

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

**Бондаренко Володимир Омелянович**

УДК 620.179.14

**БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНІ МЕТОДИ І ПРИСТРОЇ ДЛЯ ОДНОЧАСНОГО КОНТРОЛЮ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ  
МАТЕРІАЛІВ І ВИРОБІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ.  
(ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА)**

Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків - 2004

Дисертація є рукопис

Робота виконана в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор  
Себко Вадим Пантелійович,  
Національний технічний університет "ХПІ"  
МОН України, м. Харків, завідувач кафедри  
приладів та методів неруйнівного контролю.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,  
Стороженко Володимир Олександрович,  
Харківський національний університет радіоелектроніки МОН Ук-  
раїни, м. Харків,

завідувач кафедри фізики

доктор технічних наук, професор

Білокур Іван Павлович,

Національний авіаційний університет МОН України, м. Київ,

завідувач кафедри машинознавства

доктор технічних наук, професор

Поджаренко Володимир Олександрович,

Вінницький національний технічний університет МОН України, м.

Вінниця, завідувач кафедри

метрології та промислової автоматики

Провідна установа: Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти та газу МОН України,  
кафедра методи та прилади контролю якості  
та сертифікації продукції, м. Івано - Франківськ

Захист відбудеться "8" липня 2004р. о 14.30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

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

Автореферат розісланий "2" червня 2004 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Горкунов Б.М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Задача підвищення якості елементів та матеріалів, як і в цілому обладнання, завжди була актуальною. Її рішення не можливе без розробки високоефективних засобів контролю технологічних процесів і якості продукції, серед яких важливе місце займають методи та засоби багатопараметрового неруйнівного контролю матеріалів і елементів енергетичного обладнання. Такий контроль дозволяє більш ефективно оцінити якість безперервного потоку промислової продукції на основі високотехнологічних фізичних моделей перетворення контролюємих параметрів в сигнали вимірювальної інформації з наступною обробкою в складі комплексних автоматизованих систем контролю.

Особливе значення задача підвищення контролю енергетичного обладнання, на основі багатофункціональних методів НК, набуває в теперішній час. В свою чергу підвищення якості складає невід'ємну частину загальної задачі підвищення рівня промисловості та прискорення науково-технічного прогресу. Проте, в цьому важливому питанні ще має місце ряд не розв'язаних задач: не вибрані елементи і матеріали енергетичного обладнання, експлуатаційний контроль яких має першочергове значення та з яких треба починати, забезпечуючи при вимірах електричних і геометричних параметрів найбільшу достовірність контролю; не розроблені багатофункціональні методи для одночасного контролю радіуса (діаметра) та питомого електричного опору циліндричних токопроводів; не створені багатопараметрові електромагнітні перетворювачі, які реалізують багатофункціональні методи одночасного неруйнівного контролю зазначених параметрів; не розглядались в рамках теоретичних моделей неруйнівного контролю електричні методи і електроємні перетворювачі для комплексного контролю відносної діелектричної проникності, питомого електричного опору та рівня трансформаторного масла; не описані методики розрахунків очікуваних значень інформаційних сигналів зазначених перетворювачів; не створені методики теоретичного визначення похибок двох – та трьох параметрових вимірів; не розглянуті умови та межі використання, включно частотний і температурні діапазони зазначених перетворювачів; не визначені функціональні характеристики цих перетворювачів та не встановлені раціональні по похибкам і чутливості режими їх роботи; не розроблені методи добору оптимальної кількості найбільш інформативних показників якості матеріалів і виробів при багатопараметровому неруйнівному контролі, з урахуванням впливу часу експлуатації на значення контролюємих параметрів, на разі чого, повстала проблема, з одного боку – створення нових методів електричного і електромагнітного неруйнівного контролю та реалізації на їх основі багатофункціональних пристроїв для вимірювання і контролю питомого електричного опору та діаметра циліндричних немагнітних токопроводів, відносної діелектричної проникності, питомого електричного опору та рівня трансформаторного масла в робочому резервуарі, а з другого – оптимізації числа параметрів при збереженні максимальної вірогідності багатопараметрового контролю в умовах реальної експлуатації енергетичного обладнання.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконана в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут”. Основний зміст ро-

боти складають результати досліджень, що проводилися здобувачем, як науковим керівником у госпдоговірних і держбюджетних роботах:

- госпдоговорна тема №55/17/2 “Разработка методики контроля диэлектрических характеристик трансформаторного масла в высоковольтных вводах” між Харківським регіональним НТО енергетиків і електротехніків України і ДАЕК “Харківобленерго”;
- держбюджетна тема “Розробка системи безперервного контролю внутрішньої ізоляції обладнання об’єктів електричних систем” (план прикладних робіт МОН України №ДР 0100U001673);
- госпдоговірна тема №37669/66 “Совершенствование устройства для непрерывного контроля внутренней изоляции конденсаторного типа путём повышения чувствительности за счет учета тока влияния” між Харківським Державним політехнічним інститутом і Північною електроенергетичною системою НЕК “Укренерго”.
- госпдоговір №37927 “Разработка и создание устройства для контроля и анализа состояния изоляции высоковольтных маслонаполненных вводов герметичного исполнения 110 кВ в сетях АК “Луганскоблэнерго”” між Харківським Державним політехнічним інститутом і акціонерною компанією “Луганськобленерго”.
- держбюджетна тема “Розробка теоретичних засад створення інформаційно – діагностичного комплексу для контролю ізоляції об’єктів електроенергетичної системи” (план прикладних робіт МОН України №ДР 0103U001521).

**Мета і задачі досліджень.** Метою дисертаційної роботи є розробка багатофункціональних електричних і електромагнітних методів для технологічного та експлуатаційного неруйнівного контролю електричних і геометричних параметрів провідникових циліндричних немагнітних виробів та рідинних ізоляційних матеріалів енергетичного устаткування на основі використання багатопараметрових електромагнітних і електроємнісних перетворювачів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- визначити елементи і матеріали, які є складовими енергетичного устаткування і контроль показників якості яких, міг би дати найбільш повну інформацію про стан об’єкта контролю;
- розробити багатофункціональний електромагнітний метод для одночасного контролю радіуса (діаметра) і питомого електричного опору циліндричних немагнітних провідників (мідних і алюмінієвих), що є елементами енергетичного устаткування;
- створити на базі розроблюваного електромагнітного методу двохпараметрові вимірювальні перетворювачі для одночасного контролю електричних і геометричних параметрів циліндричних провідникових матеріалів;

- розробити метод електричного неруйнівного контролю з використанням електроємнісних перетворювачів для одночасного контролю відносної діелектричної проникності, питомого електричного опору і рівня трансформаторного масла в робочому резервуарі;

- використати узагальнені конструктивні параметри математичних моделей багатофункціонального перетворення для цілей спрощення технологічних процесів виробництва серії однакових по електричним характеристикам електроємнісних перетворювачів;

- розробити і дослідити методики розрахунку очікуваних значень складових інформаційних сигналів електромагнітних і електроємнісних перетворювачів при контролі ними електричних і геометричних параметрів виробів;

- запропонувати методику розрахунку похибок вимірів декількох параметрів електроємнісними і електромагнітними перетворювачами й встановити раціональні по похибкам і чутливості режими роботи зазначених перетворювачів;

- розробити теоретичні основи методу непрямого неруйнівного контролю температури трансформаторного масла, заповнюючого трубопровод маслonaповненого устаткування, по температурі матеріала трубопровода і створити вихрострумний електромагнітний перетворювач температури;

- створити методику обробки багатопараметрової вимірювальної інформації для цілей контролю технічного стану елементів і матеріалів діючого енергетичного устаткування, урахувавши дані багаторічних профілактичних випробувань та результатів багатопараметрового контролю з використанням розроблених перетворювачів;

- розробити структурні схеми автоматизованих установок для багатопараметрового контролю на основі розроблених вимірювальних пристроїв і методів багатофункціонального непрямого виміру параметрів елементів та матеріалів, забезпечуючих вимагаєму вірогідність контролю, виходячи з конкретних значень рівня дефектності виробництва, похибок багатопараметрових перетворювачів та ризиків замовника і виготовлювача.

*Об'єкт дослідження* - це процес проникнення електромагнітного поля в діелектричні та струмопровідні матеріали, а також фізичні процеси взаємодії цих матеріалів і електричних сигналів електроємнісних і електромагнітних перетворювачів.

*Предметом дослідження* є багатопараметрові перетворювачі для неруйнівного контролю електричних, геометричних і вагогабаритних параметрів трансформаторного масла, а також струмопровідних циліндричних немагнітних виробів і методи оптимальної обробки багатопараметрової інформації.

*Методи дослідження.* Для вирішення задач дисертації і досягнення поставленої мети використаний теоретичний аналіз фізичних моделей електромагнітного перетворення контрольованих параметрів у сигнали вимірювальної інформації з застосуванням рівнянь Максвелла, Бесселя,

функцій Кельвіна, електродинаміки суцільних середовищ, теорії електромагнітного поля, а також методів інтегрального і диференціального обчислення, теорії рядів і функцій комплексної змінної. Для математичного моделювання процесів старіння масла і створення оптимальних процедур оцінки його поточного стану, застосовані методи регресійного прикладного статистичного аналізу лінійних одномірних і багатомірних моделей контролю і прогнозування випадкових процесів старіння.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Запропоновано комплексний підхід у рішенні проблеми підвищення надійності і ефективності експлуатуемого устаткування, що дозволяє з огляду на якість комплектуючих матеріалів, як на стадії виробництва, так і в процесі їх експлуатації, приймати рішення про якість енергетичного устаткування, а також прогнозувати його ресурс.
2. Вибраний та науково обґрунтований перелік матеріалів і елементів відповідальних за надійність функціонування енергетичного устаткування.
3. Розроблено метод електромагнітного неруйнівного контролю і проведені дослідження контактних і безконтактних електромагнітних перетворювачів для одночасного визначення радіуса (діаметра) і питомого електричного опору циліндричних немагнітних провідникових виробів.
4. Запропоновано спеціальну конструкцію багатопараметрового електроємнісного перетворювача і розроблено метод електричного одночасного контролю відносної діелектричної проникності, питомого електричного опору і рівня трансформаторного масла в робочому резервуарі.
5. Отримані узагальнені конструктивні параметри електроємнісних перетворювачів, які дозволяють спростити технологічний контроль виготовлення серії однотипних по електричним та метрологічним характеристикам перетворювачів.
6. Розроблено метод і пристрій на основі вихорострумове перетворювача для контролю температури трансформаторного масла, циркулюючого в тонкостінних трубопроводах, маслonaповненого устаткування.
7. Запропоновані методики розрахунку функціональних характеристик і похибок виміру розроблених багатопараметрових вимірювальних перетворювачів для контролю електричних і геометричних параметрів металевих і ізоляційних матеріалів.
8. Створені статистично обґрунтовані алгоритми і процедури обробки багатопараметрової вимірювальної інформації на прикладі результатів багаторічних профілактичних випробувань (до 39 років) трансформаторного масла високовольтних трансформаторів, для цілей технологічного і профілактичного контролю діючого енергетичного устаткування з видачею рекомендацій про його реальну якість.
9. Розроблено методологічні основи побудови функціональних структурних схем автоматизованих установок багатофункціонального неруйнівного контролю на основі досліджених

електромагнітних і електроємнісних багатопараметрових перетворювачів. Запропонована методика оцінки нижньої границі числа багаторазових вимірів контрольованих параметрів, для забезпечення потрібної вірогідності, виходячі з конкретних параметрів промислового виробництва та розроблених перетворювачів.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в комплексному контролі якості вироблених матеріалів і елементів енергетичного устаткування, а також підвищенні надійності і ефективності експлуатаційного маслonaповненого устаткування. Практичною основою для досягнення цієї мети є розроблені методи комплексного електричного і електромагнітного неруйнівного контролю, технічні засоби у вигляді багатопараметрових функціональних вимірювальних пристроїв, а також процедури обробки багатопараметрової інформації для профілактичного експлуатаційного контролю діючого високовольтного маслonaповненого устаткування.

