

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

**Горкунов Борис Митрофанович**

УДК 620.179.14

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ І ПРАКТИКИ ПОБУДОВИ ПРИЛАДІВ КОНТРОЛЮ ФІЗИКО-  
МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛІВ ВИХРОСТРУМОВИМ МЕТОДОМ**

**Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин**

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук**

**Харків – 2011**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі приладів і методів неруйнівного контролю Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор

**Сучков Григорій Михайлович,**  
Національний технічний університет "Харківський  
політехнічний інститут", м. Харків, завідувач  
кафедри приладів і методів неруйнівного контролю

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

**Гальченко Володимир Якович,**  
Державний університет "Луганський державний  
медичний університет", м. Луганськ,  
завідувач кафедри медичної кібернетики, біофізики і медичної  
апаратури

доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**Джала Роман Михайлович,**  
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка  
Національної академії наук України, м. Львів,  
завідувач відділу фізичних методів контролю  
протикорозійного захисту

доктор технічних наук, доцент

**Щапів Павло Федорович,**  
Національний технічний університет "Харківський  
політехнічний інститут", м. Харків,  
професор кафедри інформаційно-вимірювальних  
технологій і систем

Захист відбудеться " 13 " 10 2011 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2011 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Глоба С. М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Контроль якості виробів є одним з найважливіших чинників підвищення конкурентоспроможності продукції та безаварійної експлуатації промислового обладнання. Важливою складовою комплексних систем керування якістю є методи і прилади неруйнівного контролю (НК) напівфабрикатів і готових деталей, що застосовуються на виробництві, а також прилади контролю й технічної діагностики стану деталей та елементів конструкцій під час їх експлуатації. На практиці для забезпечення високої якості й надійності виробів використовують різні засоби НК (акустичні, магнітні, електричні, вихрострумові, електромагнітоакустичні, радіаційні й інші), які в багатьох випадках повинні відповідати вимогам проведення ефективного контролю в реальному часі.

Особливо ефективним є використання методів і приладів вихрострумового НК, що дозволяють розв'язувати широке коло завдань – виявляти тріщини, неоднорідності структури об'єкта контролю (ОК), визначати структурочутливі параметри матеріалу, розмірні параметри дефектів, особливо в умовах забруднення середовища, підвищених температур, вібрацій та інших факторів, що заважають проведенню контролю іншими методами.

Значний внесок у розвиток методів і засобів вихрострумового НК зробили: Герасимов В. Г., Ключев В. В., Дорофєєв О. Л., Соболев Н. Н., Шкарлет Ю. М., Маєвський С. М., Хандецький В. С., Белокур І. П., Себко В. П., Гальченко В. Я., Троїцький В. О., Лобанов Л. М., Кісіль І. С., Тетерко А. Я., Учанин В. М., Джала Р. М., Мужичький В. Ф., Яцун М. А., Forster F., Dodd C. V. та ін. Науковці значну увагу приділяють розробці теоретичних моделей системи ВСП–ОК для спрощених конкретних випадків контролю, або для наближених методик розрахунків, або для двомірних ідеалізацій електромагнітного поля, але загальний підхід до вирішення широкого кола завдань вихрострумового контролю для різних конфігурацій поля й ОК знаходиться в стадії розробки.

Обмеженість застосовуваних моделей системи ВСП–ОК не дозволяла належним чином виявляти кількісні співвідношення між геометричними й електромагнітними характеристиками ОК, оскільки теорія вихрострумового контролю виробів обмежених розмірів базується в основному на емпіричних закономірностях. Подібний підхід не достатньо забезпечував адекватності моделей системи ВСП–ОК через нездоланні зсуви функцій перетворення первинної інформації, що призводило до появи неврахованих методичних складових ймовірностей помилок контролю. Це було істотним обмеженням у застосуванні відомих методів до вирішення завдань підвищення вірогідності багатопараметрового контролю.

Таким чином, значні потенційні переваги приладів вихрострумового контролю, з одного боку, і відсутність ефективної теоретичної бази й засобів її реалізації, з іншого, зумовили формування актуальної наукової проблеми, вирішення якої підвищить ефективність технічного контролю на підприємствах металургійного, машинобудівного й електроенергетичного комплексів України. Суть наукової проблеми полягає у створенні теоретично обґрунтованих методів функціонального синтезу моделей адаптивних систем ВСП–ОК з апіорі змінними фізико-механічними властивостями ОК, що визначило напрямок дисертаційного дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконувалася відповідно до тематики роботи кафедри "Прилади і методи неруйнівного контролю" НТУ "ХП". Здобувач як науковий керівник і виконавець брав участь у науково-дослідних держбюджетних роботах МОН України: "Відпрацювання основних принципів побудови автоматизованих приладів для безконтактного визначення температури матеріалів і середовищ" (ДР № 0103U001533); "Ресурсозберігаючі технології виготовлення та експлуатації елементів, вузлів та виробів енергетичного обладнання" (ДР № 0100U001682). Як виконавець брав участь у держбюджетних НДР: "Електромагнітні методи та пристрої для визначення температури та її розподілу всередині металевих виробів" (ДР № 0197U001905); "Основи теорії інтелектуальних багаторівневих систем" (ДР № 0197U001932); "Створення теорії багатопарамет-

рового визначення фізико-хімічних характеристик металів та способів їх реалізації" (ДР №0103U001532); "Теорія і практика безконтактних електромагнітних методів і пристроїв для визначення фізичних параметрів матеріалів і виробів у магнітних полях різної орієнтації й структури" (ДР № 0100U001683); "Розробка методів і пристроїв автоматизованих систем неруйнівного контролю магнітних, електричних і геометричних параметрів виробів і конструкцій" (Постанова ДКНТ України № 12 від 04.05.1992 р., напрямом 6.7.1); "Розробка автоматизованих систем поопераційного контролю якості елементів і вузлів енергетичного обладнання" (Наказ ДКНТ України № 15 від 01.03.1993 р., напрямом 5.1.6); а також приймає участь у держбюджетній НДР МОН України "Дослідження можливості створення прототипів приладів неруйнівного контролю нового покоління з використанням енерго- та ресурсозберігаючих технологій" (ДР № 0111U002280). Здобувач як виконавець брав участь у виконанні госпдоговірної НДР "Розробка електромагнітного методу сумісного контролю діаметра та питомого електричного опору струмопровідної суцільної жили кабелю" (ЗАТ завод "Південкабель", м. Харків).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є створення теоретично обґрунтованих методів функціонального синтезу адаптивних моделей вихрострумів перетворювачів з об'єктом, призначених для надійного контролю фізико-механічних властивостей металевих виробів.

Для досягнення цієї мети в роботі поставлені наступні задачі:

- для визначення взаємодії вихрострумів перетворювача з феромагнітними й неферомагнітними матеріалами в області частот зондувального електромагнітного поля від 20 Гц до 200 кГц, розробити фізичні та математичні моделі функціонування системи ВСП–ОК;

- провести якісне й кількісне дослідження адекватності розроблених моделей параметричного і трансформаторного вихрострумів перетворювачів прохідного та накладного типів і визначити сфери їх практичного використання;

- провести дослідження амплітудних і фазових характеристик вихрострумів перетворювачів з ОК у широкому діапазоні зміни електричних, магнітних і геометричних параметрів матеріалу виробів і параметрів зондувального поля;

- удосконалити методи одержання інформативних параметрів у разі спільного безконтактного контролю феромагнітних, слабомагнітних і немагнітних металевих виробів;

- визначити основні функції перетворення для різних схем включення вихрострумів перетворювача;

- удосконалити методи дослідження метрологічних характеристик вихрострумів перетворювачів в одно- та багатопараметровому варіантах з метою визначення раціональних режимів їх роботи;

- розробити процедури вимірювальних і розрахункових операцій функціонування вихрострумів приладів, що працюють на фіксованій частоті та у змінно-частотному режимі контролю інформативних параметрів ОК;

- розвинути методи дослідження впливу геометричних розмірів ОК, а також режимів роботи вихрострумів перетворювача на діапазони зміни інформативних параметрів металевих виробів для вибору допустимих інтервалів на ці параметри;

- розробити структурні й принципові схеми автоматизованих вихрострумів приладів для контролю електричних, магнітних і геометричних параметрів ОК, а також пов'язаних з ними фізико-механічних характеристик матеріалів.

*Об'єктом дослідження* є процес взаємодії електромагнітного поля з об'єктом контролю, для одержання інформації про фізико-механічні характеристики металів.

*Предметом дослідження* є методи й засоби вихрострумів контролю фізико-механічних властивостей металів і виробів.

*Методи дослідження.* Основні теоретичні положення роботи базуються на фундаментальних засадах електродинаміки суцільних середовищ. Для аналізу взаємодії електромагнітних полів з об'єктом контролю використовувались методи інтегрального та дифе-

ренційного числення, теорія матриць, числові методи лінійної алгебри, апарат спеціальних циліндричних функцій. При отриманні прямих та зворотних функцій перетворення застосовувались теорія електричних кіл та теорія рядів. Для експериментальних досліджень розроблених вихрострумівих перетворювачів були використані методи фізичного моделювання контрольованих параметрів металевих виробів, методи математичної статистики багатofакторного експерименту та методи багатомірних опосередкованих вимірювань.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

– уперше розроблено основні положення й методи розрахунку вихідних сигналів параметричного і трансформаторного ВСП прохідного й накладного типів, суть яких полягає у використанні фізико-математичних моделей, заснованих на суперпозиції елементарних електромагнітних полів, сформованих окремими струмами обмоток перетворювача й трубками вихрових струмів в ОК, що дозволило розглядати їх як систему взаємодіючих контурів зі струмами, і визначати параметри вихідного сигналу ВСП шляхом розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь;

– уперше отримано розмірні й безрозмірні функції перетворення для різних схем включення вихрострумівих перетворювачів у випадку визначення електричних, магнітних і геометричних параметрів ОК;

– для контролю феромагнітних, слабомагнітних і немагнітних матеріалів досліджено й експериментально доведено адекватність розроблених фізико-математичних моделей системи ВСП–ОК;

– удосконалено метод контролю основних інформативних параметрів ОК і визначено діапазони їх зміни для слабомагнітних виробів на основі критерію слабого загасання магнітного поля;

– одержали подальший розвиток математичні вирази для розрахунку чутливості й похибок ВСП, що дозволило встановити раціональні за критеріями мінімуму похибок й максимуму чутливості режими роботи перетворювача для різних схем його включення, визначити граничні діапазони зміни параметрів ОК і частоти зондувального поля перетворювача;

– удосконалено методи безконтактної діагностики стану виробів у разі механічного навантаження, які базуються на дуальності взаємозалежності електричного сигналу перетворювача й характеристик механічної діаграми навантаження металевих виробів;

– одержали подальший розвиток інформаційно-вимірювальні технології багатопараметрового контролю, які використані при побудові адаптивних автоматизованих систем вихрострумівого контролю якості металевих виробів.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

– для підвищення ефективності технічного контролю на підприємствах металургійного, машинобудівного й електроенергетичного комплексів України розроблено й виготовлено вихроструміві перетворювачі, що забезпечують безконтактний контроль електричних, магнітних і геометричних параметрів металевих виробів;

– розроблено нові технічні рішення, спрямовані на підвищення роздільної здатності вихрострумівих приладів, що дозволяє за одним або двома інформативними параметрами контролювати зміни структури матеріалу при напружено-деформованому стані металевого виробу (Патент. № 56801А (Україна));

– реалізовані на практиці автоматизовані вихроструміві пристрої багатопараметрового контролю характеристик виробів з парамагнітного чавуну в процесі відпрацювання технології його виготовлення із заданими електромагнітними параметрами (Патент на корисну модель № 52844 (Україна));

– розроблено й виготовлено лабораторні установки з трансформаторними й параметричними ВСП прохідного типу для безконтактного контролю механічних деформацій з прогнозуванням механічного стану металевих виробів і конструкцій, а також безконтактного контролю обертового моменту на валу (Патент на корисну модель № 19172 (Україна)).

Основні результати дисертаційної роботи впроваджені:

– ВАТ "Дніпропетровський трубний завод" (м. Дніпропетровськ) – для безконтактного контролю електромагнітних параметрів виробів з метою визначення фізико-механічних параметрів і оцінки домінуючих домішок у метали;

– ВАТ "Електромотор" (м. Полтава) – для спільного визначення магнітної проникності й питомої електропровідності циліндричних виробів, що дозволило надійно розбракувати матеріали за їх марками;

– ДП ВП "Запорізька атомна електростанція" (м. Енергодар) – для безконтактного контролю магнітної проникності й питомої електропровідності суцільних і трубчастих виробів, з метою розбракування їх за експлуатаційними характеристиками;

– результати роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі "Прилади і методи неруйнівного контролю" НТУ "ХПІ" (м. Харків) – у лекційному курсі та під час проведення лабораторних занять х дисципліни "Електромагнітні види неруйнівного контролю" за спеціальністю 7.090903, а також при підготовці спеціалістів, магістрів й аспірантів.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати отримані здобувачем самостійно. Розроблено фізико-математичні моделі системи ВСП–ОК, що описують роботу вихрострумівих перетворювачів з різною спрямованістю зондувального електромагнітного поля й різною конфігурацією ОК. Одержано математичні співвідношення, за якими визначено взаємозв'язок інформативних параметрів ОК з параметрами вихідного сигналу ВСП. Експериментально доведено адекватність розроблених моделей. Отримано основні розмірні й безрозмірні функції перетворення ВСП для розв'язання прямої й зворотної задач спільного безконтактного багатопараметрового контролю параметрів ОК. Установлено процедури проведення вимірювальних і розрахункових операцій функціонування ВСП у випадку контролю цих параметрів як усереднених у перерізі ОК, так і у випадку пошарового сканування структури циліндричного ОК. При контролі слабوماгнітних матеріалів отримано математичні вирази, які дозволили визначити критичні значення радіуса контрольованого циліндричного виробу й критичні значення робочої частоти зондувального поля ВСП. Одержано аналітичні співвідношення для розрахунку відносних значень чутливості і похибок ВСП для розроблених методів спільного контролю параметрів виробів. Проведено порівняльний аналіз поведінки метрологічних характеристик і визначено раціональні режими роботи ВСП. Розроблено ефективні алгоритми функціонування мікропроцесорних вихрострумівих пристроїв, що реалізують двопараметрові методи контролю, які легко трансформуються для вирішення завдань однопараметрового контролю структури циліндричних зразків, які зазнають різних фізико-механічних і термічних впливів. Разом зі співавторами проведено обговорення основних варіантів побудови приладів, виконано конструкторські, технологічні, патентно-ліцензійні роботи, роботи з виготовлення й упровадження лабораторних і промислових зразків приладів.

