to decision of actual problems, which are, that existing methods and devices of control of parameters of conductive products and materials have low reliability of control because do not take into account temperature, at which the electromagnetic parameters of controlled objects are determined, and also because the dynamic and static characteristics for varies types of thermal eddy-current sensors with different orientation of magnetic field are not known.

Within the framework of these problems the existing electromagnetic methods are improved at the cost of joint control of electromagnetic and geometrical parameters of conductive products together with temperature, and new multiparameter noncontact and contact eddy-current methods of control of parameters of tubular, continuous cylindrical and flat products are created.

The screen four-parameter eddy-current method of control of the relative magnetic conductivity μ_{rt} , conductivity σ_t , temperature of a ferromagnetic pipe and coefficient of fading of the sinusoidal magnetic field in the pipe h_t is offered. The influence of a dominant admixture of carbon on quantitative values of electromagnetic parameters μ_{rt} and σ_t , and also on the temperature of steelwork is considered.

The contact resistive-magnetic three-parameter eddy-current method of joint control of electromagnetic parameters and temperature is created, the four-parameter eddy-current methods of control of flat ferromagnetic products which are sounded by a field of multiple frequencies transformer and parametric eddy-current sensors are offered.

Possibility of use of the theory of contact working converter as it applies to control of parameters of plasma pole of luminescent lamp and machine oil with a dispersible ferromagnetic powder is explored.

Estimation of reliability of control of parameters of conductive products at realization offered in the dissertation eddy-current methods is given.

The variant of automation of process of indirect measurements on an example of definition of four parameters of conductive products μ_{rt} , ρ_t , a and t is offered.

Key words: reliability of control, dynamic and static characteristic, consistent control, influence of a dominant admixture, multiple frequencies, plasma post, ferromagnetic liquid.

Підписано до друку 3. 11 2008 р. Формат 60 x 90/16.

Формат видання 145x215. Папір офсетний. Друк ризографія.

Ум. друк. арк. 1,9. Тир. 100 прим. Зам. № 230-08.

Надруковано СПД ФО Бровін О.В. Св.-во 2708608999.

м. Харків, майдан Свободи, 7. Т. (057) 758-01-08, (8066) 822-71-30.

СТИЛЬ

-ИЗДАТ

ТИПОГРАФИЯ