Практичне застосування отриманих результатів полягає в наступному:

1. Отримані електрофізичні моделі процесів електромагнітного перетворення електричних і неелектричних параметрів контролю в сигнали вимірювальної інформації, які дозволили розрахувати функціональні характеристики первинних багатопараметрових електромагнітних перетворювачів, що дають можливість проектувати установки з використанням: контактного електромагнітного перетворювача; безконтактного прохідного трансформаторного електромагнітного перетворювача, що створює повздовжнє зондувальне магнітне поле і безконтактного електромагнітного перетворювача, складовою частиною якого є котушки Гельмгольца, що створюють поперечне магнітне поле і розташовані в ньому і поблизу виробу, вимірювальної котушки, для спільного контролю радіуса (діаметра) і питомого електричного опору циліндричних немагнітних виробів, а також трансформаторного вихорострумowego перетворювача для виміру температури рідини, що знаходиться в металевій трубі.

2. Розроблені багатопараметрові електроємнісні перетворювачі і схеми їхнього включення можуть бути використані при проектуванні установок для контролю електричних і вагогабаритних параметрів трансформаторного масла.

3. Основні наукові розробки електромагнітних перетворювачів знайшли своє застосування на підприємстві ЗАТ “Південкабель”; багатofункційний метод неруйнівного контролю на базі багатопараметрового електроємнісного перетворювача впроваджений ДАК “Харківобленерго” та Північною електроенергетичною системою НЕК “Укренерго”.

4. Трансформаторний електромагнітний перетворювач температури пройшов випробування в складі установки з очищення та регенерації трансформаторного масла і був рекомендований для використання в складі таких же установок у АТ “НМУ Електропівденмонтаж”.

5. Результати роботи впроваджені здобувачем у навчальний процес на кафедрах НТУ “ХП” за спеціальностями 7.090903 – “Прилади і системи неруйнівного контролю” та 7.090602 –

“Електричні системи і мережі”, і зокрема за новою спеціалізацією “Технічна діагностика устаткування електричних мереж”.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові положення і результати представлені в дисертаційній роботі, отримані здобувачем особисто. Їм запропонований:

- науковий підхід у вирішенні задачі підвищення якості, надійності і ефективності функціонування експлуатуємого енергетичного устаткування, зокрема в основу аналізу для досягнення поставленої мети вибрані найбільш відповідальні (життєзабезпечуючі) елементи цього устаткування;
- комплекс електрофізичних та математичних моделей багатопараметрових перетворювачів, що спрощують зв'язок сигналів розроблених перетворювачів з параметрами контрольованих виробів;
- метод багатфункційного контролю на основі багатопараметрового електроємнісного перетворювача для одночасного виміру трьох параметрів трансформаторного масла;
- методика та проведені розрахунки відносних похибок вимірювань контролюємих параметрів розробленими перетворювачами та вибрані найбільш раціональні режими роботи таких перетворювачів;
- метод непрямих вимірів температури трансформаторного масла, заповнюючого тонкостінні трубопроводи та експериментальне метрологічне дослідження створеного електромагнітного перетворювача температури;
- методику обробки багатопараметрової інформації та формування висновків про якість трансформаторного масла в процесі експлуатації в маслонаповненому устаткуванні.

Особистий внесок у наукових працях, опублікованих у співавторстві, приведений у списку публікацій в авторефераті.

**Апробація результатів дисертації.** Представлені в дисертації результати досліджень доповідались на наукових конференціях, серед яких: Силова електроніка і енергоефективність. (Крим, Алушта. 1998 – 2003р.); Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. (Крим, Алушта. 1998р.); 15 Російська науково – технічна конференція “Неразрушающий контроль и диагностика” (Москва. 1999р.); Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я (Харків, НТУ “ХПІ”, 1993, 1996, 1998 – 2003р.); Третя промислова конференція з міжнародною участю “Ефективність реалізації наукового потенціалу в сучасних умовах” (Карпати, с. Славське, 2003р.); четверта Національна науково – технічна конференція “ Неруйнівний контроль та технічна діагностика” (Київ, 2003р.).

**Публікації.** Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 37 роботах, з яких 26 - видані в наукових журналах, 10 - у збірниках праць наукових конференцій і в 1 патенті України.



**Обсяг і структура роботи.** Дисертація складається зі вступу, 7 розділів, загальних висновків і рекомендацій, списку використаних джерел і трьох додатків. Повний обсяг дисертації складає 450 сторінок. Робота містить 14 ілюстрацій до тексту, 41 ілюстрацію на 29 сторінках; 20 таблиць до тексту, 16 таблиць на 14 сторінках; списку використаних джерел із 320 найменувань на 32 сторінках; 3 додатки на 113 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації складає 265 сторінок.

### **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.**

**У вступній частині** обгрунтовано актуальність і новизну теми, дано загальну характеристику роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, наведено основні напрямки розв'язання завдань, показано положення, що визначають наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, а також їх впровадження.

**У першому розділі** проаналізовані відомі методи, які знайшли найбільше впровадження в енергетичній промисловості і мають на виході первинного перетворювача електричний сигнал та пристрої одно – та багатопараметрового неруйнівного контролю електротехнічних матеріалів та виробів.

Показано, що електромагнітний контроль, в тому числі багатопараметровий, отримав в останній час найбільш широкий розвиток та впровадження в області досліджень матеріалів та виробів у гармонійних та імпульсних полях. Це пов'язано з його універсальністю, широкими функціональними можливостями, в тому числі, контролю без контакту з об'єктом контролю та слабкої залежності від багатьох зовнішніх чинників, таких, наприклад, як тиск, вологість, висока температура, забрудненість, як об'єкта контролю так і навколишнього середовища та інше. Можливості застосування цього виду контролю показані лише на феромагнітних виробках, стосовно структури та геометричних параметрів хоча має перспективи і в дефектоскопії. Більш широке використання цього виду контролю методів в промисловості гальмується недосконалістю використання способів обробки багатомірних сигналів та їх апаратурної реалізації.

Електричний багатопараметровий контроль поданий в сучасній літературі значно гірше ніж електромагнітний. Визначається, що для виміру електричних та геометричних параметрів твердих та сипучих матеріалів, а також їх вологості, найчастіше використовуються накладні електроємні перетворювачі, основним недоліком яких, є вплив неоднорідності, яку створює електричне поле перетворювача, на його чутливість. Але головним недоліком таких перетворювачів є низька інформативність сигналу вимірювальної інформації.

Методи та засоби магнітного контролю дозволяють на основі аналізу взаємодії зовнішнього магнітного поля з контролюємим феромагнітним виробом виявляти дефекти, вимірювати товщину магнітних і слабomagнітних покриттів на феромагнітній основі та визначати фізико – механічні властивості цих виробів. Всі ці задачі широко присутні в металургійній та в металообробній промисловості, а також частково в інших галузях. Так як точність, чутливість, швидкодія магнітного

контролю залежить від магнітних характеристик контролюемого зразка, то це в сукупності і визначає використання даного виду контролю. Інформація про багатопараметрові методи магнітного контролю в літературі практично відсутня.

На основі проведеного системного аналізу основних напрямків досліджень, було констатовано, що найбільш ушкоджуваним обладнанням серед основного устаткування енергосистеми є силові трансформатори 110кВ, причинами технологічних порушень основних вузлів яких, найчастіше бувають дефекти виготовлення обмоток, старіння ізоляції та порушення правил експлуатації.

Причинами технологічних порушень на лініях електропередачі дуже часто бувають підвищені механічні навантаження за рахунок вітру та ожеледиці, що призводять до залишкових змін електричного опору токопроводів повітряних ліній.

Тому, в якості досліджуваних елементів і матеріалів, які є складовими основного енергетичного устаткування, в тому числі, ліній електропередач і контроль показників якості яких, може дати найбільш повну інформацію, про стан устаткування, були вибрані циліндричні провідникові немагнітні елементи та трансформаторне масло. Найбільш привабливими для контролю електричних та геометричних параметрів вибраних елементів та матеріалів є електромагнітні та електричні методи контролю.

**Другий розділ** присвячено розробці двохпараметрового методу контролю радіуса ( $a$ ) та питомого електричного опору ( $\rho$ ) провідникових немагнітних циліндричних виробів та контактного електромагнітного перетворювача, яким має бути сам контрольований виріб.

Актуальність застосування багатofункціонального електромагнітного методу контролю провідникових циліндричних виробів зумовлена складністю функціональних зв'язків між параметрами виробу та сигналами перетворювача. Рішення цього питання базується на використанні функцій Бесселя і Кельвіна відносно раніше отриманого виразу комплексного опору, на основі якого, після деяких перетворень були введені нормовані значення електричного опору-  $R_n = R/R_0$  та внутрішньої індуктивності -  $L_{in} = L_i / L_0$ , де:  $R$  - активний опір провідника при  $f > 0$ ;  $R_0$  та  $L_0$  - активний опір і індуктивність провідника, відповідно, при  $f=0$ ;  $L_i$  – внутрішня індуктивність.

Розраховані залежності нормованих значень  $R_n$  та  $L_{in}$  від узагальненого безрозмірного параметра  $x$  (див.табл.1), були використані, як універсальні функції перетворення, що зв'язують електричні сигнали перетворювача з контролюємими параметрами циліндричного виробу, у вигляді графічних залежностей чи масива значень.

Таблиця 1

Залежність  $R_n$  та  $L_{in}$  від  $x$ .

| $x$ | $R_n$  | $L_{in}$ |   |        |       |
|-----|--------|----------|---|--------|-------|
| 1   | 1.0056 | 0.997    | 3 | 1.3184 | 0.845 |
| 2   | 1.0783 | 0.961    | 4 | 1.678  | 0.686 |
|     |        |          | 5 | 2.043  | 0.555 |

| $x$ | $R_n$  | $L_{in}$ |
|-----|--------|----------|
| 6   | 2.394  | 0.465    |
| 7   | 2.7435 | 0.4      |

|    |        |        |
|----|--------|--------|
| 8  | 3.0948 | 0.351  |
| 9  | 3.4467 | 0.3125 |
| 10 | 3.801  | 0.271  |

де  $x$  – узагальнений параметр,  $x = a\sqrt{2\pi\mu_0 f / \rho}$ ;

$a$  – радіус циліндричного виробу.

Для оптимального вибору вимірювальних приладів дослідної установки та теоретичного аналізу похибок вимірювання був проведений розрахунок очікуваних значень компонентів сигналів двохпараметрового контактного електромагнітного перетворювача (КЕМП), що є характерним для етапу проектування.

Розрахунки проводились на прикладі стандартних зрізів алюмінієвих проводів А.16, А.50 та А.120. Отримані результати розрахунків сумарної індуктивності  $L_\Sigma$  свідчать, що при зростанні узагальненого параметра  $x$ ,  $L_\Sigma$  буде спадаючою в той час, як електричний опір зростає для використаних циліндричних виробів, як з ростом їх довжини так і з ростом частоти зміни поля.

Для реалізації методу вимірювання радіуса і питомого електричного опору, уздовж досліджуваного немагнітного циліндричного виробу, зі своїми значеннями  $R$  та  $L$  і який одночасно є і первинним перетворювачем, пропускали змінний струм  $I$  фіксованої частоти і вимірювали на кінцях виробу падіння напруги  $U_n$  та фазовий кут  $\varphi$  між струмом і цією напругою (див.рис.1).

Розрахувавши послідовно активний та індуктивний опір визначили радіус:

$$a = \frac{2l}{\frac{2\pi L_e}{e^{\mu_0 l}} + 1}, \quad (1)$$

а потім враховуючи вираз узагальненого параметра  $x$  знаходять значення питомого електричного опору:

$$\rho = 2\pi a^2 \mu_0 f / x^2. \quad (2)$$

### Рис.1. Принципова схема включення

#### КЕМП для контролю $a$ і $\rho$ .

Використовуючи методику підсумовування похибок опосередкованих та сукупних вимірів був проведений аналіз похибок вимірів радіуса та питомого електричного опору немагнітних циліндричних виробів.