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Результати наукових досліджень, які включені до дисертаційної роботи, доповідалися на: Міжнародних науково-практичних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (Харків, 1993, 1994, 1996–1998, 2004, 2005, 2008); Міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія та практика" (Крим, Алушта, 1994–2005, 2007, 2008); Міжнародних науково-технічних конференціях "Силова електроніка та енергоефективність" (Алушта, Україна 1997–2000, 2002, 2004–2009); 6-th International Symposium on Measurement and Control in Robotics-ISMCR'96 (Брюссель, Бельгія, 1996.); школа-семінар "Автоматизація методів неруйнівного контролю якості" (Київ – Славське, 1994); 1-й, 2-й і 3-й Українських науково-технічних конференціях "Метрологічне забезпечення в області електричних, магнітних і радіотехнічних вимірювань" (Харків, 1994, 1997, 2000); 1-й і 2-й Міжнародних науково-технічних конференціях "Метрологія та вимірювальна техніка" (Харків, 1995, 2005); 1-й і 2-й Міжнародних науково-технічних конференціях "Промышленность стройматериалов и стройиндустрия,

энерго- и ресурсозбережение в условиях рыночных отношений" (Белгород, Росія, 1997, 1999); Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні прилади, матеріали та технології для технічної діагностики і неруйнівного контролю промислового обладнання" (Харків, 1998); 3-й і 4-й Національних науково-технічних конференціях "Неруйнівний контроль та технічна діагностика" (Дніпропетровськ, 2000 р., Київ, 2003); щорічному семінарі Східного відділення УТНКТД "Сучасні технології і прилади неруйнівного контролю та технічної діагностики" (Харків, 2003); 2-й, 4-й і 8-й Міжнародних науково-технічних конференціях "Проблеми інформатики і моделювання" (Харків, 2002, 2004, 2008); 17-th National scientific symposium "Metrology and metrology assurance 2007" (Софія, Болгарія, 2007); 6-й і 7-й Міжнародних конференціях "Неразрушающий контроль и техническая диагностика" (Москва, 2007, 2008); European Conference on Non-Destructive Testing: (Москва, Росія, 2010).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 46 наукових праць, серед них: 32 публікації у фахових наукових виданнях України, 3 патенти України.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків і 3 додатків. Повний обсяг дисертації становить 330 сторінок, з них: основний текст – 267 сторінок; 63 рисунки по тексту; 19 таблиць по тексту; 1 таблиця на 1 сторінці; 3 додатки на 31 сторінці; 282 найменування використаних літературних джерел на 32 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми, сформульовано проблему, мету й основні задачі дисертаційної роботи, розкрито зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, викладено новизну й практичне значення досліджень, особистий внесок здобувача, наведено відомості щодо апробації результатів дисертаційних досліджень, їх публікації та впровадження.

**У першому розділі** наведено аналіз сучасного стану й систематизовано тенденції розвитку методів і пристроїв НК якості металевих виробів на етапах їх розробки, виготовлення й експлуатації. Відзначено, що підвищення технічного й технологічного рівня промислових підприємств з метою випуску конкурентоспроможної продукції неможливе без впровадження сучасних методів і приладів НК. На підставі результатів аналізу науково-технічної й патентно-ліцензійної інформації про використання методів і приладів НК зроблено висновок, що контроль фізико-механічних параметрів металевих конструкцій найбільш ефективно проводиться з використанням вихрострумів методів, завдяки таким перевагам як безконтактність, багатопараметровість, слабка залежність результатів контролю від факторів впливу зовнішнього середовища.

На основі проведеного аналізу розрахунку ВСП зроблено висновок, що використання фізико-математичних моделей систем ВСП–ОК з різною орієнтацією зондувального поля й геометрією контрольованих виробів дозволить одержати аналітичні залежності, які пов'язують електричні, магнітні й геометричні параметри ОК з інформаційними сигналами вихрострумів перетворювача, оцінити метрологічні характеристики ВСП і визначити раціональні режими роботи як при однопараметровому, так і при багатопараметровому контролі.

**Другий розділ** присвячений розвитку теоретичних основ розрахунку ВСП з різною орієнтацією зондувального поля для контролю інформативних параметрів виробів різної форми.

Основним елементом перетворення реакції ОК на зондувальне електромагнітне поле є ВСП. При побудові фізико-математичних моделей системи ВСП–ОК прохідного й накладного типів (рис. 1, а, б), використано універсальний підхід, який базується на аналізі взаємодії елементарних електромагнітних полів, створюваних струмами в окремих витках намагнічувальної та вимірювальної обмоток, а також індукованих кільцевих вихрових струмів в ОК. Намагнічувальна і вимірювальна обмотки з числами витків  $W_n$  і  $W_u$  у загальному випа-

дку можуть бути багат шаровими з різними геометричними параметрами. ОК являє собою багат шарову структуру, кожен шар якої розбитий на окремі короткозамкнені концентричні витки, якими протікають індуквані вихрові струми  $I_0$ . Представимо ОК у вигляді багат шарової котушки з числом витків  $W_0$ . Кожний із витків  $W_H$ ,  $W_B$  й  $W_0$  системи ВСП–ОК як для прохідного, так і для накладного перетворювача є концентричним щодо осі  $z$ .

Намагнічувальна й вимірювальна обмотки ВСП, а також багат шаровий соленоїд в ОК складаються з  $m$  шарів, а кожен з  $m$  шарів утворюється з  $n$  окремих витків. Поточний індекс  $i$  буде показувати місце розташування окремого витка в шарі, а  $j$  – номер відповідного шару. Тоді індексація  $ij$  дозволить точно визначати приналежність того чи іншого витка до котушок перетворювача або до відповідного кільця вихрового струму в ОК. Уведена система координат для прохідного й накладного ВСП та наскрізна нумерація витків дозволила використати універсальний підхід при побудові еквівалентної електричної схеми зв'язаних контурів системи ВСП–ОК. За початок відліку в системі ВСП–ОК прийнятий перший виток верхнього шару намагнічувальної обмотки перетворювача з індексом 11, тоді останній виток нижнього струмопровідного шару вихрового струму в ОК матиме індекс  $nm$ .

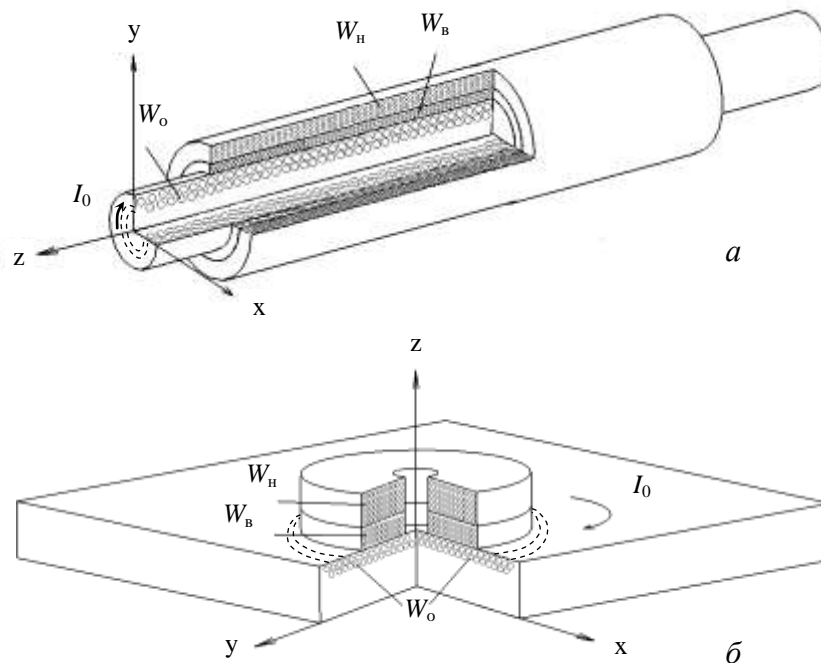


Рис. 1. Моделі прохідного (а) і накладного (б) ВСП з ОК

Матричне рівняння, що описує роботу системи ВСП–ОК, у загальному випадку має вигляд

$$\begin{bmatrix} \dot{Z}_{11} & \dot{Z}_{12} & \dot{Z}_{1j} & \dot{Z}_{1n} \\ \dot{Z}_{21} & \dot{Z}_{22} & \dot{Z}_{2j} & \dot{Z}_{2n} \\ \dot{Z}_{51} & \dot{Z}_{52} & \dot{Z}_{5j} & \dot{Z}_{5n} \\ \dot{Z}_{61} & \dot{Z}_{62} & \dot{Z}_{6j} & \dot{Z}_{6n} \\ \dot{Z}_{81} & \dot{Z}_{82} & \dot{Z}_{8j} & \dot{Z}_{8n} \\ \dot{Z}_{i1} & \dot{Z}_{i2} & \dot{Z}_{ij} & \dot{Z}_{in} \\ \dot{Z}_{m1} & \dot{Z}_{m2} & \dot{Z}_{mj} & \dot{Z}_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \\ \dot{I}_5 \\ \dot{I}_6 \\ \dot{I}_8 \\ \dot{I}_i \\ \dot{I}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{E}_1 \\ \dot{E}_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$



де  $\dot{Z}_{ij}$  ( $i = j$ ) – елементи головної діагоналі матриці коефіцієнтів у лівій частині рівняння є комплексними опорами окремих витків  $\dot{Z}_{ij} = R_{ij} + j\omega L_{ij}$ ;  $\dot{Z}_{ij}$  ( $i \neq j$ ) – елементи, що визначають магнітний зв'язок між усіма витками системи  $\dot{Z}_{ij} = j\omega M_{ij}$ ;  $\omega$  – циклічна частота зондувального поля;  $R_{ij}$  і  $L_{ij}$  – активні опори й власні індуктивності окремих намагнічувальних, вимірювальних і струмопровідних витків в ОК;  $e_i$  – ЕРС джерела змінної напруги, до якого підключаються витки намагнічувальної обмотки, причому  $e_i = E/W_H$ ;  $E$  – напруга на виході генератора;  $I_{ij}$  – струми у витках системи ВСП–ОК, у тому числі й індуквані у вимірювальній обмотці та в ОК. Для отримання математичних виразів для розрахунку всіх коефіцієнтів матриці в роботі розглянуто фізико-математичну модель ВСП–ОК у вигляді системи з трьох витків (рис. 2).

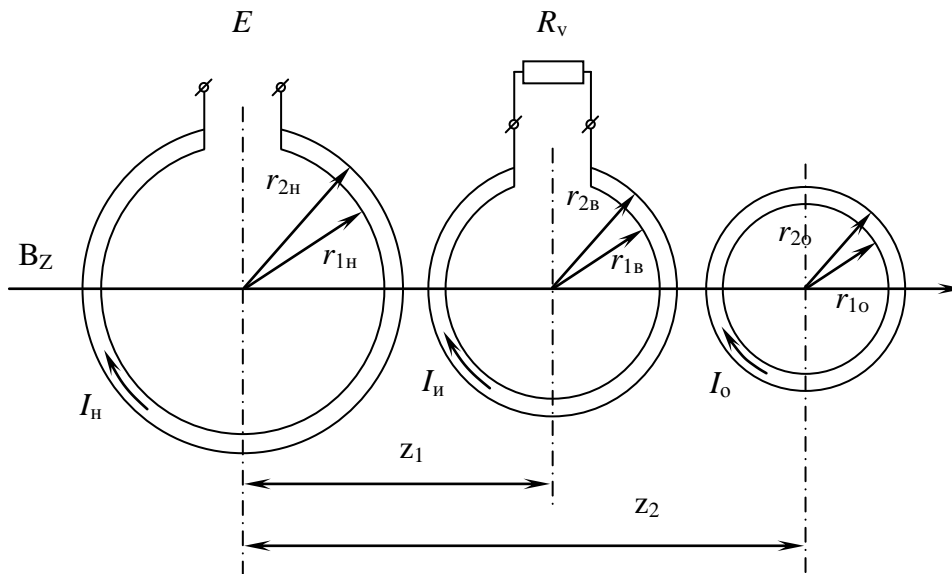


Рис. 2. Спрощена модель системи ВСП–ОК

У прийнятій системі координат показано один з витків намагнічувальної обмотки з внутрішнім радіусом  $r_{1H}$  і зовнішнім радіусом  $r_{2H}$ , яким протікає намагнічувальний струм  $I_H$ , викликаний ЕРС у контурі  $E$ . Виток вимірювальної обмотки відповідно з радіусами  $r_{1B}$  й  $r_{2B}$  з'єднаний з вольтметром, що має внутрішній опір  $R_v$  й у контурі якого протікає індукований струм  $I_B$ . Параметри струму  $I_B$  містять інформацію про зондувальне електромагнітне поле й реакцію на нього ОК, а також будь-якого короткозамкненого витка в ОК з внутрішнім радіусом  $r_{1O}$  й зовнішнім радіусом  $r_{2O}$ , по якому протікає вихровий струм  $I_O$ . Струм  $I_H$  створює зондувальне магнітне поле з індукцією  $B_z$ , а через поперечний переріз витків системи ВСП–ОК проходять відповідні магнітні потоки.

Для моделі, що складається з трьох витків, система лінійних алгебраїчних рівнянь має вигляд

$$\begin{cases} (R_H + j\omega L_H)\dot{I}_H + j\omega M_{HB}\dot{I}_B + j\omega M_{HO}\dot{I}_O = \dot{E}, \\ j\omega M_{BH}\dot{I}_H + (R_B + j\omega L_B + R_v)\dot{I}_B + j\omega M_{BO}\dot{I}_O = 0, \\ j\omega M_{OH}\dot{I}_H + j\omega M_{OB}\dot{I}_B + (R_O + j\omega L_O)\dot{I}_O = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Значення активних опорів  $R_H$ ,  $R_B$ ,  $R_O$  в разі змінного струму для трубки струму з глибиною проникнення електромагнітного поля  $\delta$  і власні індуктивності  $L_H$ ,  $L_B$ ,  $L_O$  кругового кільця круглого перерізу для будь-якої частоти зондувального поля при  $\mu_r \neq 1$  з точністю до членів порядку  $(r/r_{cep})^2$  знаходять як:

$$R = \frac{4\rho W}{\delta^2} d - \delta, \quad (3) \quad L = \mu_0 r_{\text{сеп}} \left( \ln \frac{8r_{\text{сеп}}}{r} - 2 + \mu_r \frac{\zeta}{4} \right), \quad (4)$$

де  $\rho$  – питомий електричний опір матеріалу трубки струму;  $W$  – кількість витків відповідної обмотки;  $d$  – зовнішній діаметр витка відповідної обмотки;  $\delta$  – глибина проникнення поля на даній частоті,  $\delta = r\sqrt{2}/x$ ;  $r$  – радіус поперечного перерізу витка;  $x = r\sqrt{\mu_0\mu_r\omega/\rho}$  – узагальнений параметр;  $r_{\text{сеп}}$  – середній радіус кільця;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнітна константа;  $\mu_r$  – відносна магнітна проникність матеріалу витка ОК;  $\zeta$  – параметр, значення якого залежить від значення  $x$ . Для будь-якого  $x$  значення  $\zeta$  визначають як

$$\zeta = \frac{4}{kr} \frac{b_0}{b_1} \sin(\beta_0 - \beta_1 - \frac{\pi}{4}), \quad (5)$$

де  $b_0$  і  $\beta_0$  – модуль та аргумент функції Бесселя  $J_0(x)$  першого роду нульового порядку;  $b_1$  і  $\beta_1$  – те саме для функції Бесселя  $J_1(x)$  першого роду першого порядку.

