

КОНТРОЛЬ І ДІАГНОСТИКА ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ В ПРИЛАДОБУДУВАННІ

УДК 620.17

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ВІДКРИТОЇ МІКРОСКОПІЧНОЇ ПОРИСТОСТІ ФАРФОРОВИХ ІЗОЛЯТОРІВ

Галаган Р. М.

*Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”,
м. Київ, Україна
rgalagan@ukr.net*

Розглянуті методи та засоби контролю фарфорових ізоляторів на наявність дефекту типу відкрита мікроскопічна пористість. Показано, що відкрита мікроскопічна пористість є найбільш небезпечним дефектом виробничого походження і є причиною більше 80% відмов фарфорових опорних стержневих ізоляторів. В результаті аналітичних досліджень виділено ультразвуковий метод неруйнівного контролю як найбільш придатний в умовах експлуатації фарфорових ізоляторів. Показані шляхи вдосконалення методики проведення ультразвукового контролю для підвищення його достовірності.

Ключові слова: фарфоровий ізолятор, відкрита мікроскопічна пористість, контроль.

Вступ

Високовольтні ізолятори призначені для ізоляції та кріплення шин або струмоведучих частин апаратів на заземлених металевих або бетонних конструкціях в розподільчих пристроях електростанцій та підстанцій, а також для кріплення проводів повітряних ліній передач на опорах. За матеріалом виготовлення ізолятори поділяють на фарфорові, скляні та полімерні. Хоча скляні та полімерні ізолятори мають ряд переваг в порівнянні з фарфоровими, проте останні на сьогоднішній день є найбільш поширеними і потребують особливої уваги до проведення діагностики їх технічного стану.

Пошкодження та руйнування ізоляторів, що встановлюються у відкритих розподільних пристроях змінного струму, приводять до серйозних аварій. Одним з найбільш поширених дефектів фарфорових ізоляторів (ФІ) є відкрита мікроскопічна пористість (ВМП). В результаті потрапляння вологи вглиб зони ВМП можливе як механічне пошкодження ФІ (поява та ріст макроскопічних тріщин внаслідок розширення льоду при замерзанні), так і втрата ізоляційних властивостей. Більше 80% відмов фарфорових опорних стержневих ізоляторів спричинені ВМП.

Метою роботи є аналіз методів та засобів контролю ВМП для забезпечення надійної та ефективної діагностики ФІ.

Постановка задачі

Для виготовлення високовольтних і низьковольтних ФІ різного типу використовується електротехнічний фарфор. Електрофарфор являє собою матеріал,

який отримують з формувальної маси заданого хімічного складу з мінералів та оксидів металів. Будь-яка кераміка, у тому числі й електроізоляційна, – матеріал багатофазний, що складається із кристалічної, аморфної та газової фаз. Її властивості залежать від хімічного та фазового складу, макро- і мікроструктури та від технологічних прийомів виготовлення [1].

На сьогодні найпоширенішим дефектом виробів із високовольтного електротехнічного фарфору, відповідальним за більшість відмов станційного обладнання з вини фарфору, є ВМІП, що являє собою систему пор мікроскопічного (5-7 мкм) розміру, зв'язаних між собою. ВМІП класифікується як обмежено-об'ємний дефект мікроструктурного типу, тобто являє собою більш-менш велику область виробу, у якій порушена мікроструктура.

ВМІП електротехнічного фарфору – дефект чисто виробничого походження, пов'язаний з порушеннями основних технологічних режимів заводом-виробником фарфорового виробу (при цьому строк експлуатації ФІ значення не має). Основною причиною появи ВМІП служить порушення температурно-часового режиму випалу електрофарфору, або невідповідність обраного режиму випалу складу випалюваної фарфорової маси при даних розмірах виробу. ВМІП з'являється як при недовипаленні (заниженні максимальних температур випалу; часу витримки при цих температурах), так і при перевипаленні фарфору. В умовах реального виробництва найімовірніша недовипалена відкрита мікропористість. Також причиною появи ВМІП може служити порушення режиму вакуумування під час витягування заготовки.