Вираз для визначення радіуса провідника КЕМП був записаний, як відносна похибка, через частинні похибки опосередкованих вимірів при участі всіх складових, які входили в цей вираз. Кінцевий вираз для розрахунку похибок вимірів радіуса та питомого електричного опору, при довірчій ймовірності 0,95, має вигляд:

$$\gamma_\alpha = 1.1 \sqrt{\left[ (A - A_{L_i}) \gamma_l \right]^2 + \left( A_{L_\Sigma} \cdot \gamma_{L_\Sigma} \right)^2 + \left( A_{L_i} \cdot B \cdot \gamma_R \right)^2 + \left( A_{L_i} \cdot B \cdot \gamma_{R_o} \right)^2}, \quad (3)$$

де  $\gamma_a = \frac{\delta a}{a}$ ;  $\gamma_l = \frac{\delta l}{l}$ ;  $\gamma_{L_\Sigma} = \frac{\delta L_\Sigma}{L_\Sigma}$ ;  $\gamma_R = \frac{\delta R}{R}$ ;  $\gamma_{R_0} = \frac{\delta R_0}{R_0}$  - відносні похибки величин позначу-

ваних відповідними індексами;

в той час як:

$$\gamma_\rho = 1.1 \sqrt{\left[2(A - A_{L_i})\gamma_l\right]^2 + \left(2A_{L_\Sigma} \cdot \gamma_{L_\Sigma}\right)^2 + \left(2A_{L_i} \cdot B \cdot \gamma_R\right)^2 + \left(2A_{L_i} \cdot B \cdot \gamma_{R_0}\right)^2 + \left(2C \cdot \gamma_{R_H}\right)^2}, \quad (4)$$

де  $\gamma_\rho = \frac{\delta \rho}{\rho}$ ;  $\gamma_l = \frac{\delta l}{l}$ ;  $\gamma_{R_H} = \frac{\delta R_H}{R_H}$ ;

$A$ ,  $A_{L_i}$ ,  $A_{L_\Sigma}$ ,  $B$  і  $C$  – коефіцієнти впливу, які визначаються, як частинні похідні за змінними

параметрами і є досить складними функціями параметрів математичної моделі перетворювача.

Залежність відносних похибок вимірів радіусу та питомого електричного опору від узагальненого параметра  $x$  дозволяє встановити раціональний режим роботи КЕМП для вибраних провідникових немагнітних виробів, який лежить в діапазоні  $2 \leq x \leq 4$ , де відносна похибка виміру радіуса не перевищує 3% в той час як питомого електричного опору – 5% (див.рис.2.)

При збільшенні довжини виробу ( $l$ ) відносні похибки виміру  $\gamma_a$  і  $\gamma_\rho$  мають незначний приріст в той час, як зростання діаметру, призводить до зниження похибки вимірів, оскільки абсолютна похибка практично не змінюється.

Результатом проведених досліджень контактного електромагнітного перетворювача на прикладі контролю  $a$  і  $\rho$  немагнітних провідникових циліндричних

них виробів була розглянута теорія роботи таких перетворювачів, отримані точні та наближені вирази для визначення нормованих значень активного опору і питомої внутрішньої електричної індуктивності виробу, побудовані універсальні функції перетворень, створена методика розрахунків очікуваних значень сигналів КЕМП, розроблені схеми включення такого перетворювача для

**Рис.2. Залежність  $\gamma_a = f(x)$  (позн.-1)**

виміру двох параметрів контролюємого виробу,

**$\gamma_\rho = f(x)$  (позн.-2) від узагальненого** отримані вирази для оцінки похибок вимірювань  $a$  і **параметра  $x$  при  $l=1\text{м}$  та  $a=2.55 \cdot 10^{-3}\text{м}$ .**  $\rho$  та оптимальні діапазони вимірів двох параметрів.

**Третій розділ** присвячено розробці методів та перетворювачів для без-контактного електромагнітного контролю діаметра та питомого електричного опору циліндричних немагнітних токопроводів у полях різної орієнтації. Такі токопроводи можуть мати різну конструкцію, відносно кріплення з кінців.

Запропонований найбільш придатний для контролю діаметра ( $d$ ) і питомого електричного опору ( $\rho$ ) *токопровода з вільним доступом, хоча б до одного кінця*, трансформаторний електромагнітний перетворю-

вач (ТЕМП), типова конструкція якого представлена на рис.3.

Для спрощення залежностей, між параметрами контрольованого виробу і характеристиками то-

**Рис.3. ТЕМП з циліндричним**

**копроводом (1.– намагнічуюча**

електричного ланцюга перетворювача, введено **катушка;**

**2.– вимірювальна катушка 3 – виріб).**

безрозмірну комплексну величину  $N$ , що зв'язує вихідні

електричні сигнали, геометричні розміри перетворювача і виробу та встановлено універсальні залежності амплітуди і фази цієї величини від узагальненого параметра ( $\mu_r \cong 1$ ).

$$|N| = \frac{E_{вн}}{E_0 \eta} = \sqrt{(1 - \operatorname{Re} \dot{K})^2 + (\operatorname{Im} \dot{K})^2} \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{вн} = \frac{\operatorname{Im} \dot{K}}{1 - \operatorname{Re} \dot{K}} \quad (6)$$

де  $\operatorname{Re} \dot{K} = \dot{K} \cos \varphi$ ;  $\operatorname{Im} \dot{K} = \dot{K} \sin \varphi$  – дійсна і уявна частини спеціального комплексного пара-

метра  $\dot{K}$ ,  $|\dot{K}| = \frac{2}{x} \sqrt{\frac{\operatorname{ber}_1^2 x + \operatorname{bei}_1^2 x}{\operatorname{ber}_0^2 x + \operatorname{bei}_0^2 x}}$ ;

$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{Im} \dot{K} / \operatorname{Re} \dot{K}$  – фазовий кут зсуву між магнітними потоками в середині виробу та зовні;

$E_{вн}$  і  $E_0$  – внесена ЕРС і ЕРС ТЕМП без виробу;

$\varphi_{вн}$  – фазовий кут зсуву  $E_{вн}$  стосовно  $E_0$ ;

$\eta$ -коефіцієнт заповнення ТЕМП виробом,  $\eta = d^2/dl^2 - d$  і  $d_l$  – діаметри виробу і вимірювальної обмотки ТЕМП відповідно;

$\operatorname{ber}_1 x$ ,  $\operatorname{bei}_1 x$ ,  $\operatorname{ber}_0 x$  і  $\operatorname{bei}_0 x$  – функції Кельвіна першого та нульового порядку.

Використавши перегини на отриманих залежностях  $N = f(x)$  і  $|\varphi_{вн}| = f(x)$  для визначення екстремумів, і використавши лише одне значення на двох функціях перетворення (амплітудний або фазовий метод), визначають контрольні параметри  $d$  і  $\rho$  токопроводу.

Результати диференціювання показали, що максимальні значення чутливостей  $S_N$  і  $S_\varphi$  настають при  $x_{1opt} = 1,62$ , що відповідає  $N_1 = 0,2991$  і  $S_N = 0,3071$  та  $x_{2opt} = 1,81$ , з  $N_2 = 0,35704$  і  $S_\varphi = 25,8986$ , відповідно. Дійсно, похідну  $dN/dx$  можна представити як:

$$S_N = \frac{dN}{dx} = \frac{\sqrt{f}}{C_1} \frac{dE_{вн}^*}{df}, \quad (7)$$

а похідну  $d\varphi_{вн}/dx$  запишемо:

$$S_\varphi = \frac{d\varphi_{вн}}{dx} = \frac{\sqrt{f}}{C_2} \frac{d\varphi_{вн}}{df}, \quad (8)$$

де  $dE_{\text{вн}}^*/df$  – похідна нормованої внесеної ЕРС  $E_{\text{вн}}^*$  - по частоті  $f$ ,  $E_{\text{вн}}^* = E_{\text{вн}}/E_0$ ;

$d\varphi_{\text{вн}}/df$  – похідна кута  $\varphi_{\text{вн}}$  по частоті  $f$ ;

$C_1$  і  $C_2$  – постійний для конкретного виробу коефіцієнт.

Використавши проведені розрахунки, вирази (7) та (8) при реєстрації оптимальних значень  $E_{\text{вн}}$  і  $\varphi_{\text{вн}}$  в амплітудному або фазовому методі, визначають:

$$\text{діаметр виробу: } d = d_{\Pi} \sqrt{\frac{E_{\text{вн}}}{E_0 N}} = d_{\Pi} \sqrt{\frac{E_{\text{вн}}^*}{N}}$$

та питомий електричний опір:

послідовний цикл

$$\rho = \frac{\pi \mu_0 f d^2}{2x^2};$$

паралельний цикл

$$\rho = \frac{\pi \mu_0 f d_u E_{\text{вн}}^*}{2x^2 N}.$$

Для оцінки ефективності безконтактного методу контролю циліндричних виробів, що мають доступ з одного кінця, був проведений розрахунок очікуваних значень сигналів перетворювача з виробом.

Як показали розрахунки, проведені для трьох значень радіусів виробів, виготовлених з міді і алюмінію, значення внесеної ЕРС  $E_{\text{вн}}$  тим помітніше з ростом узагальненого параметра  $x$ , чим більше коефіцієнт заповнення перетворювача і знаходяться поблизу 1В. Зміна фазового кута  $\varphi_{\text{вн}}$  спостерігається лише в області малих значень  $x$ . При значеннях  $x \geq 4$ ,  $\varphi_{\text{вн}}$  змінюється дуже мало і для всіх  $x$  практично не залежить від радіуса.

Для перевірки запропонованого методу одночасного контролю діаметра і питомого електричного опору немагнітних циліндричних виробів були проведені експерименти за схемою представленою на рис. 4. У схемі використані два ідентичних перетворювача, робочий (РП) та компенсаційний (КП). Вимірювальні прилади в схемі, особливо їхні межі вимірів та клас точності, вибиралися з урахуванням проведеного розрахунку очікуваних значень сигналів перетворювача.

Схема дозволяє при фіксованій частоті та при внесеному в РП циліндричному виробі  $B$ , реєструвати вольтметром  $V$  внесену ЕРС –  $E_{\text{вн}}$ , фазометром  $\Phi$  – фазовий кут -  $\varphi_{\text{вн}}$  та ЕРС –  $E_0$  в залежності від вибраного методу контролю.

Максимальні відносні похибки вимірів  $d$  і  $\rho$  не перевищують 2% і 4% відповідно.

**Рис. 4. Схема спільного виміру радіуса і питомого електричного опору циліндричних виробів.**

Контроль токопроводів, доступ до кінців яких неможливий, був проведений з використанням перетворювача з поперечним зондувальним магнітним полем, з робочими котушками Гельмгольца (КГР) (див.рис.5), які і забезпечували однорідність поля в якому знаходився зразок ( $B$ ) та вимірювальна котушка (ВК).

Метод виміру діаметра і питомого електричного опору в поперечному зондувальному магнітному полі базувався також на спрощенні процесу аналізу режимів такого перетворювача, введенням безрозмірної комплексної величини  $\dot{N}$ , що виражає собою питому внесену ЕРС вимірювальної котушки, яку отримали, як різницю між ЕРС ВК в КГР та ВК в перетворювачі без виробу, значення модуля і фази якої, дозволили отримати універсальні функції перетворення  $N = f(x)$  та  $\varphi_{вн} = f(x)$ .