Для розрахунку взаємних індуктивностей  $M_{\text{нв}}$ ,  $M_{\text{но}}$ ,  $M_{\text{вн}}$ ,  $M_{\text{во}}$ ,  $M_{\text{он}}$ ,  $M_{\text{ов}}$  використан метод попарної взаємодії двох будь-яких струмових кілець системи, наведеної на рис. 2. Коли струмові кільця виготовлені з немагнітного матеріалу, то взаємну індуктивність коаксіальних кругових контурів обчислюють зі співвідношення

$$M_{\text{нв}} = M_{\text{вн}} = \mu_0 \sqrt{r_{2\text{н}} r_{2\text{в}}} \left[ \left( \frac{2}{\lambda} - \lambda \right) K - \frac{2}{\lambda} E \right], \quad (6)$$

де  $K$  й  $E$  – повні еліптичні інтеграли першого й другого роду з модулем  $\lambda$ ;  $\lambda$  – форма-фактор, який знаходять з виразу

$$\lambda = \sqrt{\frac{4r_{2\text{н}} r_{2\text{в}}}{z_1^2 + (r_{2\text{н}} + r_{2\text{в}})^2}}. \quad (7)$$

Коли одне або кожне з кілець моделі системи ВТП–ОК виконані з феромагнітного матеріалу (наприклад, струмопровідний виток ОК), то формула (6) несправедлива.

Для цього випадку в роботі отримано аналітичний вираз, що описує магнітну взаємодію витків зі струмом. Так, використовуючи відоме співвідношення для магнітного потоку, що пронизує тіло кільцевого провідника  $\psi_{\text{т}}$ , а також формулу для визначення індукції  $B_z$  через векторний потенціал, створений витком зі струмом  $I_{\text{н}}$ , у циліндричній системі координат одержано

$$\psi_{\text{т}} = \mu_0 \mu_r I_{\text{н}} (\sqrt{r_{2\text{н}} r_{2\text{o}}} f(\lambda_2) - \sqrt{r_{2\text{н}} r_{1\text{o}}} f(\lambda_1)), \quad (8)$$

де  $f(\lambda_2)$ ,  $f(\lambda_1)$  – відповідні значення функцій геометричних форм-факторів на зовнішньому  $r_{2\text{o}}$  та внутрішньому  $r_{1\text{o}}$  радіусах струмопровідного кільця в ОК, причому:

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{4r_{2\text{н}} r_{1\text{o}}}{z_2^2 + (r_{2\text{н}} + r_{1\text{o}})^2}}; \quad (9) \quad \lambda_2 = \sqrt{\frac{4r_{2\text{н}} r_{2\text{o}}}{z_2^2 + (r_{2\text{н}} + r_{2\text{o}})^2}}. \quad (10)$$

За аналогією, вираз для потоку  $\psi_{\text{в}}$  в просторі між намагнічувальною обмоткою й ОК має вигляд

$$\psi_{\text{в}} = \mu_0 I_{\text{н}} \sqrt{r_{2\text{н}} r_{1\text{o}}} f(\lambda_1). \quad (11)$$

Використовуючи формули (8), (11), з огляду на те, що  $M = \psi/I$  та  $\psi_0 = \psi_{\text{т}} + \psi_{\text{в}}$ , одержано співвідношення для взаємної індуктивності  $M_{\text{но}}$

$$M_{\text{но}} = \mu_0 \mu_r (\sqrt{r_{2\text{н}} r_{2\text{o}}} f(\lambda_2) - \sqrt{r_{2\text{н}} r_{1\text{o}}} f(\lambda_1)) + \mu_0 \sqrt{r_{2\text{н}} r_{1\text{o}}} f(\lambda_1). \quad (12)$$

Для випадку, коли кожне з кілець виконане з немагнітного матеріалу ( $\mu_r = 1$ ), співвідношення (12) переходить у формулу (6). Як видно з отриманих виразів (12) і (6), для феромагнітних матеріалів і відповідно неоднорідного середовища співвідношення  $M_{\text{но}} = M_{\text{он}}$  несправедливе.

У роботі розглянуто фізико-математичну модель прохідного трансформаторного ВСП, у якій намагнічувальна, вимірювальна обмотки й кільця з вихровими струмами в ОК являють собою одношарові концентричні котушки. Товщина окремих струмових кілець в ОК прийнята такою, що дорівнює еквівалентній глибині проникнення електромагнітного поля в зразок  $\delta$ . У цьому випадку матрицю коефіцієнтів системи лінійних алгебраїчних рівнянь (1) умовно розбита на дев'ять підматриць у вигляді

$$\begin{bmatrix} M_{HH} & M_{HB} & M_{HO} \\ M_{BH} & M_{BB} & M_{BO} \\ M_{OH} & M_{OB} & M_{OO} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_H \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_O \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{E} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

У кожній підматриці індекси при коефіцієнтах  $Z_{ij}$  і  $M_{ij}$  указують на приналежність даних витків відповідним обмоткам системи ВТП–ОК. Така розбивка матриці дозволила провести теоретичний аналіз фізико-математичної моделі й одержати співвідношення для розрахунку всіх коефіцієнтів  $Z_{ij}$  та  $M_{ij}$  розглянутої системи ВТП–ОК.

На практиці вихідними сигналами ВСП є ЕРС вимірювальної обмотки  $E_\Sigma$  і її фаза  $\varphi_\Sigma$ . Розв'язок системи лінійних рівнянь (13) відносно комплексного значення індукованого струму у вимірювальній обмотці  $\dot{I}_{jB}$ , дало можливість отримати співвідношення для визначення  $E_\Sigma$  і  $\varphi_\Sigma$ :

$$E_\Sigma = R_V \sqrt{\left( \operatorname{Re} \sum_{j=1}^m \dot{I}_{jB} \right)^2 + \left( \operatorname{Im} \left( \sum_{j=1}^m \dot{I}_{jB} \right) \right)^2}; \quad (14)$$

$$\varphi_\Sigma = -\operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} \sum_{j=1}^m \dot{I}_{jB}}{\operatorname{Re} \sum_{j=1}^m \dot{I}_{jB}}. \quad (15)$$

На основі розглянутої моделі в роботі одержано математичні вирази і проведено розрахунок інших конструкцій ВСП, а саме: прохідного параметричного й накладного трансформаторного.

Задача знаходження коефіцієнтів матричного рівняння (1) для наведеної моделі накладного трансформаторного ВСП з ОК зводиться до розв'язання задачі трьох витків, які схематично зображені на рис. 2. Виток з радіусом  $r_H$  належить намагнічувальній обмотці,  $r_B$  – вимірювальній обмотці,  $r_O$  – радіус довільного витка індукованого вихрового струму в контрольованій пластині. Витки намагнічувальної обмотки і вимірювальної обмотки ВСП розташовані над поверхнею ОК на відстані  $z_2$  і  $(z_2 - z_1)$  відповідно. Висота намагнічувальної обмотки  $h_H$ , а висота вимірювальної обмотки –  $h_B$ . Значення активних опорів і власних індуктивностей витків намагнічувальної й вимірювальної обмоток накладного ВСП, а також вихрострумових кілець в ОК визначають з формул (3) і (4) відповідно.

Прийнявши позначення параметрів обмоток і зразка такими самими, як і для прохідного ВСП, та розбивши матрицю рівнянь (1) на підматриці (13), у роботі розв'язано задачу знаходження всіх коефіцієнтів взаємного впливу  $M_{ij}$  для отриманих підматриць.

Для параметричного ВСП з ОК математична модель істотно спрощується. Якщо розглядати такий перетворювач з ОК у вигляді одношарових коаксіальних котушок з числами витків  $W_H$  і  $W_O$  відповідно, то матрицю (13) для даного випадку можна подати як

$$\begin{bmatrix} M_{HH} & M_{HO} \\ M_{OH} & M_{OO} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_H \\ \dot{I}_O \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{E} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

У роботі отримано співвідношення для розрахунку всіх коефіцієнтів у підматрицях (16). Як правило, реалізація вихрострумowego НК з параметричними ВСП передбачає включення їх у схеми мостів змінного струму або в резонансні автогенераторні схеми. У цьому випадку вираз для знаходження повного еквівалентного опору  $Z_{\text{екв}}$  перетворювача з ОК має вигляд

$$\dot{Z}_{\text{екв}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m R_{ij} + j\omega \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m L_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{ij} \right). \quad (17)$$

Для підтвердження адекватності розроблених моделей у роботі проведено експериментальні дослідження прохідного трансформаторного ВСП з ОК, які показали, що експериментальні й розрахункові значення вихідної напруги відрізняються менш ніж на 4 %, а для фазового кута різниця становить не більш як 8 %. Для накладних ВСП ці розбіжності дорівнюють 5 % і 10 % відповідно. Розроблена універсальна фізико-математична модель системи ВТП–ОК дозволяє замінити складні диференціальні рівняння другого порядку з певними граничними умовами для кожного типу ВСП на простішу систему лінійних алгебраїчних рівнянь.

**Третій розділ** присвячено розробці методів реалізації вихрострумowego НК. Однією з основних характеристик первинного перетворювача (датчика) є функція перетворення, що зв'язує вхідні параметри стану ОК з вихідними електричними сигналами датчика. Для ВСП з ОК вхідними параметрами є  $\mu_r$ ,  $\rho$  і геометричні розміри зразка, які, у свою чергу, залежать від його фізико-хімічного складу, впливу температури, механічних напружень та інших факторів. Вихідними сигналами ВСП є індуктивність, опір, напруга, струм, фаза, частота сигналу і їх похідні.

Запропоновано електричну принципову схему включення ВСП для випадків реалізації методів безконтактного спільного контролю  $\mu_r$  і  $\rho$  та геометричних параметрів металевих зразків, заснованих на вимірюванні трьох модулів векторів напруги ВСП. З використанням векторної діаграми складено систему алгебраїчних рівнянь, у результаті розв'язання якої отримано два варіанти реалізації задач НК, при яких зворотні функції перетворення ВСП, що зв'язують параметри  $\mu_r$  і  $\rho$  з вимірними значеннями вихідної напруги ВСП з ОК для заданих значень напруженості й частоти зондувального електромагнітного поля, мають вигляд:

$$1) \quad \mu_r = \frac{U_{\Sigma}^2 - U_{\text{вн}}^2 + \eta - 1 \bar{U}_{\Sigma 0}^2}{2\eta U_{\Sigma 0}^2 K_{\phi}}; \quad (18)$$

$$\rho = \frac{\mu_0 \pi d_{\text{п}}^2 f}{4N_{\phi} U_{\Sigma 0}^2} \sqrt{U_{\Sigma}^2 - U_{\text{вн}}^2 + \eta - 1 \bar{U}_{\Sigma 0}^2}. \quad (19)$$

$$2) \quad \mu_r = \frac{\sqrt{\eta U_{\Sigma}^2 + \eta - 1 \bar{U}_{\Sigma 0}^2 - U_{\text{вн}}^2 - \eta U_{\Sigma 0}^2}}{\eta U_{\Sigma 0} K}; \quad (20)$$

$$\rho = \frac{\mu_0 \pi d_{\text{п}}^2 f}{2N U_{\Sigma 0}} \sqrt{\eta U_{\Sigma}^2 + \eta - 1 \bar{U}_{\Sigma 0}^2 - U_{\text{вн}}^2 - \eta U_{\Sigma 0}^2}, \quad (21)$$

де  $U_{\Sigma}$ ,  $U_{\Sigma 0}$  і  $U_{\text{вн}}$  – сумарні та внесені напруги ВСП з ОК;  $\eta = d^2/d_{\text{п}}^2$  – коефіцієнт заповнення ( $d$  – діаметр досліджуваного зразка,  $d_{\text{п}}$  – діаметр вимірювальної обмотки ВСП);  $f$  – частота зондувального поля;  $K_{\phi}$ ,  $K$ ,  $N_{\phi}$  і  $N$  – універсальні функціональні залежності, які однозначно пов'язані з параметром  $x$ .

Таким чином, запропонований метод спільного безконтактного контролю  $\mu_r$  і  $\rho$  феромагнітного циліндричного зразка містить послідовність вимірювальних і розрахункових процедур. Для випадку, коли коефіцієнт заповнення  $\eta < 0,01$ , розглянуто ще одну модифікацію методу спільного контролю  $\mu_r$  і  $\rho$  феромагнітних зразків.

Отримано основні функції перетворення ВСП для двох випадків спільного безконтактного контролю  $\rho$  і  $d$  немагнітного металевого зразка:

$$1) \quad d = \frac{d_{\Pi}}{N_{d1}} \sqrt{\frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\Sigma 0}}}; \quad (22) \quad \rho = \frac{d_{\Pi}^2 \mu_0 \pi f U_{\text{ВН}}}{2U_{\Sigma 0} N_{\rho 1}}; \quad (23)$$

$$2) \quad d = \frac{d_{\Pi} \sqrt{U_{\text{ВН}}^2 - U_{\Sigma}^2 + U_{\Sigma 0}^2}}{N_{d2} U_{\Sigma 0}}; \quad (24) \quad \rho = \frac{\mu_0 \pi f d_{\Pi}^2 \sqrt{U_{\text{ВН}}^2 - U_{\Sigma}^2 + U_{\Sigma 0}^2}}{4U_{\Sigma 0}^2 N_{\rho 2}}; \quad (25)$$

де  $N_{d1}$ ,  $N_{\rho 1}$ ,  $N_{d2}$  і  $N_{\rho 2}$  – універсальні функціональні залежності перетворення.