На рис. 1 представлена класифікація використовуваних методів контролю ФІ на наявність ВМІП в процесі їх експлуатації.



Рис. 1. Загальна класифікація методів контролю ФІ на наявність ВМІП

Діючі стандарти [2, 3] на високовольтний електрофарфор вимагають повної відсутності ВМІП у всьому об'ємі ізолятора, однак в силу недостатнього обсягу контрольних перевірок в процесі виробництва кількість виробів з ВМІП, що надходять в експлуатацію, досить велика і становить 5-10% від загального числа встановлених. Наявність ВМІП може слугувати основою для пред'явлення рекламації заводу-виробнику опорних стержневих ізоляторів.

Метод фуксинової проби під тиском

Прямий (руйнуючий) метод виявлення ВМІП – метод «фуксинової проби під тиском» (ФППТ) на зразках, відібраних від зруйнованого ізолятора [4]. Метод ФППТ заснований на аналізі профарбовування під тиском (зануренням у одновідсотковий розчин фуксину в 96° етилового спирту при 1500 атм протягом 1 год. 15 хв.) або без тиску (зануренням у одновідсотковий розчин фуксину в 96° етилового спирту на 24 години) зразків, взятих від виробів (або цільних виробів невеликого розміру). Розкриття зразків після профарбовування проводять розрізуванням у діаметральній площині за допомогою алмазного диску. Після закінчення випробування шматки виймають із розчину, промивають водою, висушують і розбивають. Відкрита пористість відсутня, якщо на нових поверхнях перелому не виявлені сліди проникнення барвника. Проникнення розчину барвника у невеликі тріщини, що утворилися під час підготовки зразку, не беруть до уваги. Для оцінки експлуатаційної надійності використовують величини максимальної глибини профарбовування та відстань від границі зони ВМІП до бічної поверхні ізолятора. ВМІП вважається «грубою» (тобто такою, із-за якої виріб підлягає демонтуванню) зі значенням середньої глибини профарбовування більше 2,5 мм. Для діагностики ВМІП на основі методу ФППТ застосовується спеціалізована установка ЦВД-250-Т4 (ТОВ «ЦИВОМ», м. Санкт-Петербург).

Очевидним недоліком методу є те, що він являється руйнівним і потребує значних затрат часу на його проведення. Це означає, що метод ФППТ придатний тільки для вибіркового контролю; його неможливо використовувати для проведення суцільного контролю ФІ. Тому метод ФППТ найчастіше використовують як еталонний метод для уточнення результатів, отриманих за допомогою неруйнівних методів контролю.

Контроль водонаповненості фарфору

Випробування неармованих ізоляторів напругою до 1000 В на водопоглинення проводять методом, заснованим на зміні маси зразка або деталі, попередньо витриманих протягом певного часу в дистильованій воді, а потім висушених [2]. Зразками для випробування служать окремі деталі або шматки ізоляторів масою від 30 г до 50 г. Шматки ізоляторів і деталі повинні мати глазуровану поверхню площею близько 30% всієї поверхні зразка та не повинні мати видимих оком тріщин, що утворилися при відколюванні. Підготовлені для випробування зразки занурюють у посудину із чистою дистильованою водою так, щоб

вони були покриті шаром води товщиною не менше 50 мм, і залишають під водою протягом 24 годин. Протягом перших 3 годин воду в посудині зі зразками кип'ятять. Час нагрівання посудини та води (до кип'ятіння) повинен бути не більше 30 хвилин; цей час входить у зазначені 3 години. На початку четвертої години кип'ятіння припиняють і посудину залишають охолоджуватись. Після закінчення 24 годин зразки по одному виймають із води та витирають злегка вологою добре віджатою ганчіркою, видаляючи водяний шар з поверхні. Після цього зразок зважують, а потім сушать при температурі $(250 \pm 5)^\circ\text{C}$ протягом 6 годин та охолоджують в ексикаторі, після чого знову зважують. Зважування проводять з похибкою до 0,01 г.