Використовуючи отримані залежності, а також виміряні значення  $E_{вн}$ ,  $\varphi_{вн}$  і відомі геометричні параметри перетворювача, був встановлений алгоритм вимірювальних та розрахункових процедур для одночасного контролю  $d$  і  $\rho$  циліндричних токопроводів

**Рис. 5. Схематичний пристрій**

та

**електромагнітного перетворювача з поперечним магнітним полем. круглої ВК**

$$d = d_2 \sqrt{\frac{E_{вн}}{2E_0|N|} \frac{1}{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + a_2^2 / X_0^2}}\right]}};$$

$$\rho = \frac{\pi\mu_0 d^2 f}{4x^2} \frac{E_{вн}}{E_0|N|} \frac{1}{\left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + a_2^2 / X_0^2}}\right]};$$

Вирази для отримання значень діаметра

питомого електричного опору за умов використання: прямокутної ВК (при співпаданні вісі ВК з віссю виробу)

$$d = 2X_0 \sqrt{\frac{E_{вн}}{2E_0|N|} \left(1 + \frac{z^2}{X_0^2}\right)};$$

$$\rho = \frac{2\pi\mu_0 f x_0^2}{x^2} \frac{E_{вн}}{E_0|N|} \left(1 + \frac{z^2}{X_0^2}\right).$$

Для перевірки обраного фазового екстремального методу контролю з використанням поперечного зондувального магнітного поля були проведені експерименти з використанням перетворювача на основі котушок Гельмгольца.

Проведений аналіз похибок непрямих і сукупних вимірів діаметра і питомого електричного опору циліндричних немагнітних токопроводів, використовуючи методику підсумовування цих похибок, дав вирази для розрахунку відносних похибок виміру  $d$  і  $\rho$ , при використанні попереч-

ного зондувального поля з круглою та прямокутною ВК, які мають подібну форму запису, як і раніше отримані, але зі своїми коефіцієнтами впливу:

$$C_d = \frac{1}{2} \frac{(\partial N / \partial \varphi) \varphi_{вн}}{N}; \quad C_{\varphi_{вн}} = \frac{1}{2} \frac{\partial N}{\partial \varphi_{вн}} \frac{\partial \varphi_{вн}}{N};$$

$$C_{a_2} = - \frac{a_2^2}{2X_0^2 \left(1 - \frac{1}{1 + a_2^2 / X_0^2}\right) \sqrt{(1 + a_2^2 / X_0^2)^3}}; \quad C_{X_0} = \frac{X_0^2}{X_0^2 + z^2};$$

$$C_{x_0} = - \frac{a_2^2}{2X_0^2 \left(1 - \frac{1}{1 + a_2^2 / X_0^2}\right) \sqrt{(1 + a_2^2 / X_0^2)^3}}; \quad C_z = \frac{z^2}{X_0^2 + z^2};$$

$$C_\rho = \frac{2(\partial x / \partial \varphi_{вн}) \varphi_{вн}}{x},$$

де  $a_2$ ,  $X_0$  і  $z$  – геометричні розміри перетворювача.

Аналізуючи графічні залежності  $\gamma_d = f(x)$  і  $\gamma_\rho = f(x)$ , слід зазначити, що вони розташовані, в основному, в області низьких значень похибок. Так при  $x \geq 3$   $\gamma_d$  і  $\gamma_\rho$  слабо залежать від  $x$  і лежать поблизу 0,5 і 2,5% відповідно (рис.6). При  $x \leq 1$  похибки різко зростають у зв'язку з малою реакцією виробу на значне проникнення магнітного поля в зразок.

Таким чином, похибки  $\gamma_d$  і  $\gamma_\rho$  визначаються значенням  $x_{1онт}$  чи  $x_{2онт}$ , як для перетворювача з поздовжнім полем, так і з поперечним, і похибками вимірювальних приладів. Це підтверджує універсальність кривих  $\gamma_d = f(x)$  і  $\gamma_\rho = f(x)$  які при відповідних похибках вимірювальних приладів, можуть бути використані для визначення похибок виміру двох параметрів виробу з будь-якими значеннями  $d$  і  $\rho$ .

### Рис.6. Залежність $\gamma_\rho$ (1) і $\gamma_d$ (2)

ТЕМП від  $x$  (поздовжнє зондувальне поле).

**Четвертий розділ** присвячений розробці методу та створенню первинного вимірювального перетворювача для безконтактного контролю температури рідкого діелектрика, циркулюючого в трубопроводі.

Показано, що серед контактних и безконтактних первинних перетворювачів електричних термометрів для таких вимірів найбільш придатним є трансформаторний електромагнітний перетворювач (ТЕМП), тому що має високу параметричну надійність і стабільні метрологічні характеристики у часі.

Використавши тонкостінну трубу або зробивши вставку та одягнувши на неї ТЕМП і термоізолювавши перетворювач з частиною труби від навколишнього середовища, можна визначити температуру такої зони трубопроводу, а отже і температуру рідини в трубопроводі, так як темпе-



ратурний діапазон і градієнти температури малі, а постійна часу контрольованої температури велика.

Метод контролю температури рідини ( $t_p$ ) складається з виміру питомого електричного опору матеріалу ( $\rho$ ) труби за допомогою ТЕМП, а потім знаючи залежність  $\rho = f(t)$  визначають температуру труби ( $t_r$ ), а отже, і температуру рідини ( $t_p$ ) ( $t_r \approx t_p = t$ ).

Припустимо, що труба з маслом усередині перетворювача являє собою однофазне середовище (див.рис.3), хоча дійсно являє собою складний циліндр, зовнішній (труба) і внутрішній суцільний (рідина).

При використанні *низьких частот* зондувального магнітного поля ( $d/\delta \ll 1$  і  $d/a \ll 1$ , де  $d$  - товщина стінки труби;  $d = a - b$ ) запишемо вираз для модуля і фази результуючого магнітного потоку усередині труби:

$$\Phi_{23} = \pi a b \mu_0 H_0 \left[ 1 + 2(\mu_r - 1) \frac{d}{2} \right] / \sqrt{1 + \frac{db}{\delta^2}} ; \quad \text{tg } \varphi_{23} = \frac{db}{\delta 2\mu_r} ,$$

де  $H_0$  - напруженість зовнішнього магнітного поля, що пронизує круговий перетин між зовнішньою поверхнею труби і вимірювальною обмоткою.

$\varphi_{23}$  - кут зрушення фаз між  $\Phi_{23}$  і  $H_0$ .

$\mu_0$  - магнітна постійна,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

$\mu_r$  - відносна магнітна проникність матеріалу труби;

$a$  - зовнішній радіус труби;

$b$  - внутрішній радіус труби;

$\delta$  - класична глибина проникнення магнітного поля в стінку труби,  $\delta = \sqrt{\rho / \pi \mu_0 \mu_r \cdot f}$  ;

Оскільки модуль і фаза результуючого магнітного потоку  $\Phi_{23}$  визначається частотою поля намагнічуючої котушки і питомим електричним опором матеріалу труби, було одержано 2 варіанта рівнянь виміру реалізуючих:

$$t = \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \left[ \frac{E_{23}^2 \pi a b \mu_0 \mu_r f}{(N^2 - E_{23}^2) \rho_1} - 1 \right] + t_1 \quad \text{амплітудний метод} \quad \text{фазовий метод} \quad t = \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \left( \frac{\pi a b \mu_0 f}{\text{tg } \varphi_{23} \cdot \rho_1} - 1 \right) + t_1 ,$$

та

де  $E_{23}$  - вносима ЕРС (вихідний сигнал перетворювача);

$\alpha$  - температурний коефіцієнт опору матеріалу труби;

$\rho_1$  - питомий електричний опір матеріалу труби при нормальній температурі  $t_1$  (наприклад, при  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ).

Модель впливу  $t$  на  $\rho$  - приймалася лінійною.

Перевірка якості перетворювача температури на *низьких частотах* (80 Гц) була проведена на діючій модельній установці (див.рис.4) з трубою із феромагнітного матеріалу. Отримані ре-

зультати, виконані амплітудним методом, мають високу точність та високу чутливість перетворювача. Приведена похибка вимірів не перевищує 1%.

Реалізація фазового методу на низьких частотах була ускладнена через вимір дуже малих фазових кутів ЕРС перетворювача.

При використанні *високих частот* зондувального магнітного поля для виміру температури ( $d/\delta \geq 2$  і  $d/a \leq 1$ ), вираз для модуля і фази результуючого магнітного потоку був значно спрощений, а вираз для визначення температури амплітудним методом мав вигляд

$$t = \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \left( \frac{E_{23}^2}{4\pi^3 W_u^2 a^2 H_0^2 \mu_0 \mu_r f \rho_1} - 1 \right) + t_1,$$

в той час, як величина фазового кута  $\varphi_{23}$  не залежить від питомого електричного опору, а значить і від температури.

Проведені експериментальні дослідження на трубі із міді при частотах (17÷27)кГц показали більш низьку чутливість і точність результатів контролю, проте, при таких частотах вони практично не залежать від матеріала труби, хоча приведена похибка була також незначна ( $\gamma_n \cong 1\%$ ). Базовими характеристиками були функція перетворення і похибки по входу та по виходу з розкладенням останніх на адитивну та мультиплікативну складові.

Використовуючи стандартні методики розрахунку похибок по входу і по виходу, що залежать від смуги похибок, були отримані абсолютні та приведені похибки по входу і по виходу при різних температурах. Дослідження показали, що максимальна приведена похибка виміру температури в діапазоні (20÷130)<sup>0</sup>С практично не перевищує значення 1,6%.

**П'ятий розділ** присвячений розробці спеціальної конструкції багатопараметрового електроємнісного перетворювача і методу контролю електричних та вагогабаритних параметрів трансформаторного масла в робочому резервуарі.

Розробленим перетворювачем є система двох співвісних конденсаторів ( $C_1$  і  $C_2$ ), що створюють між їх електродами (1,2) електричне поле (див.рис.7), ізоляційним матеріалом якої, є досліджуваний зразок трансформаторного масла(3). Електроди такої системи конденсаторів, виконані в плоскому або коаксиальному варіантах, із міді, а внутрішні геометричні розміри забезпечуються діелектричними муфтами (4). Перетворювач занурений вертикально в контрольоване трансформаторне масло таким чином, що конденсатор  $C_1$  виявився цілком заповнений ним і розташований на деякій відстані -  $l_4$  від дна резервуара, а конденсатор  $C_2$  – частково, і його загальна ємність складається із ємності конденсатора в маслі  $C_2^M$  та в повітрі  $C_2^B$ . Така конструкція перетворювача дозволяє збільшити число контрольованих параметрів, що найменше до трьох.

Визначення трьох параметрів трансформаторного масла, що знаходиться в робочому резервуарі, проводились шляхом рішення системи трьох рівнянь, що зв'язують шукані параметри: відносну діелектрич-

ну проникність ( $\varepsilon_r$ ), питомий електричний опір ( $\rho$ ) та рівень трансформаторного масла ( $l$ ) в робочому резервуарі з вимірюваними електричними сигналами ємностей  $C_1$ ,  $C_2$  і електричного опору  $R_1$  ділянки трансформаторного масла, що знаходиться між пластинами конденсатора  $C_1$  для плоского та коаксіального перетворювача.

**Рис. 7. Схематичне зображення конструкції електроємнісного перетворювача.**

Доцільним буде вести диференційний контроль трансформаторного масла, тому як необхідною умовою тривалої та надійної роботи маслонаповненого устаткування буде незначна зміна його електричних параметрів  $\varepsilon$  і  $\rho$ , а обов'язковою умовою, яка забезпечує підтримку зміни електричних параметрів в допустимих межах, підтримання рівня масла-  $l$ , залитого в бак, майже незмінним, вимірюючи тільки приріст параметрів масла відносно параметрів еталонного зразка.

Диференційний контроль параметрів трансформаторного масла, в режимі послідовних вимірів з використанням досліджуваного і еталонного зразків за допомогою автоматизованого містка змінного струму при паралельній схемі заміщення як досліджуваного, так і еталонного зразків (схема відповідає конденсатору з великими втратами), дозволили провести розроблені електроємнісні перетворювачі.