Розглянуто окремі випадки однопараметрового контролю  $\rho$  або  $d$  немагнітного ОК, якщо один з параметрів відомий:

$$\rho = \frac{\mu_0 \pi f d^2}{2x^2}, \quad (26) \quad d = x \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0 \pi f}}. \quad (27)$$

У розділі проведено теоретичний аналіз й одержано основні функції перетворення при реалізації методів контролю  $\mu_r$ ,  $\rho$  і геометричних параметрів ОК, які засновані на вимірюванні сумарної напруги  $U_{\Sigma}$  і її фази  $\varphi_{\Sigma}$  або внесеної напруги  $U_{\text{ВН}}$  і її фази  $\varphi_{\text{ВН}}$ , а також вимірюванні напруги й фази вихідного сигналу ВСП при компенсації частини ЕРС, пропорційної магнітному потоку в повітряному зазорі між ОК і вимірювальною обмоткою ВТП.

Так, для методів безконтактного спільного контролю  $\mu_r$  і  $\rho$  феромагнітного виробу при вимірюванні  $U_{\Sigma}$ ,  $\varphi_{\Sigma}$  або  $U_{\text{ВН}}$ ,  $\varphi_{\text{ВН}}$  основні зворотні функції перетворення мають вигляд:

$$1) \quad \mu_r = \frac{U_{\Sigma} \sin \varphi_{\Sigma}}{\eta U_{\Sigma 0} K_{\mu}}; \quad (28) \quad \rho = \frac{\mu_0 \pi d_{\Pi}^2 f U_{\Sigma} \sin \varphi_{\Sigma}}{2U_{\Sigma 0} K_{\rho}}; \quad (29)$$

$$2) \quad \mu_r = \frac{U_{\text{ВН}} \sin \varphi_{\text{ВН}}}{\eta U_{\Sigma 0} K_{\mu}}; \quad (30) \quad \rho = \frac{\mu_0 \pi d_{\Pi}^2 f U_{\text{ВН}} \sin \varphi_{\text{ВН}}}{2U_{\Sigma 0} K_{\rho}}; \quad (31)$$

де  $K_{\mu}$ ,  $K_{\rho}$  – універсальні функціональні залежності.

При реалізації методу спільного безконтактного контролю  $\rho$  і  $d$  немагнітних виробів, у випадку вимірювання  $U_{\Sigma}$ ,  $\varphi_{\Sigma}$  або  $U_{\text{ВН}}$ ,  $\varphi_{\text{ВН}}$  основні функції перетворення мають вигляд:

$$1) \quad d = d_{\Pi} \sqrt{\frac{U_{\Sigma} \sin \varphi_{\Sigma}}{U_{\Sigma 0} K_{\mu}}}; \quad (32) \quad \rho = \frac{\mu_0 \pi d_{\Pi}^2 f U_{\Sigma} \sin \varphi_{\Sigma}}{2U_{\Sigma 0} K_{\rho}}; \quad (33)$$

$$2) \quad d = d_{\Pi} \sqrt{\frac{U_{\text{ВН}} \cos \varphi_{\text{ВН}}}{U_{\Sigma 0} Q_3}}; \quad (34) \quad \rho = \frac{\mu_0 2\pi f d_{\Pi}^2 U_{\text{ВН}} \cos \varphi_{\text{ВН}}}{x^2 U_{\Sigma 0} N_{\rho 2}}. \quad (35)$$

У роботі розглянуто випадок безконтактного контролю  $\rho$ , коли відомий діаметр ОК, тоді

$$\rho_{\varphi} = \frac{\mu_0 \pi f d^2}{2x_{\varphi}^2}; \quad (36) \quad \rho_K = \frac{\mu_0 \pi f d^2}{2x_K^2}; \quad (37)$$

де  $x_{\varphi}$  й  $x_K$  – значення узагальненого параметра, знайдені з допомогою функціональних залежностей  $x_{\varphi} = f(\varphi_2)$  і  $x_K = f(K)$ .

Наведено графіки всіх універсальних функціональних залежностей, які отримані

розрахунковим шляхом за допомогою функцій Бесселя.

Обґрунтовано метод спільного визначення електромагнітних параметрів слабомагнітних матеріалів. Показано, що, задавшись конкретним значенням методичної похибки  $\gamma_{\text{мд}}$ , можна знайти критичне значення радіуса  $r_{\text{кр}}$  ОК за відомих його електромагнітних параметрів і заданої частоти поля

$$r_{\text{кр}} = 4 \sqrt{\frac{\gamma_{\text{мд}}}{\Delta_{\text{max}}}} \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_{r\text{д}}(H_0^*) \sigma \omega}}, \quad (38)$$

де  $\mu_{r\text{д}}(H_0^*)$  – відносна, диференціальна магнітна проникність, що відповідає напруженості магнітного поля  $H_0 = H_0^*$ , за якої досягається максимальне значення  $\Delta$ , тобто  $\Delta = \Delta_{\text{max}}$ .

Подібним чином визначають і критичне значення частоти  $f_{\text{кр}}$  магнітного поля, за якого забезпечується критерій для слабомагнітного виробу заданого радіуса  $r$

$$f_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{\gamma_{\text{мд}}}{\Delta_{\text{max}}}} \frac{1}{2\pi r^2 \mu_0 \mu_{r\text{д}}(H_0^*) \sigma}. \quad (39)$$

Також розроблено методи, засновані на проведенні вимірювальних процедур й обчислювальних операцій для випадків безконтактного спільного контролю  $\mu_r$  і  $\rho$  феромагнітних зразків, контролю  $\rho$  і  $d$  немагнітних зразків та однопараметрового контролю  $\rho$  або  $d$ . Знайдено універсальні розмірні й безрозмірні функції перетворення, які зв'язують параметри ОК з електричними параметрами сигналів ВСП.

**Четвертий розділ** присвячено аналізу роботи ВСП–ОК при реалізації розроблених методів безконтактного контролю  $\mu_r$ ,  $\rho$  і геометричних параметрів металевих виробів та вибору раціональних за метрологічними характеристиками режимів контролю. Оскільки розглянуті методи контролю є непрямими, то була застосована методика обробки даних при непрямих вимірюваннях.

Для обґрунтованої оцінки чутливості перетворювачів, що реалізують методи спільного контролю  $\mu_r$  і  $\rho$ , отримано математичні вирази для розрахунку відносних чутливостей перетворювача за його напругою й фазою:

$$S_{U_{\Sigma}} = \frac{\partial U_{\Sigma} / U_{\Sigma 0}}{\partial x} = \eta \mu_r \frac{\eta \mu_r K + \eta \cos \varphi_2 \frac{\partial K}{\partial x} + K \eta \frac{\partial \cos \varphi_2}{\partial x}}{\sqrt{\eta \mu_r K^2 + 2\eta \mu_r \eta \cos \varphi_2 + \eta^2}}; \quad (40)$$

$$S_{\varphi_{\Sigma}} = \frac{\partial \varphi_{\Sigma}}{\partial x} = \eta \mu_r \frac{\frac{\partial K}{\partial x} \eta \sin \varphi_2 + K \eta \mu_r K + \eta \cos \varphi_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial x}}{\eta \mu_r K^2 + 2\eta \mu_r \eta \cos \varphi_2 + \eta^2}; \quad (41)$$

$$S_{U_{\text{ВН}}} = \frac{\partial U_{\text{ВН}} / U_{\Sigma 0}}{\partial x} = \eta \mu_r \frac{\mu_r K - \cos \varphi_2 \frac{\partial K}{\partial x} - K \frac{\partial \cos \varphi_2}{\partial x}}{\sqrt{\mu_r K^2 - 2\mu_r K \cos \varphi_2 + 1}}; \quad (42)$$

$$S_{\varphi_{\text{ВН}}} = \frac{\partial \varphi_{\text{ВН}}}{\partial x} = \mu_r \frac{K \mu_r K - \cos \varphi_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} - \frac{\partial K}{\partial x} \sin \varphi_2}{\mu_r K^2 - 2\mu_r K \cos \varphi_2 + 1}, \quad (43)$$

де  $\partial K / \partial x$ ,  $\partial \varphi_2 / \partial x$ ,  $\partial \cos \varphi_2 / \partial x$  – частинні похідні функцій перетворення, які визначаються в робочій зоні контролю.

Аналіз поведінки залежностей відносних чутливостей за амплітудою й фазою ВСП показує, що для розроблених методів існує діапазон зміни  $x$ , за якого досягаються максимальні значення чутливостей  $S_U$  і  $S_\varphi$ .

Другим важливим метрологічним параметром ВСП є похибки визначення  $\mu_r$  і  $\rho$ . Наприклад, використовуючи формули (30) і (31), одержані співвідношення для визначення складових  $\gamma_\mu$  й  $\gamma_\rho$  невиключеної систематичної похибки за довірчої імовірності 0,95 у вигляді:

$$\gamma_\mu = k \sqrt{\gamma_{U_\Sigma}^2 + \Phi_\Sigma \operatorname{ctg} \varphi_\Sigma \gamma_{\varphi_\Sigma}^2 + \gamma_{U_{\Sigma 0}}^2 + 4\gamma_d^2 + \gamma_{d_n}^2 + \gamma_{K_\mu}^2}; \quad (44)$$

$$\gamma_\rho = k \sqrt{\gamma_{U_\Sigma}^2 + \Phi_\Sigma \operatorname{ctg} \varphi_\Sigma \gamma_{\varphi_\Sigma}^2 + \gamma_{U_{\Sigma 0}}^2 + 4\gamma_{d_n}^2 + \gamma_f^2 + \gamma_{K_\rho}^2}, \quad (45)$$

де  $k = 1,11$  – коефіцієнт надійності за довірчої імовірності 0,95;  $\gamma_{U_{\Sigma 0}}$ ,  $\gamma_{\varphi_\Sigma}$ ,  $\gamma_d$ ,  $\gamma_{d_n}$ ,  $\gamma_f$  – похибки визначення параметрів, зазначених в індексах;  $\gamma_{K_\mu}$  і  $\gamma_{K_\rho}$  – похибки визначення значень  $K_\mu$  і  $K_\rho$  в робочій зоні, що відповідає отриманому значенню  $\operatorname{tg} \varphi_2$ , які можна знайти з формул

$$\gamma_{K_\mu} = \frac{f'_1 \operatorname{tg} \varphi_2}{f_1} \gamma_{\operatorname{tg} \varphi_2} = A_1 \gamma_{\operatorname{tg} \varphi_2}; \quad (46)$$

$$\gamma_{K_\rho} = \frac{f'_2 \operatorname{tg} \varphi_2}{f_2} \gamma_{\operatorname{tg} \varphi_2} = A_2 \gamma_{\operatorname{tg} \varphi_2}. \quad (47)$$

За аналогічною методикою одержано

$$\gamma_{\operatorname{tg} \varphi_2}^2 = a_1 \gamma_{U_\Sigma}^2 + a_2 \gamma_{\varphi_\Sigma}^2 + a_3 \gamma_{U_{\Sigma 0}}^2 + a_4 \gamma_\eta^2, \quad (48)$$

де  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  і  $a_4$  – коефіцієнти впливу, які визначаються як частинні похідні за вимірними параметрами:

$$a_1 = \frac{\partial \operatorname{tg} \varphi_2}{\partial U_\Sigma} = 1 - \frac{U_\Sigma \cos \varphi_\Sigma}{U_\Sigma \cos \varphi_\Sigma - U_{\Sigma 0}}; \quad (49)$$

$$a_2 = \frac{\partial \operatorname{tg} \varphi_2}{\partial \varphi_\Sigma} = \frac{\varphi_\Sigma \cos \varphi_\Sigma - U_{\Sigma 0}}{\sin \varphi_\Sigma (U_\Sigma \cos \varphi_\Sigma - U_{\Sigma 0})}; \quad (50)$$

$$a_3 = \frac{\partial \operatorname{tg} \varphi_2}{\partial U_{\Sigma 0}} = \frac{U_{\Sigma 0}}{U_\Sigma \cos \varphi_\Sigma - U_{\Sigma 0}}; \quad (51)$$

$$a_4 = \frac{\partial \operatorname{tg} \varphi_2}{\partial \eta} = \frac{\eta U_{\Sigma 0}}{U_{\Sigma 0} - U_\Sigma \cos \varphi_\Sigma}. \quad (52)$$

Аналогічним чином отримано математичні вирази для оцінки похибок спільного визначення  $\mu_r$  і  $\rho$ , яке базується на вимірюванні внесених параметрів вихідного сигналу перетворювача, та побудовано залежності відносних похибок  $\gamma_\mu$  й  $\gamma_\rho$  від узагальненого параметра  $x$  для розроблених методів.

Результати проведених досліджень дозволили зробити висновок, що існує раціональний режим роботи перетворювача в діапазоні  $1 \leq x \leq 3$ , за якого для  $\eta = 0,38$  похибки  $\gamma_\mu$  і

$\gamma_p$  не перевищують 1 і 3 % відповідно. Варто відзначити, що в цьому ж діапазоні зміни  $x$  відносна чутливість ВСП максимальна.

Одержано співвідношення для визначення невиключеної систематичної похибки контролю  $\mu_r$  і  $\rho$  ферромагнітних циліндричних виробів у разі реалізації методу трьох вольтметрів. З аналізу поведінки похибок  $\gamma_\mu$  і  $\gamma_\rho$ , а також із залежностей чутливості зроблено висновок, що існує раціональний режим роботи ВСП при безконтактному спільному контролі  $\mu_r$  і  $\rho$  циліндричного ферромагнітного виробу, в якому  $\gamma_\mu < 3\%$ ,  $\gamma_\rho < 5\%$  для  $x$  ( $1 \leq x \leq 4$ ).

Для випадку спільного контролю  $\rho$  і  $d$  немагнітних металевих виробів у роботі отримано основні співвідношення для оцінки похибок і чутливості ВСП, виконано розрахунок і проведено порівняльний аналіз залежностей відносних чутливостей для розроблених методів контролю, з чого виходить: по-перше – існують максимуми чутливості за амплітудою і за фазою вихідного сигналу ВСП, тобто можна виділити раціональний режим роботи ВСП як у випадку вимірювання  $U_\Sigma$  й  $\phi_\Sigma$ , так і у випадку вимірювання  $U_{\text{вн}}$  й  $\phi_{\text{вн}}$ ; по-друге, можна зробити висновок, що якщо  $\eta \geq 0,5$ , то кращим є метод спільного контролю  $\rho$  і  $d$  за вимірними значеннями  $U_\Sigma$  і  $\phi_\Sigma$ , а якщо  $\eta \leq 0,5$ , то вигідніше застосовувати метод спільного контролю  $\rho$  і  $d$  за внесеними параметрами  $U_{\text{вн}}$  і  $\phi_{\text{вн}}$  сигналу перетворювача.