Водопоглинення за масою обчислюють за формулою:

$$W_m = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\%,$$

де m_2 – маса зразку, насиченого водою, m_1 – маса висушеного зразку.

За результатами розрахунку водопоглинення окремих зразків обчислюють середній показник водопоглинення, який округлюють до 0,1. Ізолятор вважають таким, що пройшов випробування, якщо водопоглинення не перевищує 0,5%.

Метод має такі ж суттєві недоліки, як і ФППТ, при цьому прямих залежностей, які б пов'язували коефіцієнт водопоглинення з величиною ВМП, немає. Спеціалізованих засобів для проведення даного контролю не потрібно.

Газодинамічний метод контролю

Для контролю параметрів пористості застосовується також газодинамічний метод, заснований на процесі протікання газу через контрольований зразок. Для цього використовується спеціальний пристрій, принцип роботи якого базується на явищі фільтрації та дифузії газу через ОК. На грані зразка встановлюються вимірювальні камери, які герметично притискаються до нього, утворюючи газові пустоти. Герметизація може бути забезпечена прокладками із вакуумної гуми та спеціальною притисковою рамкою. Газові пустоти з'єднуються із вакуумним насосом через систему трубок. Для виключення перетікання газу між пустотами кожна з них підключається до загальної магістралі через зворотні клапани. Газові пустоти мають виходи на датчики тиску, інформація з яких передається на комп'ютер. Після вакуумування газових пустот одна з камер з'єднується з атмосферою і починається процес фільтрації, а потім і дифузії газу в газові пустоти інших камер, тиск в яких починає повільно зростати. Величини вимірюваних тисків в газових пустотах підставляються у виведені формули для розрахунку коефіцієнту фільтрації, проникності, дифузії, розчинності газу, які визначають активну, закриту та умовно-закриту пористість матеріалу, а також фізико-механічні властивості виробу [5].

Даний метод контролю пористості, безумовно, має свої переваги, але для контролю ФІ в процесі експлуатації має суттєві обмеження. По-перше, ФІ зверху покриті шаром глазури, а для описаного методу необхідною умовою є безпо-

середнє встановлення газових камер на пористий матеріал. По-друге, ізолятори мають складну геометричну форму, що також створює значні труднощі для встановлення камер на поверхню виробу.

Таким чином, хоча сам газодинамічний метод не є руйнівним, проте його застосування для контролю ізоляторів потребуватиме вирізання з них зразків заданих розмірів, після чого проводитиметься контроль. Саме тому даний метод умовно віднесено до руйнівних стосовно контролю фізико-механічних характеристик ФІ. Більше того, для його проведення використовуються в основному експериментальні установки, промислове виробництво засобів контролю пористості газодинамічним методом відсутнє.

Тепловий метод контролю

Для виявлення окремих дефектних ізоляторів, що перебувають під робочою напругою, використовується тепловізійний метод контролю. Застосування цього методу для контролю станційної фарфорової ізоляції можливо при наявності дуже сильної ВМП, яка помітно знижує опір ізоляції через всмоктування вологи [4]. Однак варто зауважити, що такі випадки досить рідкісні. Крім того, навіть для таких виробів важко розраховувати на виявлення ВМП методами тепловізійного контролю, якщо ізолятор встановлений не в одноповерховій колонці.

При нормальній вологості виявлення дефектів ізоляторів тепловізійними методами, особливо при від'ємних температурах, ускладнено в силу незначного рівня тепловиділення і різкого зниження чутливості тепловізійних систем. Дефекти фарфорових ізоляторів виявляють за тепловими аномаліями при наявності розвиненої поздовжньої тріщини і в умовах підвищеного зволоження або при забрудненні поверхні ізолятора, а також при дефектах цементного замурування (рис. 2) [6].