Абсолютні зміни  $\delta\varepsilon_r$ ,  $\delta\rho$  і  $\delta l$ , викликані різницею  $\varepsilon_r$ ,  $\rho$  і  $l$  досліджуваного масла (ДМ) відносно  $\varepsilon_{r0}$ ,  $\rho_0$  і  $l_0$  зразкового масла (ЗМ). При цьому, приймаючи малі зміни параметрів, які є близькими до диференціалів відповідних величин, мають вигляд для:

плоского

$$\delta\varepsilon_r = \frac{\delta}{\varepsilon_0 l_1 a} \delta C_1; \quad \delta\rho = \frac{l_1 a}{\delta} \delta R_1; \quad ;$$

(9)

$$\delta l = \delta l_2 = \frac{l_1 \delta}{C_1 \delta - \varepsilon_0 l_1 a} \delta C_2 + \frac{\varepsilon_0 l_0 a \delta l_1}{C_1 \delta - \varepsilon_0 l_1 a} \delta C_1$$

(10)

коаксіального перетворювачів

$$\delta\varepsilon_r = \frac{\ln(d_1/d_2)}{2\pi\varepsilon_0 l_1} \delta C_1; \quad \delta\rho = \frac{2\pi l_1}{\ln(d_1/d_2)} \delta R_1;$$

(11)

$$\delta l = \frac{\ln(d_1/d_2)}{2\pi\epsilon_0(\epsilon_r - 1)} \delta C_2 + \frac{2\pi\epsilon_0 l_0 - C_2 \ln(d_1/d_2)}{2\pi\epsilon_0(\epsilon_r - 1)^2} \delta\epsilon_r,$$

(12)

де  $\delta C_1$  і  $\delta C_2$  – зміни ємностей  $C_1$  і  $C_2$ , викликані різницею ємностей  $C_1$  з ДМ від  $C_{10}$  перетворювача з ЗМ, тобто  $\delta C_1 = C_1 - C_{10}$  та  $\delta C_2 = C_2 - C_{20}$ ;

$\delta R_l$  – зміни опору діелектрика конденсатора  $C_1$  с ДМ по відношенню до опору діелектрика такого ж конденсатора з ЗМ, тобто  $\delta R_l = R_l - \delta R_{l0}$ .

Можливість організації оптимальним способом технологічного процесу виготовлення і передусім перевірки плоских та коаксіальних електроємнісних перетворювачів, замінивши дорогий метод електричних вимірів, простим та надійним методом вимірів його геометричних характеристик, була одержана після аналізу отриманих виразів абсолютних змін електричних параметрів. Встановлено, що спільним параметром (сталим коефіцієнтом) в рівняннях (9) для плоского електроємнісного перетворювача буде відношення  $\delta/l_1 a$ , яке можливо позначити, як конструктивний параметр –  $K_{II}$ . Щоб забезпечити задані точносні характеристики як перетворювача, так і методу контролю, досить забезпечити сталість конструктивного параметра  $K_{II} = \frac{\delta}{l_1 a}$ , для усіх виготов-

ляємих однотипних по електричним та метрологічним характеристикам плоских електроємнісних перетворювачів контролю, при одному і тому ж алгоритмі обробки результатів багатопараметрових вимірів (тобто забезпечити сталість функціонального зв'язку між абсолютними змінами  $\delta\epsilon_r$ ,  $\delta\rho$  та  $\delta l$ ).

Для коаксіального перетворювача в рівняннях (11) таким конструктивним параметром буде

$$K_K = \frac{\ln(d_1/d_2)}{2\pi \cdot l_1}.$$

З другого боку, в першу складову рівнянь (10) та (12) відокремлено входить величина  $l_1$ , яка вказує на незалежний вплив цього параметра на величину  $\delta l$ , що потребує більш точного контролю цього параметру при виготовленні електроємнісних перетворювачів. Оскільки остання задача може бути ускладненою, то абсолютні зміни  $\delta l$  можуть мати невелике відхилення для промислово виготовлених перетворювачів, що отримає відбиток на більш високій похибці виміру рівня трансформаторного масла.

Відносні зміни  $\delta\epsilon_r/\epsilon_{r0}$ ,  $\delta\rho/\rho_0$  і  $\delta l/l_0$ , які дозволяють більш точні виміри для параметрів, що змінюються дуже мало, були також отримані для розрахунків і використані для аналізу якості масла.

Одержані рівняння, для абсолютних та відносних змін параметрів трансформаторного масла, дозволяють отримати величини відхилень вимірів параметрів масел від нормативних значень та зробити висновок про якість контрольованого трансформаторного масла.

Для правильного вибору вимірювальних приладів електричної схеми вимірювальної установки і зниження похибок виміру електричних параметрів перетворювачів був проведений розрахунок очікуваних значень сигналів, обраних для контролю різного по якості масла плоским і коаксіальним електроємнісними первинними перетворювачами.

Отримані результати розрахунку дозволили синтезувати електричну схему установки на базі автоматичного цифрового містка змінного струму і провести виміри трьох зразків трансформаторного масла методом багаторазових вимірів. Дійсні значення електричних параметрів ( $\varepsilon_r$  і  $\rho$ ) зразків трансформаторного масла були отримані в ході незалежних вимірів еталонними засобами. З огляду на геометричні розміри плоского і коаксіального електроємнісних перетворювачів, а також їхнє положення щодо дна робочого резервуару, спостерігалися істотні зміни електричних параметрів убік їхнього погіршення, зі зниженням якості масла, у той час як рівень його залишався майже незмінним. Температура при якій проводилися виміри відповідала величині  $(20 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$ . Примітним було ще і те, що результати використання різних перетворювачів практично ніяк не позначилися на результатах контролю  $\varepsilon_r$ ,  $\rho$  і  $l$ .

В таблиці 2 подані результати оцінювання граничних значень похибок вимірювання електричних та геометричних контролюємих параметрів  $\varepsilon_r$ ,  $\rho$  і  $l$ . Рівень довірчої ймовірності отриманих результатів  $P = 0,95$ . Кількість вимірів по кожному параметру становила 30. Похибки виміру неелектричного параметра ( $l$  – рівня масла) подані для двох варіантів контролю ( без корегування та з корегуванням на зміну електричних параметрів  $\varepsilon_r$  і  $\rho$ , які вимірювались цим же перетворювачем). Спектр електричних параметрів трансформаторного масла задавався ступенем забруднення, взятого для контролю масла.

Таблиця 2.

### Граничні похибки вимірів $\varepsilon_r$ , $\rho$ і $l$ .

| Контролюємий параметр                                  | “Чисте”<br>масло (%) | Масло<br>“з домішками”(%) | Масло<br>“брак”(%) |
|--|----------------------|---------------------------|--------------------|
| $\varepsilon_r$  | $(0,68 \pm 0,02)$    | $(0,72 \pm 0,02)$         | $(0,82 \pm 0,03)$  |
| $\rho$   | $(0,7 \pm 0,01)$     | $(0,72 \pm 0,01)$         | $(0,74 \pm 0,01)$  |
| $l$ (з корекцією на виміри $\varepsilon_r$ і $\rho$ )  | $(1,0 \pm 0,25)$     | $(1,0 \pm 0,25)$          | $(1,0 \pm 0,25)$   |
| $l$ (без корекції на виміри $\varepsilon_r$ і $\rho$ ) | $(1,0 \pm 0,25)$     | $(3,1 \pm 1)$             | $(5,0 \pm 1)$      |

Можливість одночасного з електричними параметрами виміру геометричного  $l$ -рівня масла в резервуарі, дозволяє визначати, при необхідності, обсяг масла

$$V = \left( \frac{\pi d_p^2}{4} \right) l ;$$

та його вагу

$$p = \left( \frac{\pi d_p^2 q}{4} \right) l .$$

де  $d_p$  – діаметр резервуару;

$l$  – повний рівень масла,  $l = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$ ;

$q = 0,85 \cdot 10^3 \text{кГ/м}^3$  – питома вага масла.

Для визначення відносних похибок виміру величин  $\varepsilon_r$ ,  $\rho$  і  $l$ , а також і  $p$  і  $V$  трансформаторного масла була використана методика оцінки похибок непрямих вимірів.

Проведений аналіз похибок вимірів параметрів трансформаторного масла показав, що електричні параметри  $\varepsilon_r$  та  $\rho$  можливо вимірювати точніше (вони не перевищують 0,7%), а вагогабаритні параметри  $l$ ,  $p$  і  $V$ , мають значно більшу похибку вимірів і (лежать в межах (1,7 ÷ 5,8)%).

Таким чином, була показана практична можливість використання електроємнісних перетворювачів для багатопараметрового диференціального контролю трансформаторних масел.

Теоретичний аналіз математичних моделей утворення абсолютних змін контролюємих параметрів показав, що при серійному виробництві однотипних розроблених перетворювачів є можливість технологічного контролю узагальнюючих конструктивних параметрів  $K_{II}$  та  $K_K$ .

Розроблені електроємнісні вимірювальні перетворювачі дають можливість отримання багатомірних сигналів вимірювальної інформації, які дозволяють проводити багатопараметровий контроль технічного стану рідинних ізоляційних елементів енергетичного обладнання, як на етапі їх виготовлення, в складі автоматизованих установок контролю технологічних процесів так і для цілей профілактичного контролю на етапі експлуатації енергетичного устаткування (експрес – контролю).

**Шостий розділ** присвячений створенню статистичних процедур оцінювання впливу тривалості експлуатації на показники контролю та для практичного використання результатів багатопараметрового контролю в процесі профілактичних випробувань електрообладнання згідно норм ГKD 34.20.302. – 2002 Міністерства палива та енергетики України.

Серед значної кількості використовуємого в електроенергетичній системі маслonaповненого устаткування, трансформатори напругою 110кВ мають найбільшу інтенсивність відмовлень. Надійність такого складного об'єкту як трансформатор, визначається всім комплексом показників безвідмовності та ремонтпридатності, ураховуючих, як поточний наробок на відмовлення, так і ефективність технічного обслуговування. Тип відмовлення, в більшості залежить від тривалості експлуатації устаткування, коли поява раптових відмовлень більш характерна для періоду нормальної експлуатації (інтенсивність відмовлень  $\lambda = const$ ), а поступові, параметричні відмовлення з'являються, в основному, в період старіння (інтенсивність відмовлень буде зростаючою функцією  $\lambda(t)$  часу експлуатації) (див.рис.8).

Зважаючи на стан всіх експлуатуємих маслonaповнених трансформаторів і те, що їхня більшість відпрацювала визначений стандартом мінімальний термін – 25 років, то цікавим перед усім будуть параметричні відмови, які також можуть переходити в раптові.

**Рис. 8. Розподіл інтенсивності технологічних порушень в функції часу експлуатації (для МНУ) (за даними РАО ЕЭС Росії).**

Збільшення інтенсивності відмов за параметричною моделлю старіння, в першу чергу ізоляції, вимагає корегування міжпрофілактичних інтервалів, тобто потрібно підвищувати частоту обстеження ізоляції, по мірі зростання терміну її експлуатації, а також проведення заходів по випередженню відмов. Як видно по гістограмі (рис.8), в основі якої лежать реальні дані, інтенсивність відмов, практично лінійно зростає, зі збільшенням часу експлуатації, що підтверджує рівняння, одержане за допомогою параметричного оцінювання на базі закону Вейбулла.

$$\lambda(t) = 0,0032 t \text{ (1/ рік)}.$$

Така залежність характерна для енергетичного устаткування, у якого відбувається погіршення якості в міру його експлуатації. Отож, якщо представити в якості об'єкта контролю маслonaповнене обладнання, а в якості контролюємих параметрів, його основного елемента, наприклад – трансформаторного масла, електричні та фізико-хімічні показники, то буде спостерігатися їх часовий дрейф, зумовлений процесами старіння. Зміна контролюємих параметрів трансформаторного масла відповідає процесам, які відбуваються в фізичній моделі старіючого обладнання. Так, наприклад, пробивна напруга, температура спалаху трансформаторного масла мають тенденцію до зниження, в той час як кислотне число поступово зростає (див.рис.9).

В якості математичної моделі впливу фактору часу на контролюємі параметри було вибрано рівняння лінійної регресії:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 t + e_i, \tag{13}$$

де  $\beta_0 + \beta_1 t = f(\bar{a}, t)$  - регулярна складова моделі старіння;  $\beta_0$  и  $\beta_1$  – невідомі константи;  $t$  – час експлуатації;  $e_i$  – остаточна помилка контролю.