Переваги й недоліки розроблених методів і приладів контролю оцінені за аналізом їх метрологічних характеристик. Поведінка похибок  $\gamma_\rho$  і  $\gamma_d$  для розроблених методів показує, що існує раціональний режим роботи ВСП, за якого  $\gamma_\rho \leq 0,5\%$  і  $\gamma_d \leq 0,2\%$ . Різниця лише в тому, що мінімум похибок досягається за різних значень  $x$  (тобто за різних режимів роботи перетворювача).

Для розроблених методів роздільного контролю  $\rho$  за відомого діаметра й контролю  $d$  за відомого значення  $\rho$  металевих виробів у роботі отримано математичні вирази для розрахунку похибок  $\gamma_\rho$  і  $\gamma_d$ .

У разі контролю лише одного параметра  $\rho$  за умови компенсації ефектів повітряного зазору й вимірювання або  $U_2$ , або  $\phi_2$  відносні чутливості за амплітудою й за фазою сигналу ВСП, як показано на рис. 3, також мають максимуми. Але головне те, що якщо задатися значенням відносної чутливості на рівні  $S \approx 0,1$ , то частотний діапазон контрольованого параметра, а отже, і параметра  $x$  розшириться ( $0,5 < x < 4,25$ ). А це значить, що одним і тим самим перетворювачем можна контролювати електричні параметри зразка в більш широкому діапазоні його зміни. Крім того, змінюючи частоту зондувального поля, можна проводити структурний аналіз металів за їх перерізом.

У випадку реалізації методу контролю  $\rho$  за умови компенсації ефектів повітряного зазору між ОК і вимірювальною обмоткою ВСП, як показано на рис. 4, похибка контролю за фазою  $\gamma_{\rho\phi}$  досягає мінімуму при  $x < 2,5$ , а за амплітудою  $\gamma_{\rho K}$  – досягає при  $x \geq 2,5$ , тобто, задавшись певним значенням похибки  $\gamma_\rho$ , можна значно розширити діапазон контролю  $\rho$  у перерізі зразка.

Для підтвердження застосовності розробленого однопараметрового методу контролю  $d$  у роботі було проведено на кафедрі ПМНК НТУ "ХПІ" експериментальні дослідження з контролю діаметра циліндричних виробів на установці з використанням трансформаторного ВСП. В експерименті було досліджено три зразки, виготовлені з міді з діаметрами 5,9, 6,0 і 6,1 мм. Дослідження проведені в широкому (різний скін-ефект) діапазоні зміни частоти зондувального магнітного поля ( $20 \text{ Гц} < f < 20 \text{ кГц}$ ).



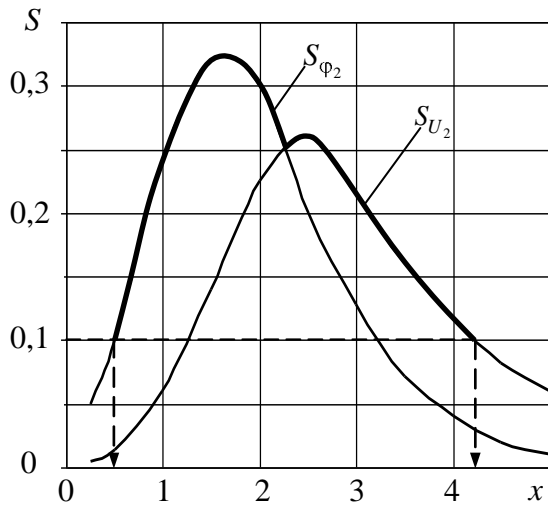


Рис. 3. Залежності відносних чутливостей  $S_{U_2}$  та  $S_{\varphi_2}$  від узагальненого параметра  $x$

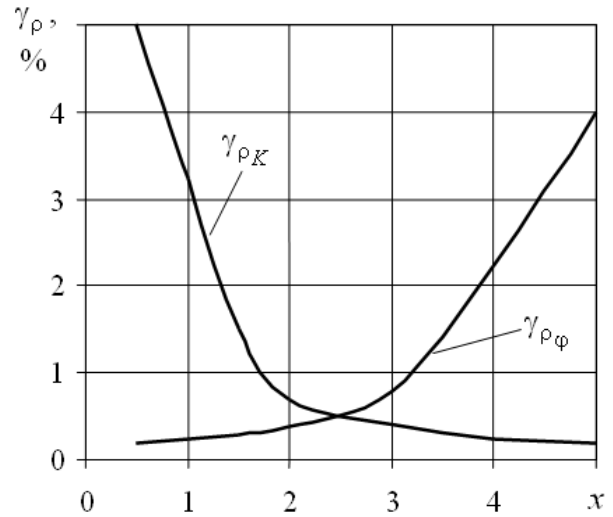


Рис. 4. Залежності відносних похибок  $\gamma_{pK}$  і  $\gamma_{p\varphi}$  від  $x$  у разі однопараметрового контролю

На рис. 5 наведено залежності похибок безконтактного контролю діаметра  $\gamma_d$  і відносної чутливості ВСП у широкому діапазоні зміни узагальненого параметра  $x$ .

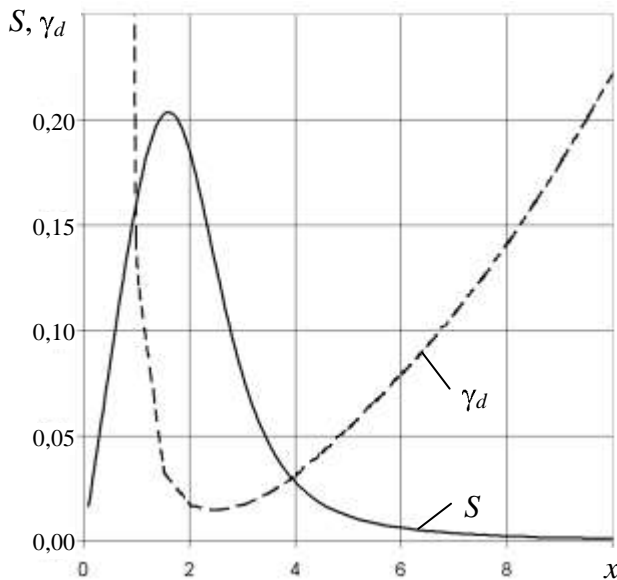


Рис. 5. Залежності  $S = f(x)$  і  $\gamma_d = f(x)$

Показано, що існує раціональний режим роботи трансформаторного ВСП ( $2 \leq x \leq 3$ ), за якого похибки контролю діаметра  $\gamma_d \leq 2\%$ , що для безконтактних методів є досить прийнятним.

Отримано модифіковані аналітичні вирази для оцінки відносних чутливостей і похибок для трьох методів спільного контролю  $\mu_r$  і  $\rho$  феромагнітних виробів, контролю  $\rho$  і  $d$  немагнітних матеріалів у разі вимірювання амплітуди й фази вихідного сигналу ВСП. При реалізації методу спільного контролю цих параметрів у випадку вимірювання трьох модулів векторів напруги вихідного сигналу ВСП отримано математичні вирази для оцінки похибок і чутливостей та проведено аналіз їх поведінки в широкому частотному діапазоні. Проаналізовано окремі випадки однопараметрового

контролю параметрів ОК.

У п'ятому розділі наведено функціональні й принципові схеми розроблених приладів безконтактного контролю електромагнітних і геометричних параметрів циліндричних металевих ОК. Запропоновано та проаналізовано можливості практичного використання в промисловості й навчальному процесі розроблених методів і пристроїв.

Розроблено алгоритми двопараметрового контролю як у раціональному режимі роботи ВСП на фіксованій частоті зондувального магнітного поля, так і при пошаровому скануванні структури циліндричних зразків, що зазнають різних фізико-механічних і термічних впливів.

Принцип побудови пристроїв, які широко застосовуються у сфері НК, полягає в тому, що вимірювальний блок з первинними перетворювачами виконується у вигляді переносного приладу і призначений для первинної обробки вимірювальної інформації, вибору раціональ-

них режимів роботи ВСП, накопичування й зберігання інформації. Після цього в лабораторії прилад за допомогою інтерфейсу RS-232 підключається до потужної ПЕОМ, де здійснюється повна обробка накопиченої інформації з одержанням результатів контрольованих параметрів ОК, наданням рекомендацій за результатами контролю, складанням протоколів контролю й документуванням.

На рис. 6 наведено функціональну схему розробленого автоматизованого пристрою для безконтактного вихрострумовео контролю металевих виробів, яка складається з трьох основних вузлів: генератора синусоїдальних сигналів; ВСП; АЦП.

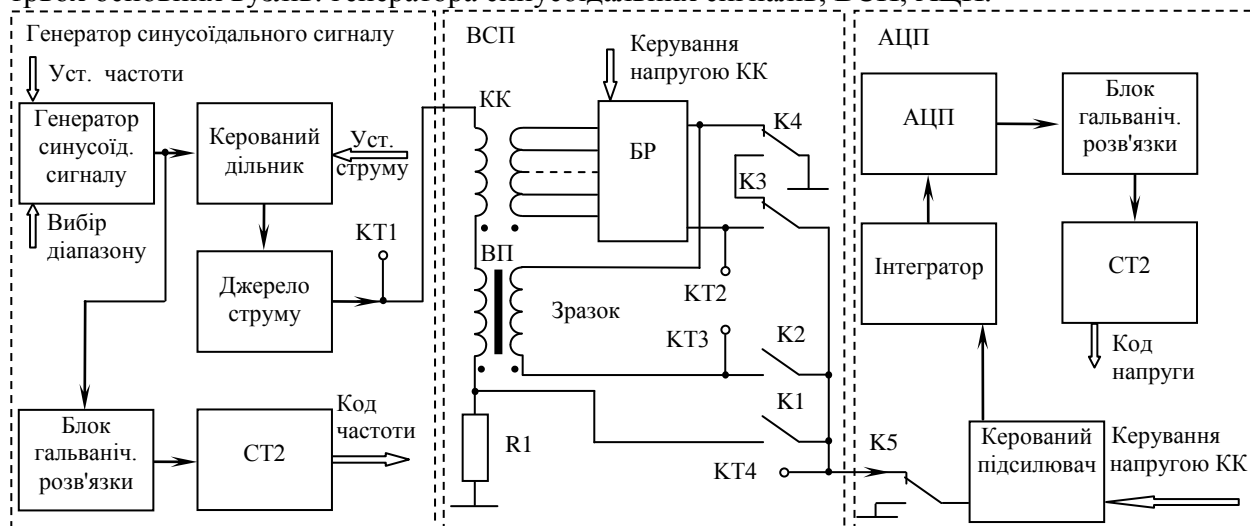


Рис. 6. Функціональна схема автоматизованого вихрострумовео пристрою

Генератор синусоїдальних сигналів включає генератор, керований подільник частоти та джерело вихідного струму. Частота коливань генератора задається 14-розрядним двійково-десятковим кодом та однорозрядним кодом вибору діапазону (низькочастотний діапазон від 50 до 1000 Гц, високочастотний діапазон від 1000 до 8000 Гц). Керований подільник напруги має 8 рівнів квантування. Значення вихідного струму прямо пропорційне вхідній напрузі джерела струму, що дозволяє проводити контроль при 8 різних струмах намагнічування (від 10 до 100 мА). При цьому значення струму намагнічування не залежить від опору навантаження.

Експериментальні дослідження проводили на циліндричних суцільних зразках, виготовлених з різних марок сталей (38ХС, 40Х, ст.45, Х18Н10Т, ст.20, ст.40 та ін.). Метрологічні характеристики пристрою в режимі контролю  $\mu_r$  і  $\rho$  визначали шляхом порівняння результатів, отриманих за допомогою розробленого автоматизованого пристрою і з використанням стандартних вимірювальних приладів роздільними методами (балістичним для виміру  $\mu_r$  і мостовим для визначення  $\rho$ ). Результати досліджень були впроваджені на ВАТ "Дніпропетровський трубний завод" і показали, що застосування автоматизованої системи можливе для розбраковування зразків за марками сталей, а також для контролю якості у технологічних процесах виготовлення прутків, прокату й інших виробів.

Для оперативного безконтактного контролю виробів у польових умовах останнім часом значного поширення набули портативні вихрострумовео прилади для дефектоскопії, товщинометрії та структуроскопії. Стрімкий розвиток однокристальних ЕОМ і вдосконалення методів вихрострумовео контролю уможливили побудову таких приладів. Хоча ці прилади й позбавлені універсальності, але, вирішуючи конкретне завдання, вони мають безліч переваг перед стаціонарними автоматизованими системами.

На рис. 7 наведено один з варіантів побудови вихрострумовео пристрою на базі однокристального мікропроцесора типу AT90S8535. Пристрій складається з робочого трансформаторного ВСП 1 з досліджуваним зразком 2 і допоміжного ВСП 3, генератора синусоїдального сигналу 4, комутатора сигналів 5, аналого-цифрового перетворювача 6, однокристального мікропроцесора 7, клавіатури 8 і цифрового індикатора 9.