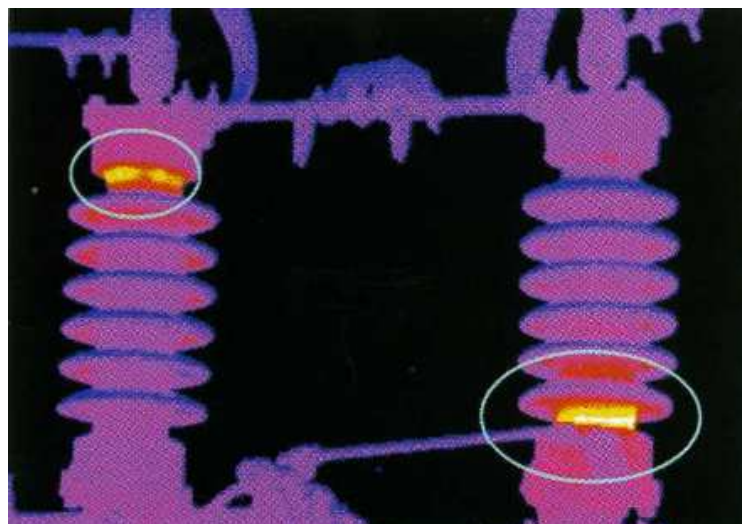


Рис. 2. Термографічне зображення верхнього та нижнього небезпечних перетинів дефектних фарфорових опорних ізоляторів

Методом ТВК можливо виявити вироби, що розігріваються за рахунок появи струмів витоку, які виникають на зовнішніх (магістральних) тріщинах і в зонах з ВМІП без помітного зниження загального опору ізоляції виробу. За отриманою тепловою картинкою можна судити про наявність ВМІП. Умовою для застосування методу ТВК є підвищена вологість повітря та випадіння опадів.

Отже, за допомогою теплового методу виявляються лише вироби, що увібрали значну кількість вологи. Якщо волога не потрапила всередину ФІ через зони ВМІП, хоча сама ВМІП присутня у виробі, метод не дозволить її виявити, що є недоліком методу.

До переваг методу можна віднести широку номенклатуру тепловізієвих пристроїв, які виготовляються промислово. Вибір необхідного засобу залежатиме лише від вимог, які пред'являються до методу.

Ультразвуковий метод контролю

На сьогодні в процесі експлуатації ФІ для виявлення ВМІП найбільше розповсюдження отримав метод ультразвукової структуроскопії, який зводиться в основному до вимірювання швидкостей поширення в контрольованому виробі ультразвукових хвиль різних типів (поздовжніх, головних, поверхневих), а також згасання поздовжніх хвиль. За швидкістю поширення ультразвуку в тілі ізолятору виявляються і оцінюються дефекти типу ВМІП та порушення складу маси, за згасанням – ВМІП, засмічувальна макропористість і в деяких випадках випалювальна макроскопічна пористість.

Оцінка наявності ВМІП в фарфорових опорних стержневих ізоляторах проводиться в верхньому та нижньому небезпечних перетинах (між металом фланця і нижнім і верхнім ребрами відповідно) шляхом вимірювання швидкості поширення ультразвуку в згаданих зонах та порівняння її зі швидкістю, яка вимірюється на ділянках без ВМІП. ВМІП приводить до зменшення швидкості поширення ультразвукових коливань (УЗК) в об'єкті контролю (ОК), при цьому згасання УЗК зростає в основному завдяки розсіюванню. Пори мають значно більший демпфуючий вплив на процеси поширення пружних коливань у твердому тілі, ніж інші недосконалості структури [7].

Використання в якості вимірювального параметру згасання УЗК в фарфорі для контролю ВМІП можливе лише на зразках з плоскопаралельними гранями. Поверхні ж введення/прийому УЗК ізолятору не є плоскопаралельними. Також для точного визначення коефіцієнту згасання важливою умовою є забезпечення стабільного акустичного контакту, що є складною задачею при діагностиці ізолятору із-за його криволінійної та шорсткуватої поверхні. Згідно з [8] ВМІП за згасанням УЗК в ізоляторі виявляється в особливо тяжких випадках. На рис. 3 представлена порівняльна характеристика УЗС ФІ з використанням в якості вимірювального параметру швидкості та згасання УЗК.