**Рис.9. Графічне подання впливу часу експлуатації на значення кислотного числа (КОН) та розраховані границі зони допуску при наявності параметричних відмов.**

Параметр  $\beta_1$  в рівнянні (13) характеризує величину лінійного зв'язку між середнім значенням показника якості і часом експлуатації трансформаторного масла. При  $\beta_1 = 0$  цей зв'язок відсутній, що каже про інформаційну незначущість контролюемого показника. Аналіз такої моделі проводився на основі результатів профілактичних випробувань 34 силових трансформаторів за 17 показниками контролю, відповідно з галузевим керівним документом, за період експлуатації до 39 років.

Перевірка на значимість, тобто здібність відчутно змінити регулярну складову  $f(at)$  на фоні випадкової величини  $e_t$ , узятими для аналізу показниками якості маслonaповненого обладнання більш ніж 3000 значень, здійснювалась в рамках стандартних процедур перевірки статистичних гіпотез на значимість лінійної регресії (її регулярної складової) при заданому рівні значимості.

Для зменшення помилок, першого та другого роду, мав сенс зменшити дисперсію випадкової величини  $e_t$  шляхом виключення із масива первинних даних явно перевернутих вибіркової послідовностей. Для такої фільтрації цих даних були вибрані тести на стаціонарність, а також фільтрація шляхом експертного відсівання вибіркової часових рядів, для яких знак кореляції досліджуваного показника з часом експлуатації суперечить фізичній моделі впливу часу на цей показник.

В якості тестів була використана ефективність трьох статистичних критеріїв: двох параметричних (тест F і тест d) та одного непараметричного (тест W).

Параметричне тестування часових рядів для контрольованих показників проводилось при рівні значимості  $\alpha = 0,05$  та основній гіпотезі:  $H_0$  – числові характеристики ряду інваріантні по часу.

Як, результат, показники якості які пройшли тестову та експертну фільтрації, були розставлені по ступеням спаду їх значимості у вигляді трьох масивів:  $M_a$  – загальний масив (без фільтрації);  $M_b$  – масив після експертної фільтрації та  $M_c$  – масив після тестової фільтрації (див.табл.3).

Таке ранжирування параметрів контролю додатково перевірялось шляхом розрахунку кількості інформації, яка була отримана в ході контролю, результати якого підтвердили, по-перше, що кількість інформації для показників масиву  $M_c$  вища, ніж у показників з масиву  $M_a$  і  $M_b$ , що вказує на ефективність процедур тестової фільтрації при статистичній обробці початкових даних, а по-друге, падіння кількості інформації у ранжированих показників.



**Ранжировані номери показників якості по степені спаду їх кореляційного зв'язку з часом експлуатації.**

| <b>Масив</b> | <b>Чисельність показників</b> | <b>Номери показників</b> |
|--------------|-------------------------------|--------------------------|
| $M_a$        | 4                             | 2, 9, 8, 10              |
| $M_b$        | 7                             | 2, 9, 8, 5, 3, 10, 1     |
| $M_e$        | 8                             | 2, 1, 5, 9, 3, 8, 10, 11 |

Вибір числа показників, забезпечуючих найменшу ймовірність похибки контролю, проводився на основі лінійних моделей множинної регресії з використанням скорегованого коефіцієнта детермінації  $R_p^2$ , як згоди регресійної моделі з фізичною моделю теплового старіння трансформаторного масла.

На рис.10 представлені залежності міри згоди від числа контролюємих параметрів для трьох сформованих масивів початкових даних. Видно, що найбільш ефективним для формування банку вихідних даних є процеси тестової фільтрації. Вони дозволяють автоматично та об'єктивно відсіювати явно недостовірні значення, отримані в ході багатопараметрового контролю. Таким чином крива для масива  $M_e$  є найбільш регулярною з чітко вираженим максимальним значенням, яке перевищує найбільші значення кривих  $M_a$  і  $M_b$ . Максимальне значення, якого сягає крива  $M_e$ , відповідає найменшому числу показників контролю - п'яти (2 – кислотне число, 1 – температура спалаху масла, 5 -  $tg\delta$  при  $70^0C$ , 9 – наявність CO та 3 – пробивна напруга). При цьому абсолютна середньоквадратична похибка прогнозування часу старіння масла не перевищує  $\pm 1,413$  року на інтервалі спостережень 39 років.

**Рис.10 Залежність міри згоди  $\overline{R_p^2}$  від числа членів регресії  $p$ .**

**Сьомий розділ** присвячений можливому використанню результатів дисертаційної роботи у вигляді алгоритмів та блок – схем автоматизованих установок для вихідного контролю елементів і матеріалів енергетичного устаткування в умовах масового виробництва на промислових підприємствах.

Синтез автоматизованих технічних систем багатопараметрового контролю, не можливий без аналізу залежності достовірності контролю від характеристик ймовірносної моделі технічного контролю до яких відносяться:

$q_{ex}$  – вхідний рівень дефектності, залежний від умов реального виробництва;

$\alpha$  і  $\beta$  - відповідно, ризик виробника та ризик замовника, що визначаються, як функції вихідного рівня дефектності, залежного від результуючої похибки технічного засобу контролю.

Достовірність контролю при цьому можна визначити виразом:

$$D = 1 - [\alpha(1 - q_{ex}) + \beta \cdot q_{ex}]. \quad (14)$$

Величина ризику  $\alpha$  залежить від похибки засобів контролю, та може бути зменшена за рахунок багаторазових вимірювань. В таблиці 4, як приклад, представлені результати розрахунку числа багаторазових вимірювань при заданих достовірностях контролю, ризику виробника та похибках вимірювань діаметра перетворювачем контролю. Як видно з таблиці, введення в систему автоматизації контролю, процедури обчислювання багаторазових вимірювань дозволяють забезпечити необхідну достовірність багатопараметрового контролю при значному коливанні похибок використовуємих перетворювачів.

Особливостями побудови такої автоматизованої установки є те, що для отримання характеристик елементів і матеріалів, потрібно провести поряд з вимірювальними процедурами достатньо складні обчислювальні операції.

Основою для побудови автоматизованої установки, наприклад, по контролю електричних та геометричних параметрів циліндричних токопроводів став метод виміру та перетворювач, який створює повздовжнє магнітне поле, описаний в третьому розділі. Конструкція перетворювача така, що дає можливість використовувати вироби для контролю без обмежень їх довжини, а це в свою чергу дозволяє використовувати дані перетворювачі в технологічному процесі виготовлення таких токопроводів.

Таблиця 4.

**Число вимірювань в функції похибки перетворювача  
при заданій достовірності контролю ( $\beta = q_{ex} = 0,0023$ ).**

| Достовірність контролю, D | $\alpha$ | Похибка перетворювача, % | Число багаторазових вимірювань |
|---------------------------|----------|--------------------------|--------------------------------|
| 0,95                      | 0,05015  | 0,5                      | 2                              |
|                           |          | 1,0                      | 7                              |
|                           |          | 1,5                      | 15                             |
| 0,99                      | 0,01003  | 0,5                      | 7                              |
|                           |          | 1,0                      | 26                             |

|  |  |     |    |
|--|--|-----|----|
|  |  | 1,5 | 58 |
|--|--|-----|----|

Розроблений алгоритм виміру радіуса ( $a$ ) та питомого електричного опору ( $\rho$ ) циліндричних немагнітних токопроводів повністю базується на розробленому методі електромагнітного контролю. Блок обробки результатів вимірів включає операції ухвалення рішення, при даних рівнях помилок контролю першого та другого роду. При необхідності, розроблений алгоритм може бути доповнений процедурами статистичної обробки результатів вимірів, що дозволить зменшити вплив випадкової складової похибки на результат виміру  $a$  і  $\rho$ .

**Рис.11. Функціональна схема автоматизованої установки для електромагнітного контролю параметрів металевих циліндричних виробів.**

Функціональна схема автоматизованої установки для електромагнітного контролю параметрів металевих циліндричних виробів представлена на рис.11. Оскільки в ній використані уніфіковані вимірювальні прилади, обладнані стандартним приладовим інтерфейсом IEEE – 488, то це дозволяє під керівництвом ЕОМ через мікропроцесорний контролер (МПК), який з'єднаний з нею через стандартний інтерфейс RS – 232С, вести прямий обмін інформацією між ними, дистанційне та місцеве управління приладами. Для з'єднання приладів між собою використовується багатопровідниковий магістральний канал загального використання.

Розроблений алгоритм функціонування іншої автоматизованої установки, яка була також розроблена, дозволяє отримувати параметри якості трансформаторного масла  $\varepsilon_r$  і  $\rho$ , а також його

рівня  $l$  в резервуарі, незалежно і в будь якій послідовності, але тільки за вимірними сигналами перетворювача та його розмірами. Алгоритмом передбачено можливість отримання параметрів трансформаторного масла в залежності від заданої температури ( $t_{зад} = 20^{\circ}\text{C}, 70^{\circ}\text{C}, 90^{\circ}\text{C}$ ). Для зменшення випадкових похибок, проводять цикл багатопараметрових вимірів, обробку результатів і отримують уточнені значення параметрів. Таким чином, обробка результатів дозволяє ввести також процедури тестування та прийняття рішення про відповідність чи не відповідність якості контролюємих зразків трансформаторного масла нормативним вимогам. Функціональна схема автоматизованої вимірювальної установки для багатопараметрового контролю електричних та вагогабаритних параметрів трансформаторного масла виконана на тих же принципах, що і для контролю циліндричних немагнітних токопроводів. Всі цифрові вимірювальні прилади, розроблені електроємнісні перетворювачі, об'єднані з ЕОМ під керуванням мікропроцесорного контролера (МПК) роблять комутацію між організованими в систему уніфікованими приладами (IEEE – 488) згідно з алгоритмом та здійснюють, поряд з вимірами контролюємих параметрів, керування всіма складовими автоматизованої установки і дозволяють звести до мінімуму апаратну частину без зниження надійності всієї системи.

Швидкодіючість установки оцінюється властивостями комутатора та часом виміру складових комплексного сигналу цифровими приладами. Кількість первинних перетворювачів може бути значно збільшена (з урахуванням розвитку). Програмне забезпечення, закладене в ЕОМ, дозволяє реалізувати алгоритм контролю відносної діелектричної проникності, питомого електричного опору та рівня масла з найбільшою ефективністю та найменшими витратами.

Розроблені автоматизовані установки дають можливість не тільки використовувати методи та алгоритми для визначення параметрів металевих виробів і якості масла, але і знаходити похибки багатопараметрових вимірів, проводити багаторазову обробку результатів контролю, визначити чутливість перетворювача до реєструємих параметрів виробів та встановити раціональні по похибкам і чутливості режими роботи перетворювача.

## ВИСНОВКИ

В дисертації наведено теоретичне узагальнення і нові рішення наукової проблеми, що полягає в розробці багатфункціональних методів електричного та електромагнітного технологічного і експлуатаційного неруйнівного контролю електричних і геометричних параметрів провідникових циліндричних немагнітних виробів (мідь і алюміній) та рідких ізоляційних матеріалів (трансформаторне масло) енергетичного обладнання на основі використання багатопараметрових електроємнісних та електромагнітних перетворювачів, а також проведена статистична оптимізація числа контролюємих параметрів при збереженні максимальної вірогідності багатопараметрового

контролю при використанні результатів обов'язкових профілактичних випробувань трансформаторного масла, взятого з баків трансформаторів, напругою 110кВ.

1. Зважаючи на важливість інформативних параметрів окремих елементів і матеріалів, для надійного функціонування енергетичного устаткування, з метою першочергового дослідження, були обрані немагнітні циліндричні струмопроводи (мідь і алюміній) та рідинні ізоляційні матеріали (трансформаторне масло), а в якості інформативних показників, що забезпечують ефективний контроль і параметричну надійність роботи устаткування, були прийняті для провідникових виробів – радіус (діаметр) і питомий електричний опір, а для ізоляційного рідинного матеріалу – відносна діелектрична проникність, питомий електричний опір і рівень масла в робочому резервуарі.