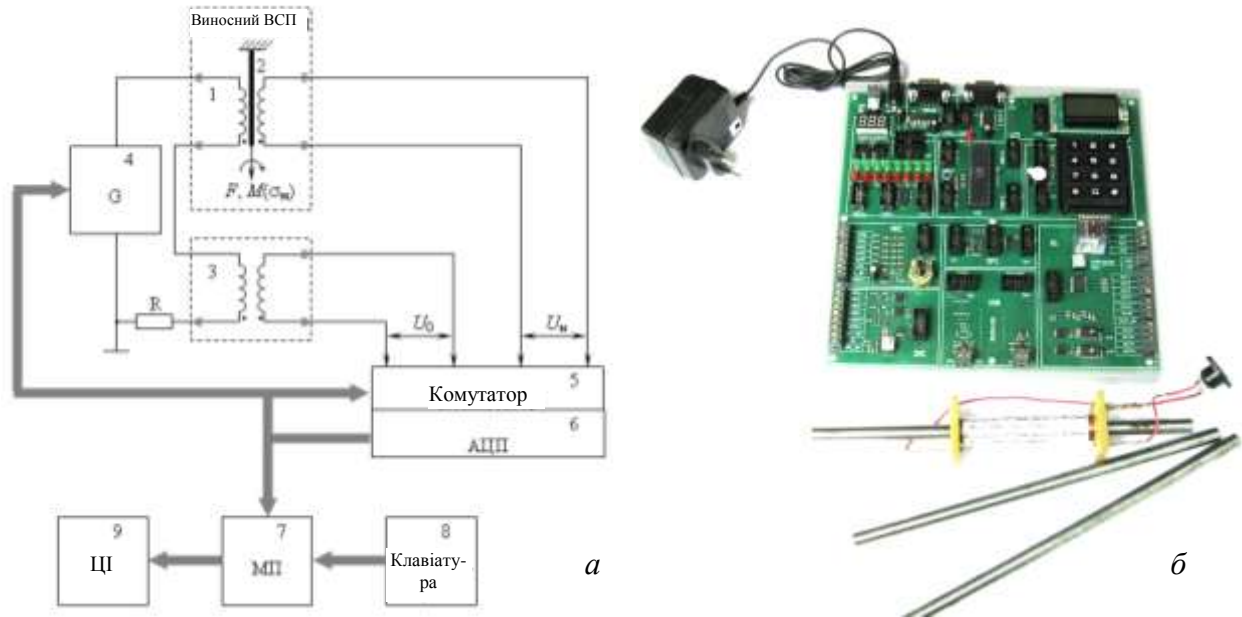


Рис. 7. Функціональна схема (а) і зовнішній вигляд (б) вихрострумowego пристрою для контролю механічних навантажень у циліндричних виробах

У пристрої реалізується один з трьох основних методів контролю механічної деформації – амплітудний, фазовий або змінно-частотний.

Суть амплітудного й фазового методів полягає в тому, що при механічному навантаженні на феромагнітний зразок, який розміщено у ВСП, вимірюють амплітуду  $U$  або фазу  $\varphi$  вихідного сигналу ВСП, а значення механічної напруги  $\sigma_M$  у межах закону пружності визначають з формул:

$$\sigma_M = \pm k_a \left( \frac{x_H^2 \mathcal{U}_H}{x_0 \mathcal{U}_0} - 1 \right); \quad (53)$$

$$\sigma_M = \pm k_\varphi \left( \frac{x_H^2 \Phi_H}{x_0 \Phi_0} - 1 \right), \quad (54)$$

де "+" і "-" – відповідають розтягуванню й стисканню виробу відповідно;  $k_a$  і  $k_\varphi$  – розмірні коефіцієнти;  $x_H(U_H)$  і  $x_H(\Phi_H)$  – залежності узагальненого параметра  $x$  від напруги  $U$  або фази  $\varphi$  вихідного сигналу ВСП при навантаженому виробі;  $x_0(U_0)$  і  $x_0(\Phi_0)$  – ті ж самі функції, але без навантаження.

При реалізації змінно-частотного методу контролю формула для визначення  $\sigma_M$  має вигляд

$$\sigma_M = \pm k_f \left[ f_H / f_0 - 1 \right], \quad (55)$$

де  $k_f$  – розмірний коефіцієнт;  $f_H$  і  $f_0$  – частоти намагнічуючого струму ВСП із навантаженим і ненавантаженим зразком відповідно (для  $U = \text{const}$  або  $\varphi = \text{const}$ ).

В області пружної деформації для досліджуваного виробу максимальна роздільна здатність ВСП для амплітудного, фазового й змінно-частотного методів контролю механічних навантажень становить 2,5 мВ/МПа, 0,33 град/МПа й 25 Гц/МПа відповідно.

Розроблено принципові схеми основних вузлів автоматизованих пристроїв вихрострумowego контролю. Для пристроїв НК на основі ВСП важливим елементом є генератор стабільного струму, навантаженням якого є намагнічувальна обмотка ВСП. Оскільки основним завданням програмно-керованого генератора синусоїдального струму є установлення і стабілізація заданого за амплітудою та частотою намагнічувального струму ВСП, то його схема містить кілька контурів керування й контролю цих параметрів. Мікропроцесор постійно порівнює задані значення амплітуди намагнічувального струму і його частоти

ти з реальними значеннями й циклічно з певним інтервалом часу здійснює їх коректування. Розроблена схема генератора синусоїдального сигналу має підвищені метрологічні характеристики як за амплітудою, так і за частотою вихідного сигналу.

Інформаційними параметрами вихідного сигналу ВСП є синусоїдальна напруга і її фаза, які функціонально пов'язані з електромагнітними й геометричними параметрами ОК, а також з конструктивними параметрами та режимами роботи перетворювача (частотою зондувального поля і його напруженістю). У розробленому багатоканальному вольтметрі змінного струму МП постійно циклічно опитує всі виходи ВСП, накопичує і проводить первинну обробку отриманої інформації з наступним пересиланням скорегованих значень через канал RS232 у центральний процесор приладу для остаточної обробки й одержання результатів контролю.

Спільний безконтактний контроль  $\mu_r$  і  $\rho$  становить практичний інтерес при розробкованні матеріалів, оскільки дозволяє одержати більш повну інформацію про структурні параметри виробу. Вирішення завдання одночасного визначення  $\mu_r$  і  $\rho$  можна істотно спростити, якщо звузити сортамент досліджуваних матеріалів. Відомо, що слабомагнітні матеріали (нержавіючі сталі X18H10T, НН-3, 45M17Ю3 та ін., а також парамагнітні чавуни) мають відносну магнітну проникність  $1 \leq \mu_r \leq 3$  і питомий електричний опір  $\rho = (0,6 \div 2) \cdot 10^{-6}$  Ом·м.

У роботі розроблено двопараметровий прилад спільного безконтактного контролю  $\mu_r$  і  $\rho$  циліндричних виробів, блок-схема якого наведена на рис. 8. Описаний прилад знайшов застосування на підприємстві ВАТ “Електромотор”(м. Полтава) при відпрацюванні

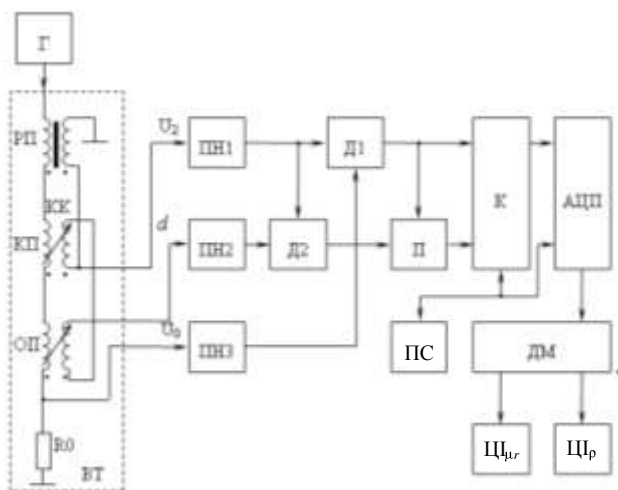


Рис. 8. Блок-схема приладу для контролю  $\mu_r$  і  $\rho$  слабомагнітних матеріалів

технології виготовлення підшипників заглибних електродвигунів. Крім того, прилад було використано в атомній енергетиці на підприємстві “Запорізька АЕС”. Отже, запропонований прилад і може застосовуватися в тих галузях промисловості, де потрібно проводити структурний аналіз початкового матеріалу й поопераційний контроль виробів у процесі їх технологічної обробки.

Вирішувати завдання розробковання матеріалів, які знаходяться в одній партії й виготовлені з одного матеріалу, за їх електромагнітними і геометричними параметрами вкрай складно через незначну відмінність матеріалів за  $\Delta\mu_r$ ,  $\Delta\rho$  і  $\Delta d$ . Аналогічне завдання виникає і при контролі різних фізико-

механічних впливів на металевий зразок, коли ці впливи призводять до незначних змін  $\mu_r$  і  $\rho$ . Все це пояснюється недостатньою чутливістю параметричного ВСП й особливо у випадках, коли добротність перетворювача  $Q \leq 1$ .

Для вирішення даного завдання на основі розробленого способу включення прохідного параметричного ВСП у схему моста змінного струму, що працює в невірноваженому режимі поблизу стану рівноваги, у роботі розроблено високочутливий індикатор з лінійною шкалою для безконтактного контролю механічних навантажень, що виникають у металевих конструкціях. За допомогою такого пристрою проводили розбраківку циліндричних зразків за їх діаметрами (при їх незначній відмінності). Індикатор використовували також для контролю тиску в трубах охолоджувальних установок, де потрібно контролювати одночасно і сам тиск, і діаметр труби, адже в процесі безаварійної експлуатації необхідно знати механічне навантаження, що виникає в стінці труби, яке залежить від тиску й товщини стінки труби.

У процесі експлуатації енергетичного обладнання часто постає завдання безконтактного визначення фактичного напружено-деформованого стану окремих вузлів і агрегатів. Оскільки зміна  $\mu_r$  від механічної деформації для більшості конструкційних сталей не перевищує 10 %, а зміна параметра  $\rho$  не перевищує 3 % в області пружних деформацій, то цього буде достатньо, щоб реалізувати розроблений метод і пристрій вихрострумове безконтактного контролю обертового моменту  $M$  за зміни його значення від 0 до  $\pm M_{\max}$ . Результати показують, що розроблений перетворювач й алгоритм безконтактного контролю обертового моменту може широко застосовуватися як датчик в автоматизованих системах керування приводами, а також для діагностики й визначення гранично допустимих механічних навантажень в енергетичному обладнанні.

Розроблений перетворювач завдяки об'єднанню в ньому магнітопружного й тензометричного ефектів легко адаптується при визначенні механічних моментів скручування, що виникають у різних за сортаментом феромагнітних і немагнітних металевих виробів з домінуванням одного з цих ефектів, і це сприяє розширенню його функціональних можливостей. Макет діючої установки впроваджено у навчальний процес й використовується під час проведення лабораторних робіт.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична проблема створення теоретично обґрунтованих методів функціонального синтезу адаптивних вихрострумів систем неруйнівного контролю об'єктів з апіорі змінними фізико-механічними властивостями виробів різної конфігурації в електромагнітних полях різної орієнтації.

1. На основі розроблених фізико-математичних моделей функціонування системи ВТП–ОК, що описують роботу вихрострумів перетворювачів з різною спрямованістю зондувального електромагнітного поля й різною конфігурацією контрольованих виробів, отримано математичні вирази, за якими визначено взаємозв'язок інформативних параметрів ОК з параметрами вихідного сигналу ВСП. Розроблена модель дозволила замінити складні диференціальні рівняння другого порядку з певними граничними умовами для кожного типу ВСП на простішу систему лінійних алгебраїчних рівнянь, що дозволило прискорити процес розробки вихрострумів перетворювачів і приладів багатопараметрового контролю.

2. Проведено порівняння результатів розрахунку амплітуди й фази вихідного сигналу трансформаторного перетворювача та комплексного еквівалентного опору і його складових (активного опору й індуктивності) параметричного ВСП прохідного й накладного типів з результатами експериментальних досліджень, яке довело адекватність розроблених моделей. Так, для трансформаторного ВСП прохідного типу різниця між розрахунковими й експериментальними значеннями напруги та фази вихідного сигналу перетворювача при контролі немагнітних і феромагнітних циліндричних виробів становила 4 і 8 % відповідно. Це пояснюється невідповідністю реальних і прийнятих у моделі електромагнітних властивостей ОК через залежність  $\mu_r$  від напруженості електромагнітного поля, спрощеним описом магнітного потоку в серцевині ОК, залежністю від довжини й форми зразка. Що стосується адекватності моделей трансформаторного й параметричного ВСП накладного типу, то при контролі немагнітних виробів різниця становила 5 %, а при контролі феромагнітних матеріалів не перевищувала 10 %.

3. Отримано основні розмірні й безрозмірні функції перетворення ВТП при розв'язанні прямої й зворотної задач спільного безконтактного контролю параметрів  $\mu_r$  і  $\rho$  феромагнітних виробів,  $\rho$  і  $d$  немагнітних металевих виробів для випадків включення ВСП як за схемою з вимірюванням амплітуди й фази, так і за схемою з вимірюванням трьох модулів векторів напруги вихідного сигналу перетворювача в різних режимах роботи ВСП. Одержано також функції перетворення для окремих випадків безконтактного НК одного з інформативних параметрів немагнітного металевих виробів за відомого значення другого.

4. Розроблено методи контролю основних інформативних ( $\mu_r$ ,  $\rho$  і  $d$ ) параметрів ОК і

встановлено процедури проведення вимірювальних і розрахункових операцій функціонування ВСП у випадку контролю цих параметрів як усереднених за перерізом ОК на фіксованій частоті поля, так і в разі пошарового сканування структури циліндричного ОК за допомогою зміни частоти зондувального поля.

5. На основі критерію слабкого загасання магнітного поля для розробленого методу контролю слабоманітних матеріалів, отримано математичні вирази, які дозволили за умови заданої методичної похибки визначити критичні значення радіуса контрольованого циліндричного виробу й критичні значення робочої частоти зондувального поля ВСП залежно від поставленого завдання контролю.

6. Одержано аналітичні вирази для розрахунку відносних чутливостей і похибок для трьох методів спільного контролю  $\mu_r$  і  $\rho$  феромагнітних виробів при вимірюванні амплітуди й фази вихідного сигналу ВСП. Проведено порівняльний аналіз поведінки метрологічних характеристик у широкому діапазоні зміни узагальненого параметра  $x$ , який показав, що існує діапазон зміни  $x$ , за якого досягаються максимальні значення чутливості. Найбільшу чутливість ВСП має при реалізації методу з компенсацією частини ЕРС, пропорційної магнітному потоку в зазорі між ОК і вимірювальною обмоткою ВСП, для якого  $S_{U_2} \approx 25$  ( $1 < x < 2$ ) і  $S_{\varphi_2} \approx 15$  ( $1,5 < x < 2,5$ ). Установлено, що значення похибок контролю  $\gamma_\mu$  та  $\gamma_\rho$  для цього методу менші, ніж для інших методів, і становлять  $\gamma_\mu \approx 0,4\%$  ( $0,5 < x < 3,0$ ) і  $\gamma_\rho \approx 0,5\%$  ( $0,5 < x < 3,5$ ). У випадках спільного безконтактного контролю  $\mu_r$  і  $\rho$  за виміряним значенням сумарної або внесеної напруги і їх фази ( $U_\Sigma$ ,  $\varphi_\Sigma$  і  $U_{вн}$ ,  $\varphi_{вн}$ ) показано, що кращим за точністю й чутливістю при дослідженні зразків з малими значеннями  $\mu_r$  (нержавіючі сталі, парамагнітні чавуни та ін.) і малими значеннями коефіцієнта заповнення  $\eta$  виявляється метод, заснований на вимірюванні  $U_{вн}$  та  $\varphi_{вн}$ .