2. На основі отриманих універсальних функцій перетворення розглянуті методи багатопараметрового контактного та безконтактного контролю електричних та геометричних параметрів циліндричних немагнітних провідникових виробів (мідних або алюмінієвих) та реалізуючих їх електромагнітних перетворювачів з поздовжнім і поперечним зондувальними магнітними полями, розроблені алгоритми вимірювальних та розрахункових процедур. Для практичної реалізації методу з контактним електромагнітним перетворювачем були використані алюмінієві зразки фазних проводів ліній електропередачі стандартних зрізів А.16, А.50 і А.120, а для безконтактних перетворювачів – зразки з алюмінію і міді з радіусами  $a_1 = 2,55 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $a_2 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $a_3 = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

3. Запропоновано метод багатофункціонального електричного контролю і розроблені багатопараметрові електроємнісні вимірювальні перетворювачі в плоскому та коаксіальному варіантах для одночасного абсолютного і диференційного контролю електричних та вагогабаритних параметрів трансформаторного масла. Розроблені послідовності вимірювальних та розрахункових процедур, які підтвердили правильність змін характеристик, взятих для контролю, різних по якості, трансформаторних масел, електричні параметри яких знаходились в межах по  $\varepsilon_r$  від 2,2 до 5,0 та по  $\rho$  від  $10^{12}$  до  $10^9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

4. Показана практична можливість використання узагальнених конструктивних параметрів, отриманих на основі теоретичного аналізу абсолютних приростів вихідних сигналів розроблених електроємнісних перетворювачів, для оптимізації технологічних процесів їх серійного виготовлення.

5. Створена методика розрахунку очікуваних значень сигналів вимірювальної інформації розроблених електромагнітних та електроємнісних перетворювачів з метою правильного вибору вимірювальної апаратури і встановлення раціонального режиму роботи перетворювачів з погляду малих похибок.

6. Розроблені діючі модельні вимірювальні установки та проведені експериментальні дослідження розроблених електромагнітних і електроємнісних перетворювачів на зразках провідникових (мідних і алюмінієвих) та ізоляційних матеріалів (трансформаторне масло), використовую-

емих в промисловості. Впровадження на ЗАТ “Південкабель” та енергетичних підприємствах дослідних зразків підтвердило високі метрологічні характеристики розроблених перетворювачів.

7. Запропоновані методики розрахунку похибок одночасного двохпараметрового контролю параметрів циліндричних немагнітних токопроводів та трьохпараметрового контролю параметрів трансформаторного масла, отримані вирази для оцінки похибок, визначені найбільш раціональні діапазони виміру контрольованих параметрів. При використанні контактного електромагнітного перетворювача відносні похибки виміру радіуса не перевищували 3%, питомого електричного опору – 6%, в діапазоні узагальненого параметра  $2 \leq x \leq 4$ , в той час, як при використанні безконтактних перетворювачів похибки вимірів діаметра склали 0,5%, а питомого електричного опору – 2,5% при значенні  $x \geq 3$ . При використанні електроємнісних перетворювачів відносні похибки вимірів електричних параметрів досліджуваних трансформаторних масел не перевищували 0,7%, в той час, як вагогабаритних параметрів – 6%.

8. Розроблено трансформаторний вихрострумний перетворювач, використовуючий низьку або високу частоту зонduючого поля, для контролю температури труби, а по ній і трансформаторного масла, циркулюючого в тонкостінних трубопроводах. Проведені експериментальні випробування дослідних зразків низькочастотних термоперетворювачів для оцінки приведеної похибки вимірів температури. В діапазоні  $(20-130)^{\circ}\text{C}$  максимальна похибка виміру температури, досліджуваним перетворювачем, не перевищила 1,6%. Випробування у складі установки БЦУ – 3 показали задовільні результати, та були рекомендовані для впровадження (акт випробувань від 19.11.2003р. в АО “НМУ Електропівденмонтаж”).

9. Досліджено статистичні процедури формування банку даних для підвищення ефективності багатопараметрового контролю, в рамках профілактичних випробувань трансформаторного масла з баків 34 силових трансформаторів напругою 110кВ за період до 39 років, визначено оптимальну кількість параметрів контролю, яке зменшилось з 17 розглянутих до 5, при збереженні максимуму вірогідності, що підвищило ефективність багатопараметрового контролю трансформаторного масла та вирішило задачу параметричного прогнозування його технічного стану, з абсолютною похибкою прогнозу не більше  $\pm 1,413$ .

10. Запропоновані алгоритми і функціональні схеми двох автоматизованих установок з використанням досліджених багатопараметрових методів неруйнівного контролю та, реалізуючих їх, вимірювальних перетворювачів для одночасного контролю електричних та геометричних параметрів циліндричних немагнітних токопроводів і трансформаторного масла. Установки дозволяють згідно заданої програми проводити контроль параметрів і обробку отриманої інформації, визначати відносні похибки вимірів, документувати і зберігати отримані результати у вигляді робочого протоколу.

11. Розроблена методика оцінки нижньої границі числа багаторазових вимірів контролюємих параметрів для забезпечення необхідної вірогідності контролю виходячи з величини похибок розроблених багатопараметрових перетворювачів та заданих значень ризиків замовника і виготовлювача.

### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Бондаренко В.Е. Электрический одновременный контроль трёх информативных параметров трансформаторного масла. - // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. - 1997. - Вып. 8.- С.148 – 154.

2. Бондаренко В.Е. Коаксиальный емкостной преобразователь для контроля трёх параметров масел. // Інформаційно – керуючі системи на залізничному транспорті. Харків: ХарДАЗТ. - 1997.- №5/6 - С. 71 – 73.

3. Бондаренко В.Е. К вопросу контроля температуры полупроводниковым терморезистором // Технічна електродинаміка.- Київ.–1998.-Спец. вип. 2. Т.1 - С.263 – 267.

4. Бондаренко В.Е., Минченко А.А. Анализ методов непрерывного контроля диэлектрических характеристик изоляции при рабочем напряжении на объекте // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1998. – Вып.11. – С. 55 – 57. *Здобувач провів аналіз існуючих пристроїв контролю внутрішньої електричної ізоляції вимірювальних трансформаторів току і високовольтних вводів силових трансформаторів.*

5. Себко В.П., Бондаренко В.Е., Горкунов Б.М. Погрешности контроля электрических и весогабаритных параметров трансформаторных масел. // Український метрологічний журнал. – Харків: ДНВО “Метрологія” - 1999. - Вып.2. - С.25 – 27. *Здобувачу належить вибір методики розрахунків похибок вимірів параметрів трансформаторного масла та інтерпретація результатів розрахунків для плоского ємнісного перетворювача.*

6. Бондаренко В.Е. Определение погрешностей измерения параметров масел коаксиальным емкостным преобразователем. - // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ – 1999.- Вып.37.- С. 51-53.

7. Бондаренко В.Е. Допусковый контроль поперечных размеров изделий индуктивными преобразователями // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков.: ХГПУ.- 1999.- Вып.24. -С.94-103.

8. Бондаренко В.Е., Редько Ю.П. Определение параметров надёжности эквивалентной расчетной схемы сложных энергетических объектов.-// Інтегровані технології та енергозбереження.– Харків:ХДПУ.– 1999.- №3.– С.37-39. *Здобувач вибрав метод розрахунків та дав інтерпретацію отриманих результатів.*

9. Бондаренко В.Е., Себко В.П. Автоматизированная система электромагнитного контроля параметров токопроводов. // Технічна електродинаміка. – Київ. - 1999. – Тем.вип. Ч.11. – С.65-68.

*Здобувач розробив алгоритм та функціональну схему автоматизованого пристрою для контролю та питомого електричного опору циліндричних немагнітних токопроводів.*

10. Бондаренко В.Е, Себко В.П., Горкунов Б.М. Плоский емкостной преобразователь для контроля качества масел в дифференциальном варианте. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 92. - С.90-95. *Здобувачу належить метод проведення параметричного контролю та проведення експериментальних досліджень.*

11. Бондаренко В.Е, Себко В.П., Горкунов Б.М. Дифференциальный коаксиальный емкостной преобразователь для контроля качества масел. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 106.- С.52-57. *Здобувачу належить метод проведення параметричного контролю трансформаторного масла та проведення експериментальних досліджень.*

12. Бондаренко В.Е., Себко В.П., Горкунов Б.М. Расчет ожидаемых значений параметров емкостного преобразователя для контроля компонентов масла. - // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ.– 2000. - Вып. 102. - С.21 – 24. *Здобувачу належать розрахунки очікуваних значень, похибок вимірів отриманих результатів та інтерпретація результатів для плоского ємнісного перетворювача.*

13. Себко В.П., Бондаренко В.Е., Горкунов Б.М. Расчет ожидаемых значений параметров коаксиального преобразователя для контроля качества масел. // Технічна електродинаміка. – Київ. - 2000. - Тем. вип. Ч.2. – С.71 –74. *Здобувачу належать розрахунки очікуваних значень, похибок вимірів отриманих результатів та інтерпретація їх для коаксіального перетворювача.*

14. Бондаренко В.Е. Электромагнитный метод и устройство для контроля температуры жидкости // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: ХДПУ.– 2000.- №4. - С.102-107.

15. Бондаренко В.Е. Оценка неоднородности эксплуатационной информации о надёжности энергетических объектов // Механіка та машинобудування. – Харків: ХДПУ. – 2000. - №1. –С. 56-59.

16. Бондаренко В.Е. Вихретоковый преобразователь для контроля параметров линий электропередач в поперечном магнитном поле // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: ХДАЗТ.-2001.-№2.-С.77-80.

17. Бондаренко В.Е., Себко В.П. К расчёту ожидаемых сигналов контактного электромагнитного преобразователя. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: ХарДАЗТ. - 2001. – №5.- С.54-57. *Здобувачу належить метод розрахунків очікуваних значень сигналів перетворювача, включеного в місткову схему перетворення.*

18. Бондаренко В.Е., Себко В.П. Расчёт ожидаемых значений и выбор аппаратуры по расчётным сигналам. // Технічна електродинаміка. – Київ. - 2001. – Тем. вип. Ч.2 – С.99 – 103. *Здобу-*



*вачу належить метод розрахунків очікуваних значень сигналів перетворювача, включеного по схемі безпосереднього вимірювання електричного струму, напруги та фази.*

19. Бондаренко В.Е., Себко В.П. Оценка погрешностей измерения радиуса и удельного электрического сопротивления изделий контактным электромагнитным преобразователем // Український метрологічний журнал. – Харків: ДНВО “Метрологія.” – 2001. – Вип. 4. - С.14 – 18. *Здобувачу належить розроблений метод розрахунків відносних похибок вимірювань радіуса і питомого електричного опору та проведені розрахунки відносних похибок вимірювань.*

20. Бондаренко В.Е., Шутенко О.В. Анализ существующей системы диагностики состояния высоковольтных маслонаполненных вводов // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ “ХПІ.” – 2001.- №5. – С.29-34. *Здобувач сформулював методи подальших досліджень високовольтних маслонаповнених вводів.*

21. Себко В.П., Бондаренко В.Е. Бесконтактный вихретоковый контроль диаметра и удельного электрического сопротивления проводов линий электропередач // Технічна електродинаміка. – Київ. – 2002.-№1.-С.69 – 72. *Здобувач розробив екстремальний метод для проведення розрахунків, провів експериментальні дослідження за вибраним методом.*

22. Бондаренко В.Е. Расчёт ожидаемых сигналов трансформаторного электромагнитного преобразователя с продольным магнитным полем // Вестник Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”. – Харьков: НТУ“ХПИ”. – 2002. - Т.3. №9. – С.11-16.

23. Бондаренко В.Е. Автоматизированная система многопараметрового контроля качества трансформаторного масла. // Технічна електродинаміка.- Київ. - 2002. –Тем. вип. Ч.3. – С.122-124.

24. Бондаренко В.Е., Шутенко О.В. Оптимизация системы информационных показателей качества трансформаторного масла для технического эксплуатационного контроля маслонаполненного энергетического оборудования.// Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.– Харків:УкрДАЗТ. – 2003.- №2. – С.46 – 50. *Здобувачу належить вибір методу оптимальної обробки багатопараметрової інформації, розробка алгоритму обробки фізико – технічних показників та інтерпретація результатів.*

25. Бондаренко В.Е. Информационный анализ показателей качества при многопараметровом контроле. // Механіка та машинобудування. – Харків: НТУ “ХПІ”. -2003.– Т.2. № 1. - С.93 – 96.

26. Бондаренко В.Е. Бесконтактный вихретоковый преобразователь для контроля диаметра и удельного электрического сопротивления немагнитных цилиндрических изделий в полях различной ориентации // Електротехніка і електромеханіка. – Харків: НТУ “ХПІ”.- 2003. - №2. - С.5 - 10.

27. Патент України . Спосіб контролю діелектричних характеристик внутрішньої ізоляції конденсаторного типу вводів силових трансформаторів і вимірювальних трансформаторів струму під робочою напругою / В.О. Бондаренко, А.А. Мінченко. - №47975 А; Заявлено 3. 01. 2002; Опубл. 15.07. 2002, Бюл. №7. *В формулі винаходу здобувач запропонував використати при кон-*

*тролі діелектричних характеристик ізоляції для узгодження в часі вторинну фазну напругу вимірювального трансформатора напруги, відношення робочих фазних напруг при відсутності дефекту і контролі, відсутність струму небалансу, запам'ятовувати результати і використовувати їх при кожному контролі.*

28. Бондаренко В.Е., Нижегородский В.И. Диагностика опорной изоляции подстанции с помощью ЭВМ. // Труды междунар. науч.– техн. конф. “Компьютер: наука, техника, технология, здоровье”. – Харьков: ХГПУ – 1993.- Ч.3. - С.95– 96. *Здобувач розробив функціональну схему пристрою та прийняв участь в експериментальних дослідженнях.*

29. Бондаренко В.Е., Веприк В.Ю. Анализ причин отказов энергетического оборудования ПС в задачах диагностики. // Труды междунар. науч.– техн. конф. “Компьютер: наука, техника, технология, здоровье”. – Харьков: ХГПУ – 1996.- Ч.1. - С.108. *Здобувач дав інтерпретацію отриманих результатів та запропонував метод оптимальної обробки інформації.*

30. Себко В.П., Бондаренко В.Е. и др. Контроль параметров трансформаторного масла // Труды междунар. науч.– техн. конф. “Компьютер: наука, техника, технология, здоровье”. – Харьков: ХГПУ. - 1996.– Ч.1.- С.130. *Здобувачу належить розробка методу параметричного контролю трансформаторного масла.*

31. Бондаренко В.Е., Шутенко О.В. Новые направления диагностики трансформаторного масла. // Труды междунар. науч.– техн. конф. “Компьютер: наука, техника, технология, здоровье”. – Харьков: ХГПУ – 1996.- Ч.1. - С.110. *Здобувач розробив метод досліджень ізоляції вводів та дав інтерпретацію результатів.*

32. Бондаренко В.Е., Себко В.П., Горкунов Б.М. Определение радиуса и удельного сопротивления проводов линий электропередач. // Труды науч.-техн. конф. “Проблемы автомат. электропривода. Теория и практика”. – Харьков: Вестник ХГПУ. –1998. - С.375-376. *Здобувачу належить алгоритм вимірів радіусу та питомого електричного опору на прикладі алюмінієвих циліндричних токопроводів, інтерпретація результатів, підготовка доповіді.*

33. Бондаренко В.Е. Бесконтактный контроль температуры жидкостей электромагнитным методом // Труды междунар. науч.– техн. конф. “Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье”.-Харьков:ХГПУ.- 1998.- Вып.6.–Ч.1.– С.475-478.

34. Бондаренко В.Е., Минченко А.А. Совершенствование устройств контроля изоляции трансформаторов тока и вводов силовых трансформаторов под рабочим напряжением. // Труды 15 Российской научно-технической конференции “Неразрушающий контроль и диагностика”. – Т.1. – Москва: –1999.– С.30. *Здобувач провів аналіз методів безперервного контролю внутрішньої ізоляції трансформаторів току і вводів силових трансформаторів.*

35. Бондаренко В.Е. Себко В.П. Измерение радиуса и удельного электрического сопротивления немагнитных цилиндрических изделий контактным электромагнитным преобразователем. // Матеріали 4-ї Націон. наук.-техн. конф. “Неруйнівний контроль та технічна діагностика”. – Київ.

– 2003.– С.373-378. *Здобувач підготував доклад, по вибраному ним методу контролю радіуса та питомого електричного опору за допомогою КЕМП, алгоритму розрахунків очікуваних значень сигналів та результатам розрахунків відносних похибок вимірювання контрольованих параметрів.*

36. Бондаренко В.Е., Шутенко О.В. Регрессионная модель старения трансформаторных масел при многопараметровом контроле их технического состояния // Труды 3-й промышл. конф. с международ. участием “Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях.” – п. Славское: Карпаты. – 2003. – С.53. *Здобувачу належить вибір методу досліджень та інтерпретація результатів.*

37. Бондаренко В.Е., Себко В.П. Бесконтактный вихретоковый контроль электрических и геометрических параметров цилиндрических изделий.// Труды междунар. науч.– техн. конф. “Компьютер: наука, техника, технология, здоровье”. – Харьков: НТУ “ХПИ”. - 2003. – №10.6-С.314. *Здобувач вибрав метод безконтактного контролю діаметра і питомого електричного опору циліндричних немагнітних виробів та провів їх експериментальне дослідження.*

#### АНОТАЦІЇ

Бондаренко В.О. Багатофункціональні методи і пристрої для одночасного контролю електричних та геометричних параметрів матеріалів і виробів енергетичного обладнання. (Теорія і практика).- Рукопис.

Дисертація 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”,- Міністерство освіти і науки України – Харків, 2004.

В дисертації використаний комплексний підхід в рішенні проблеми підвищення надійності та ефективності експлуатуємого енергетичного обладнання. Рішення даної проблеми здійснюється за рахунок створення нових багатофункціональних методів неруйнівного контролю і реалізованих на їх основі багатопараметрових перетворювачів виміру параметрів немагнітних струмопроводів та трансформаторного масла. Розроблені, також, алгоритми вимірювальних і розрахункових процедур, проведені розрахунки очікуваних значень сигналів розроблених перетворювачів, проведені експериментальні дослідження та розраховані похибки одночасних вимірів контрольованих параметрів.

Для підвищення ефективності багатопараметрового контролю трансформаторного масла і рішення задачі прогнозування його технічного стану, досліджено статистичні процедури обробки банку даних, визначена їх оптимальна кількість без зниження інформативності.

Запропоновані алгоритми і функціональні схеми автоматизованих установок із застосуванням розроблених методів та перетворювачів, забезпечуючих необхідну вірогідність контролю.

Ключові слова: багатофункціональний метод контролю, струмопровід, трансформаторне масло, багатопараметровий перетворювач, автоматизовані установки.

Бондаренко В.Е. Многофункциональные методы и устройства для одновременного контроля электрических и геометрических параметров материалов и изделий энергетического оборудования. (Теория и практика).- Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.13 - приборы и методы контроля и определение состава веществ. Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”, - Министерство образования и науки Украины – Харьков, 2004.

В диссертации использован комплексный подход в решении проблемы повышения надёжности и эффективности эксплуатируемого энергетического оборудования, что позволяет, учитывая качество комплектующих материалов и изделий, как на стадии их производства, так и в процессе их эксплуатации, принимать решение о качестве оборудования.

Решение данной проблемы осуществляется через создание новых методов многофункционального электрического и электромагнитного неразрушающего контроля и реализованных на их основе многопараметровых устройств для измерения радиуса ( $a$ ) (диаметра) и удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) цилиндрических немагнитных токопроводов, относительной диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon_r$ ), удельного электрического сопротивления ( $\rho$ ) и уровня трансформаторного масла в рабочем резервуаре ( $l$ ), а также путём оптимизации числа параметров контроля при сохранении максимальной достоверности многопараметрового контроля.

На основе рассчитанных универсальных функций преобразования рассмотрены методы для одновременного контактного и бесконтактного неразрушающего контроля  $a$  и  $\rho$  цилиндрического немагнитного изделия при использовании электромагнитных преобразователей с продольным и поперечным зондирующим полем.

Впервые предложен многофункциональный метод неразрушающего контроля и разработаны электроемкостные измерительные преобразователи в плоском и коаксиальном вариантах, для одновременного контроля  $\varepsilon_r$ ,  $\rho$  и  $l$  трансформаторного масла.

Разработаны алгоритмы измерительных и расчетных процедур, созданы методики и проведены расчеты ожидаемых значений сигналов измерительной информации, выбраны измерительные приборы и созданы установки, проведен анализ математических моделей расчета погрешностей косвенного измерения при многопараметровом контроле токопроводящих изделий и трансформаторного масла.

Предложен электромагнитный преобразователь для бесконтактного контроля температуры трансформаторного масла, циркулирующего в тонкостенных трубопроводах, проведена экспери-

ментальная проверка созданных преобразователей температуры, на базе действующих установок тепловой регенерации трансформаторных масел, выполнена оценка метрологических характеристик.

Разработана методика оптимизации числа параметров контроля трансформаторного масла при условии сохранения наибольшей достоверности контроля на основе использования данных профилактических испытаний силовых трансформаторов, позволившая сформировать банк исходных данных (более 3000 измерений за период до 39 лет для 17 параметров контроля) и решить задачу параметрического прогнозирования его технического состояния с абсолютной погрешностью прогноза не более  $\pm 1.413$  года.

Предложены алгоритмы и функциональные схемы автоматизированных установок на основе исследованных многофункциональных методов неразрушающего контроля и разработанных многопараметровых преобразователей для одновременного контроля  $a$  и  $\rho$  токопроводов и  $\varepsilon$ ,  $\rho$  и  $l$  трансформаторного масла, обеспечивающих требуемую достоверность контроля, исходя из конкретных значений уровня дефектности производства, величины погрешностей разработанных преобразователей и заданных значений риска заказчика и риска изготовителя.

Ключевые слова: многофункциональный метод контроля, токопровод, трансформаторное масло, многопараметровый преобразователь, автоматизированные установки.

Vladimir E. Bondarenko. Multifunctional methods and devices for the simultaneous control of electrical and geometrical parameters of materials and products of the power equipment. (Theory and practice). The manuscript.

In the thesis for a Doctor's degree the complex approach in the decision of a problem of increase of reliability and efficiency of the maintained power equipment for the first time is used. The decision of the given problem is carried out by creating of new multifunctional methods of the not destroying control and realized on their basis of multiparameter converters for measurement of parameters of nonmagnetic conduction and transformer oil. Also, algorithms of measuring and settlement procedures are developed, the accounts of expected signals of the developed converters carried out, the experimental researches carried out and the errors of simultaneous measurements of controllable parameters are designed.

For efficiency increase of multiparameter control of transformer oil and the decisions of a task of forecasting of its technical condition, statistics procedure of processing of a databank are investigated, their optimum number without decrease of efficiency determined.

The algorithms and functional schemes of the automated installations with using of methods developed of converters ensuring necessary reliability of the control are offered.

Key words: a multifunctional method of the control, conduction, transformer oil, multiparameter converter, automated installations.

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

1. КЕМП – контактний електромагнітний перетворювач;
2. ТЕМП – трансформаторний електромагнітний перетворювач;
3. ЕРС – електрорушійна сила;
4. ВК – вимірювальна котушка;
5. КГР – котушка Гельмгольца, робоча;
6. РП – робочий перетворювач;
7. КП – компенсаційний перетворювач;
8. ДМ – досліджуване масло;
9. ЗМ – зразкове масло;
10. МПК – мікропроцесорний контролер.