7. Установлено, що в разі спільного безконтактного контролю  $\rho$  і  $d$  немагнітних металевих виробів ( $\eta \geq 0,5$ ) кращим є метод контролю за виміряними сумарними значеннями  $U_\Sigma$  і  $\varphi_\Sigma$ , а якщо ( $\eta \leq 0,5$ ), то доцільніше використовувати метод контролю за внесеними параметрами  $U_{вн}$  і  $\varphi_{вн}$ . При контролі одного параметра  $\rho$  за умови компенсації ефектів повітряного зазору й вимірювання або  $U_2$ , або  $\varphi_2$  відносні чутливості за амплітудою й за фазою також мають максимуми. Якщо задатися значенням чутливості на рівні  $S \approx 0,1$ , то діапазон зміни контрольованого параметра розшириться ( $0,5 < x < 4,5$ ), а це значить, що тим самим ВСП можна контролювати  $\rho$  у більш широкому діапазоні його зміни або проводити структурний аналіз металевих зразків за їх перерізом.

8. Отримано аналітичні вирази для оцінки похибок і чутливості ВСП при реалізації методів контролю інформативних параметрів ОК для випадку вимірювання трьох модулів векторів напруги вихідного сигналу перетворювача. Проведено аналіз поведінки похибок контролю в широкому частотному діапазоні для різних коефіцієнтів заповнення перетворювача  $\eta$ , який показав, що існує раціональний режим роботи ВСП у діапазоні  $1 \leq x \leq 3$ , за якого для  $\eta = 0,38$  похибки визначення  $\gamma_\mu$  і  $\gamma_\rho$  не перевищують 1 і 3 % відповідно.

9. Розроблено мікропроцесорні вихроструміві пристрої, що реалізують двопараметрові методи контролю електромагнітних і геометричних параметрів феромагнітних і немагнітних виробів, які легко трансформуються для вирішення завдань однопараметрового контролю, амплітудним, фазовим і змінно-частотним методами як у раціональному режимі роботи ВСП, так і при пошаровому скануванні структури циліндричних зразків, що зазнають різних фізико-механічних і термічних впливів. На основі прохідного параметричного ВСП, включеного в схему мосту змінного струму, що працює в нерівноважному режимі поблизу точки рівноваги, побудовано лабораторний макет досить простого високочутливого індикатора з лінійною шкалою для безконтактного контролю механічних навантажень, що виникають у металевих конструкціях.

10. Основні результати дисертаційної роботи впроваджено у ВАТ "Дніпропетровський трубний завод" (м. Дніпропетровськ) для безконтактного контролю електромагнітних параметрів виробів з метою визначення фізико-механічних параметрів й оцінки домінуючих домішок у метали; у ВАТ "Електромотор" (м. Полтава) для спільного визначення магнітної проникності й питомої електропровідності циліндричних виробів, що дозволило надійно розбракувати матеріали за їх марками; на ДП ВП "Запорізька атомна електростанція" (м. Енергодар) для безконтактного контролю магнітної проникності й питомої електропровідності суцільних і трубчастих виробів з метою розбракування їх за експлуатаційними характеристиками; у навчальному процесі на кафедрі приладів і методів неруйнівного контролю НТУ "ХПІ" (м. Харків) у лекційному курсі та під час проведення лабораторних занять з дисципліни "Електромагнітні види неруйнівного контролю" за спеціальністю 7.090903, а також при підготовці спеціалістів, магістрів й аспірантів.

### **СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Горкунов Б. М. Определение магнитных параметров слабомагнитных изделий в слабом магнитном поле / Б. М. Горкунов // Технічна електродинаміка. – Київ, 1998. – Вип.2, т.2. – С. 179–182.

2. Горкунов Б. М. Метрологические характеристики электромагнитного преобразователя при контроле механических напряжений в материалах / Б. М. Горкунов // Вестник ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, 1999. – №24. – С. 3–9.

3. Горкунов Б. М. Электромагнитные методы неразрушающего контроля и технической диагностики изделий и конструкций / Б. М. Горкунов, В. П. Себко, Н. Н. Сиренко // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – Харків, 2000. – №4. – С. 60–63.

*Здобувачем проведено порівняльний аналіз параметричних моделей опосередкованого контролю механічних напружень при використанні амплітудного, фазового та змінно-частотного методів.*

4. Горкунов Б. М. Методы и средства бесконтактного контроля механических напряжений, усилий, веса и деформаций в цилиндрических изделиях / Б. М. Горкунов // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2002. – №12, т.1. – С. 285–288.

5. Горкунов Б. М. Универсальные функции преобразования электромагнитного датчика с токопроводящим прутком / Б. М. Горкунов, В. П. Себко, В. Н. Гугнин // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2002. – №18. – С. 112–118.

*Здобувачем одержано наближені аналітичні рівняння, які поєднують нормовану амплітуду магнітного потоку та його фазу всередині досліджуваного виробу з інформативними параметрами самого виробу.*

6. Горкунов Б. М. Алгоритм и функциональная схема автоматической установки для контроля механических параметров металлических изделий / Б. М. Горкунов, В. П. Себко, А. О. Жулидов // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – №4. – С. 103–110.

*Здобувачем розроблено функціональну схему та макет пристрою для автоматизованого контролю електромагнітних параметрів металевих виробів, на які діє механічна сила.*

7. Горкунов Б. М. Вихретоковый двухпараметровый контроль ферромагнитных цилиндрических изделий / Б. М. Горкунов, И. В. Тюпа // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – №5. – С. 93–99.

*Здобувачем розроблено інформаційну модель вимірювального опосередкованого контролю магнітних та електричних параметрів феромагнітних виробів.*

8. Горкунов Б. М. Вихретоковый двухпараметровый контроль немагнитных цилиндрических изделий / Б. М. Горкунов, С. Г. Львов // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – №7. – С. 35–41.

*Здобувачем розроблено інформаційну модель вимірювального опосередкованого ко-*

*нтролю геометричних та електричних параметрів немагнітних металевих виробів.*

9. Горкунов Б. М. Вихретоковый преобразователь для бесконтактного контроля механических напряжений в цилиндрических немагнитных изделиях / Б. М. Горкунов // Технічна електродинаміка. – Київ, 2004. – Тем. вип., ч.3. – С. 25–30.

10. Горкунов Б. М. Анализ погрешностей вихретокового преобразователя при двухпараметровом контроле немагнитных изделий / Б. М. Горкунов, С. Г. Львов, В. Г. Хоменко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – №21. – С. 49–54.

*Здобувачем одержано рівняння для розрахунку відносних похибок опосередкованого контролю геометричних та електричних параметрів металевих виробів з різним коефіцієнтом заповнення.*

11. Горкунов Б. М. Возможности использования неравновесного режима работы моста переменного тока для вихретокового контроля / Б. М. Горкунов, О. С. Сомхиева // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – №34. – С. 46–51.

*Здобувачем запропоновано методи підвищення чутливості параметричних вихреструмових перетворювачів, які включені в мостову схему, що працює в невірноважному режимі поблизу точки рівноваги.*

12. Горкунов Б. М. Исследование вихретокового преобразователя для бесконтактного контроля механических напряжений в стальных цилиндрических образцах / Б. М. Горкунов // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – №43. – С. 173–178.

13. Горкунов Б. М. Выбор рационального режима работы вихретокового преобразователя по частоте поля и коэффициенту заполнения / Б. М. Горкунов, С. М. Глоба, Р. Л. Островерх // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – №46. – С. 37–43.

*Здобувачем проведено порівняльний аналіз в умовах перехресної класифікації інформаційних сигналів і їх опосередкованих функціональних перетворень з метою визначення раціональних режимів роботи первинного перетворювача.*

14. Горкунов Б. М. Расширение диапазона контроля параметров немагнитных изделий вихретоковым преобразователем / Б. М. Горкунов, С. Н. Глоба, А. Ю. Агеев // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2005. – №35. – С. 55–62.

*Здобувачем розроблено метод розширення діапазону контролю інформативних параметрів немагнітних металевих виробів за максимумом чутливості електромагнітного перетворювача.*

15. Горкунов Б. М. Точностные характеристики бесконтактного одновременного измерения магнитной проницаемости и электропроводности / Б. М. Горкунов, И. В. Тюпа // Технічна електродинаміка. – Київ, 2005. – Тем. вип., ч.3. – С. 97–100.

*Здобувачем проведено аналіз поведінки коефіцієнтів впливу під час вимірювання складових сигналу перетворювача в разі опосередкованого двопараметрового контролю параметрів виробу.*

16. Горкунов Б. М. Генератор синусоидального тока для питания трансформаторных вихретоковых преобразователей / Б. М. Горкунов, И. А. Пушай // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2005. – №44. – С. 19–24.

*Здобувачем розроблено джерело живлення вихреструмового перетворювача зі стабільними вихідними параметрами за амплітудою та частотою незалежно від характеру зміни навантаження.*

17. Горкунов Б. М. Вихретоковый двухпараметровый контроль ферромагнитных цилиндрических изделий / Б. М. Горкунов, С. Г. Львов, А. В. Кипенский // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2005. – №45. – С. 439–440.

*Здобувачем проведено аналіз однопараметрової моделі перетворення й визначено раціональний режим роботи трансформаторного перетворювача за максимуму чутливості та мінімуму похибки контролю.*

18. Горкунов Б. М. Выбор рационального метода вихретокового контроля немагнитных металлических изделий / Б. М. Горкунов // Технічна електродинаміка. – Київ, 2006. – Тем. вип., ч.4. – С. 57–60.



19. Горкунов Б. М. Многоканальный измеритель выходных сигналов вихретокового преобразователя для контроля параметров металлических изделий / Б. М. Горкунов, С. Г. Львов, О. Л. Кайдалов // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2006. – №34. – С. 55–59.

*Здобувачем розроблено багатоканальний перетворювач змінного струму з високими метрологічними характеристиками для роботи в системі контролю інформативних параметрів вихреструмивим методом.*

20. Горкунов Б. М. Вихретоковый преобразователь для бесконтактного контроля крутящего момента ферромагнитного вала / Б. М. Горкунов, И. В. Тюпа, А. А. Авраменко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – Вип. 12(118). – С. 193–198.

*Здобувачем розроблено вихреструмивий метод і пристрій безконтактного контролю механічного моменту на валу двигуна на основі магнітопружного та тензорезистивного ефектів.*

21. Чувствительность вихретокового преобразователя при контроле механического момента на валу / Горкунов Б. М., Глоба С. Н., Авраменко А. А., Тюпа И. В. // Зб. наук. праць. Дніпродзержинського державного технічного університету. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2007. – С. 92–93.

*Здобувачем одержано математичні вирази для оцінки чутливості ВТП при контролі крутильних механічних моментів на валу електропривода та проведено оптимізацію роботи системи.*

22. Горкунов Б. М. Точностные характеристики электромагнитного датчика для систем управления и контроля / Б. М. Горкунов // Український метрологічний журнал. – 2007. – №3. – С. 19–23.

23. Горкунов Б. М. Сравнительный анализ метрологических характеристик амплитудно-фазовых методов вихретокового контроля ферромагнитных материалов / Б. М. Горкунов // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – №5. – С. 37–41.

24. Горкунов Б. М. Модель вихретокового преобразователя проходного типа с токопроводящим цилиндрическим образцом / Б. М. Горкунов, И. В. Тюпа, А. А. Тищенко // Технічна електродинаміка. – Київ, 2007. – Тем. вип., ч.5. – С. 45–48.

*Здобувачем знайдено рівняння для розрахунку коефіцієнтів системи лінійних алгебраїчних рівнянь, які описують взаємодію феромагнітних циліндричних виробів з вихреструмивим перетворювачем у багатопараметровій інформаційній системі.*

25. Горкунов Б. М. Модель вихретокового преобразователя с зеркально отображенными токами в плоском образце / Б. М. Горкунов, И. В. Тюпа, А. А. Авраменко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2007. – №35. – С. 51–56.

*Здобувачем розроблено фізико-математичну модель вихреструмивого перетворювача накладного типу з плоским виробом і метод визначення коефіцієнтів системи інформаційних сигналів.*

26. Модель параметричного вихреструмивого перетворювача / Горкунов Б. М., Тюпа И. В., Авраменко А. А., Скопенко В. В. // Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2008. – №21. – С. 9–13.

*Здобувачем розроблено модель параметричної системи «ВТП–ОК», аналітично знайдено рівняння для визначення складових комплексного опору перетворювача.*

27. Моделирование вихретокового преобразователя для контроля поверхностных слоев металлических изделий / Горкунов Б. М., Сиренко Н. Н., Тюпа И. В., Тищенко А. А. // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2008. – №48. – С. 72–77.

*Здобувачем одержано формули для розрахунку просторового розподілу складових еквівалентного інформаційного сигналу перетворювача з досліджуванним зразком.*

28. Работа вихретокового преобразователя при контроле токопроводов / Горкунов Б. М., Глоба С. Н., Шахин И. Х., Тищенко А. А. // Технічна електродинаміка. – Київ, 2008. – Тем. вип., ч.2. – С. 68–69.

*Здобувачем одержано рівняння для оцінювання похибок однопараметрового контролю електричних параметрів виробів як при інтегральному, так і при пошаровому скануванні зондувальним полем.*

29. Горкунов Б. М. Расчетная модель взаимодействия поверхностного упрочненного слоя с вихретоковым преобразователем / Б. М. Горкунов, И. В. Тюпа, А. А. Тищенко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2009. – №14. – С. 100–103.

*Здобувачем досліджено модель трифакторного впливу інформативних параметрів та проведено аналіз вимірювальних сигналів з урахуванням взаємодії впливаючих факторів.*

30. Горкунов Б. М. Автоматизированная установка для бесконтактного контроля механического момента на приводных валах / Б. М. Горкунов // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип.3(56), ч.1 – С. 111–113.

31. Горкунов Б. М. Модели взаимодействия ВТП при контроле деталей со сложной геометрией в электромагнитных полях разной ориентации / Б. М. Горкунов, И. В. Тюпа, И. Х. Шахин // Технічна електродинаміка. – Київ, 2010. – Тем. вип., ч.2. – С. 189–190.

*Здобувачем розроблено та досліджено модель синтезу вихрострумowego перетворювача з різною орієнтацією зондувального поля та складною геометрією контрольованого об'єкта.*

32. Горкунов Б. М. Вихретоковый контроль поверхностных и подповерхностных деформаций структуры цилиндрических валов / Б. М. Горкунов, В. В. Скопенко, И. В. Тюпа // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – №28. – С. 538–539.

*Здобувачем розроблено метод розширення діапазону контролю механічної деформації в поверхневих шарах за рахунок використання амплітудної та фазової функції перетворення ВТП.*

33. Пат. 56801А (Україна), МПК(2003) G01R33/12. Спосіб неруйнівного контролю електромагнітних параметрів циліндричних об'єктів / Горкунов Б. М., Себко В. П., Тюпа І. В.; заявник і власник НТУ"ХПІ". – № 2002097509 ; заяв. 17.09.2002 ; надрук. 15.05.2003, Бюл. №5.

*Здобувачем проведено аналіз факторів, які впливають на точність контролю та розширення асортименту контрольованих феромагнітних виробів.*

34. Пат. на корисну модель №19172 (Україна), МПК(2006) G01R33/12. Спосіб безконтактного виміру механічної напруги в циліндричних провідних немагнітних виробках / Горкунов Б. М., Горкунова О. Б. ; заявник і власник НТУ"ХПІ". – № u200603956 ; заяв. 10.04.2006 ; надрук. 15.12.2006, Бюл. №12.

*Здобувачем розроблено метод і пристрій для безконтактного контролю механічної напруги виходячи з кореляційної залежності її від електропровідності металевих виробів.*

35. Пат. на корисну модель №52844 (Україна), МПК(2010) G01N27/90. Вихрострумовой спосіб контролю поверхневого зміцнення / Горкунов Б. М., Тюпа І. В., Тищенко А. А.; заявник і власник НТУ"ХПІ". – №u201003240 ; заяв. 22.03.2010 ; надрук. 10.09.2010, Бюл. №17.

*Здобувачем доведено необхідність використання схеми включення перетворювача з вимірюванням трьох модулів векторів напруг вихідного сигналу, що значно підвищило надійність контролю.*

36. Многофункциональные системы управления процессорами обработки материалов и изделий / Б. М. Горкунов, В. П. Себко, В. В. Лысенко, Н. Н. Сиренко // Функционально ориентированные вычислительные системы: республ. науч.-техн. конф., 4–6 октября 1990 г.: тезисы докл. – Харьков, 1990. – Ч.1 – С 28.

*Здобувачем розроблено функціональну схему автоматизованого пристрою керування процесами термічної, хімічної та механічної обробки металевих виробів, заснованого на багатопараметровому методі контролю.*

37. Горкунов Б. М. Амплитудный и фазовый методы определения механических напряжений / Б. М. Горкунов // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: междунар. науч.-техн. конф., 12–14 травня 1997 р.: матер. конф., ч.3. – Харків: НТУ "ХПІ", 1997. – С. 45–47.

38. Горкунов Б.М. Определение метрологических характеристик электромагнитных преобразователей с нагружаемым изделием / Б. М. Горкунов // Метрологическое обеспечение в области электрических, магнитных и радиотехнических измерений: междунар. науч.-техн. конф., 13–16 жовтня 1997 р.: матер. конф. – Харків, 1997. – Т.2. – С. 116–118.

39. Горкунов Б. М. Выбор рационального режима работы вихретокового преобразователя по частоте поля и коэффициенту заполнения / Б. М. Горкунов, С. М. Глоба // Проблемы информатики і моделювання: міжнар. наук.-техн. конф., 25–27 листопада 2004 р.: тези допов. – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – С 19.

*Здобувачем оцінено чутливість контролю залежно від частоти зондувального поля та коефіцієнта заповнення як аргументів функції опосередкованого перетворення на основі лінійної моделі системи «ВТП–ОК».*

40. Горкунов Б. М. Повышение разрешающей способности трансформаторных вихретоковых преобразователей для двухпараметрового контроля / Б. М. Горкунов, С. Г. Львов, В. Г. Хоменко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія освіти, здоров'я : міжнар. наук.-техн. конф., 20–21 травня 2004 р.: тези допов. – Харків: НТУ "ХПІ", 2004. – Ч.2. – С. 369.

*Здобувачем проведено аналіз поведінки метрологічних характеристик вихреструмowego перетворювача в широкому частотному діапазоні й невизначеності впливаючих факторів при двомірному опосередкованому контролі.*

41. Горкунов Б. М. Определение крутящего момента с помощью электромагнитного преобразователя / Б. М. Горкунов, И. В. Тюпа, С. В. Тюпа // Метрология и измерительная техника: междунар. науч.-техн. конф., 19–23 вересня 2005 р.: матер. конф. – Харків: ХНУРЕ, 2005. – С. 136–138.

*Здобувачем розроблено безконтактний електромагнітний метод контролю обертального моменту та розподілу механічного напруження у перерізі циліндричного виробу.*

42. Физическое моделирование вихретокового преобразователя проходного типа / Горкунов Б. М., Тюпа С. Ю., Тюпа И. В., Скопенко В. В. // Metrology and metrology assurance – 2007 : 17th National scientific symposium, 10–14 September, 2007 : матер. конф. – Sozopol, Bulgaria. – P. 121–125.

*Здобувачем зроблено вибір математичної моделі трансформаторного перетворювача з циліндричним виробом й отримано математичні вирази, які поєднують інформаційні параметри контролю з вихідними сигналами ВТП.*

43. Расчетная модель параметрического вихретокового преобразователя / Горкунов Б. М., Тюпа И. В., Авраменко А. А., Скопенко В. В. // Приладобудування: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф., 22–23 квітня 2008 р.: матер. конф. – Київ.: ПБФ, НТУУ "КПІ", 2008. – С. 218–219.

*Здобувачем розроблено модель параметричного проходного вихреструмowego перетворювача з магнітним і немагнітним ОК, яка побудована на основі взаємодії довільно розташованих у просторі кілець зі струмом.*

44. Горкунов Б. М. Моделирование ВТП для контроля поверхностных и подповерхностных структур цилиндрических изделий / Б. М. Горкунов // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности: междунар. науч.-техн. конф., 18–20 марта 2009 г. : тезисы докл. – Москва: Спектр, 2009. – С. 128.

45. Горкунов Б. М. Вихреструмовой контроль якості точеного зварювання / Б. М. Горкунов, Г. Г. Горбашова // Приладобудування-2010: стан і перспективи: міжнар. наук.-техн. конф., 27–28 квітня 2010 р.: матер. конф. – Київ.: ПБФ, НТУУ "КПІ", 2010. – С. 228–229.

*Здобувачем розроблено модель функціонального впливу вхідних аргументів на параметри контролю якості точеного зварювання металевих виробів.*

46. Gorkunov B. M. Calculation and experimental verification of model of EDT / B. M. Gorkunov // 10th European Conference on Non-Destructive Testing: Moscow, June 7–11 2010 : Abstracts. Part 1. – M.: Publishing house Spektr, 2010. – P. 110–112.

## АНОТАЦІЇ

**Горкунов Б. М. Развитие теории и практики построения приборов контроля физико-механических характеристик материалов вихрострумовым методом. – Рукопись.**

Диссертация на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2011.

Диссертация посвящена вирішенню важливої науково-прикладної проблеми створення методів функціонального синтезу адаптивних моделей вихрострумових перетворювачів для неруйнівного контролю об’єктів з апіорі змінними фізико-механічними властивостями.

Розроблено основні положення, на яких базується реалізація вихрострумового методу взаємодії перетворювачів різного типу з феромагнітними та немагнітними виробами. Проведено якісне й кількісне дослідження адекватності розроблених моделей параметричного і трансформаторного перетворювачів проходного та накладного типів. Визначено основні функції перетворення для розроблених методів безконтактного контролю інформативних параметрів феромагнітних, слабомагнітних і немагнітних виробів. Розроблено методи та проведено дослідження метрологічних характеристик вихрострумових перетворювачів в одно- та багатопараметровому варіантах контролю з метою визначення раціональних режимів роботи і знаходження допустимих інтервалів зміни контрольованих параметрів. Визначено процедури вимірювальних і розрахункових операцій функціонування вихрострумових приладів, що працюють як у раціональному, так і в змінно-частотному режимах контролю інформативних параметрів виробу. Досліджено вплив розміру об’єкта контролю, а також режимів роботи вихрострумового перетворювача на точність контролю. Розроблено структурні та принципові схеми автоматизованих вихрострумових приладів безконтактного контролю електричних, магнітних і геометричних параметрів виробів, а також пов’язаних з ними фізико-механічних характеристик матеріалів. Результати роботи впроваджено на підприємствах і в навчальному процесі.

**Ключові слова:** прилади неруйнівного контролю, надійність систем контролю, вихрострумовий багатопараметровий контроль, відносна магнітна проникність, питомий електричний опір, трансформаторний і параметричний перетворювачі, феромагнітний і немагнітний виріб.

**Горкунов Б. М. Развитие теории и практики создания приборов контроля физико-механических характеристик материалов вихретоковым методом. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля и определения состава веществ. Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, Харьков, 2011.

Диссертация посвящена решению важной научно-прикладной проблемы создания теоретически обоснованных методов функционального синтеза адаптивных моделей вихретоковых преобразователей для неразрушающего контроля объектов с априори переменными физико-механическими свойствами.

Разработаны основные положения и методы расчета выходных сигналов параметрического и трансформаторного вихретокового преобразователя проходного и накладного типов, суть которых заключается в использовании физико-математических моделей, основанных на суперпозиции элементарных электромагнитных полей, сформированных отдельными токами обмоток преобразователя и трубками вихревых токов в объекте кон-

троля, что позволило, рассматривая их как систему взаимодействующих контуров, определить параметры выходного сигнала преобразователя путем решения системы линейных алгебраических уравнений. Исследована и экспериментально доказана адекватность разработанных физико-математических моделей системы «вихретоковый преобразователь – объект контроля» при испытании ферромагнитных, слабомагнитных и немагнитных материалов.

Получены основные размерные и безразмерные функции преобразования вихретокового преобразователя при решении прямой и обратной задач совместного бесконтактного контроля относительной магнитной проницаемости и удельного электрического сопротивления ферромагнитных изделий, удельного электрического сопротивления и диаметра немагнитных металлических изделий для случаев включения вихретокового преобразователя как по схеме с измерением амплитуды и фазы, так и по схеме с измерением трех модулей векторов напряжений выходного сигнала преобразователя в различных режимах работы преобразователя. Получены также функции преобразования для частных случаев бесконтактного неразрушающего контроля одного из информативных параметров немагнитного металлического изделия при известном значении второго.

Разработаны методы контроля основных информативных параметров объектов контроля и установлены процедуры проведения измерительных и расчетных операций функционирования вихретокового преобразователя в случае контроля этих параметров как усредненных по сечению изделия на фиксированной частоте поля, так и в случае послойного сканирования структуры цилиндрического изделия посредством изменения частоты зондирующего поля.

На основе критерия слабого затухания магнитного поля для разработанного метода контроля слабомагнитных материалов получены математические выражения, которые позволяют определять критические значения радиуса контролируемого цилиндрического изделия и критические значения рабочей частоты зондирующего поля преобразователя в зависимости от поставленной задачи контроля и заданной методической погрешности.

Предложен единый методологический подход и получены математические выражения для расчета чувствительности и погрешности вихретоковых преобразователей, что позволило установить рациональные по критериям минимума погрешности и максимума чувствительности режимы работы преобразователя для различных схем включения и определить предельные диапазоны изменения контролируемых параметров изделия и частоты зондирующего поля преобразователя.

Усовершенствованы методы бесконтактной диагностики состояния изделий при их механическом нагружении, основанные на дуальности взаимозависимости электрического сигнала преобразователя и характеристик механической диаграммы нагрузки металлических изделий. Получили дальнейшее развитие информационно-измерительные технологии многопараметрового контроля, которые использованы при построении адаптивных автоматизированных систем вихретокового контроля качества металлических изделий.

Разработаны микропроцессорные вихретоковые устройства, реализующие двухпараметровые методы контроля электромагнитных и геометрических параметров ферромагнитных и немагнитных изделий, которые легко трансформируются для решения задач однопараметрового контроля амплитудным, фазовым и переменнo-частотными методами как в рациональном режиме работы преобразователя, так и при послойном сканировании структуры цилиндрических образцов, подверженных различным видам физико-механических и термических воздействий. На основе проходного параметрического преобразователя, включенного в схему моста переменного тока, работающего в неравновесном режиме вблизи точки равновесия, построен лабораторный макет достаточно простого высокочувствительного индикатора с линейной шкалой для бесконтактного контроля механических напряжений, возникающих в металлических конструкциях. Результаты внедрения доказали высокую эффективность разработанных методов и устройств.

**Ключевые слова:** приборы неразрушающего контроля, надежность систем контроля, вихретоковый многопараметровый контроль, относительная магнитная проницаемость, удельное электрическое сопротивление, трансформаторный и параметрический преобразователи, ферромагнитный и немагнитный образец.

**Gorkunov B. M. Development of theory and practice for implementation of devices controlling physical and mechanical materials characteristics using eddy current method – Manuscript.**

Dissertation for scientific degree of Doctor of Science (Technology), Specialty 05.11.13 – Instruments and Methods of Control and Composition Determination of Substances. National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2011.

The dissertation is dedicated to solve important scientific and applied problem of creating of theoretically well-founded methods of functional synthesis of adaptive models of eddy currents converters for non-destructive control of objects with a priori variable physical and mechanical characteristics.

Main provisions have been developed and used as a foundation for further realization of eddy current method of interaction between various types of converters and ferromagnetic and nonmagnetic products. Qualitative and quantitative research on models adequacy of developed parametric and transformer converters of attachable and passable types has been performed. Core conversion functions for developed methods of nondestructive control of informative parameters of ferromagnetic, weak-magnetic and nonmagnetic products have been defined. Methods have been developed and research has been handled on metrological characteristics of eddy current converters in semi- and multi parameter variants of control in order to define rational regimes of work and detect tolerance intervals of controllable parameters change. Procedures of measuring and calculating operations of eddy current devices (operating both in rational and frequency-changeable product informational parameters control regimes) functioning have been determined. Controllable objects' shape and size as well as work regimes of eddy current converter influence on control accuracy has been examined. Structural and principal schemes of automated eddy current devices for nondestructive control of electrical, magnetic and geometrical products' parameters as well as connected to them physical and mechanical material characteristics have been developed.

**Key words:** devices for nondestructive control, reliability of monitoring systems, eddy current multi parameter control, relative magnetic permittivity, electrical resistivity, transformer and parametric converters, ferromagnetic and nonmagnetic product.