Виявлення ВМІП здійснюється методом УЗС за швидкістю поширення ультразвуку в контрольованому виробі перед монтажем або на змонтованому обладнанні при відключеній напрузі. Водночас, за існуючими рекомендаціями ре-

зультати ультразвукового контролю повинні обов'язково уточнюватись за допомогою руйнівного методу ФППТ, який дозволяє встановити порогове значення швидкості УЗК. Якщо виміряна швидкість ультразвуку менша порогової, це означає, що ізолятор має розвинену ВМП. Тобто, на сьогоднішній день для контролю ВМП використовується зв'язка двох методів: УЗС для суцільного контролю ізоляторів та ФППТ для завдання критеріїв відбраковування. Очевидно, що такий підхід не є оптимальним в силу описаних недоліків методу ФППТ, тому розробка критеріїв відбраковування ізоляторів без застосування методу ФППТ є актуальною задачею.



Рис. 3. Порівняння способів УЗС з використанням в якості вимірювальних параметрів швидкості та згасання УЗК

Наразі при ультразвуковому контролі ФІ задіяні два оператори. Перший оператор знаходиться безпосередньо біля ізолятору із датчиком, який він встановлює на поверхню ОК (попередньо за допомогою штангенциркуля він вимірює базу прозвучування). Датчик приєднано до дефектоскопу, який знаходиться на певній відстані від ОК біля другого оператора. По команді першого оператора другий проводить вимірювання часу проходження (якщо використовується дефектоскоп з часовою розгорткою) УЗК вздовж бази прозвучування за допомогою дефектоскопу. Дані записуються в журнал, після чого виконується розрахунок швидкості ультразвуку в точці вимірювання на поверхні ФІ. Нева-

жко зрозуміти, що на результат контролю, його достовірність та продуктивність впливатиме злагодженість дій двох операторів. Тому даного впливу бажано уникнути.

Очевидно, що описана вище методика ультразвукового контролю має суттєві недоліки. Для їх подолання можна запропонувати наступне: всі контрольні-вимірювальні операції повинні проводитись лише одним оператором за один підхід; система повинна автоматично вимірювати базу прозвучування та час затримки ультразвукового імпульсу в ФІ, після чого розраховувати швидкість; програмне забезпечення системи повинне дозволяти виконувати статистичну обробку результатів контролю для відсіювання результатів, що містять грубі похибки; система повинна мати бездротовий зв'язок для передачі даних на стаціонарний блок збору даних; задачею другого оператора (наявність якого в будь-якому випадку обумовлена міркуваннями безпеки) є контроль правильності передачі даних та їх статистичної обробки, а не участь в контрольні-вимірювальних операціях.

Висновки

Широке використання ультразвукового контролю для виявлення ВМІП фарфорових ізоляторів обумовлено відсутністю на сьогоднішній день достойного альтернативного методу. Проведений аналіз показав, що із існуючих методів більшість є руйнівними та потребують значного часу на їх виконання. Тепловізійний контроль, що належить до неруйнівних методів, на жаль, можливо використовувати лише за певних умов і при наявності дуже розвиненої ВМІП. В той же час УЗС є досить простим методом, що має гарну кореляцію результатів вимірюваних значень швидкості ультразвуку в ФІ з наявністю ВМІП. Більше того, для проведення УЗС ізоляторів можна використовувати широкий асортимент ультразвукових дефектоскопів та п'єзоелектричних перетворювачів.

Однак, складність методики проведення УЗС ФІ робить її малопродуктивною та є причиною появи значної суб'єктивної похибки. Тому в роботі дані рекомендації по вдосконаленню методики УЗС ФІ. Подальшим продовженням роботи є розробка критерію відбраковування ізоляторів за результатами УЗС, який не потребував би використання руйнівних методів контролю для їх завдання.

Література

1. Березин В. Б. Электротехнические материалы: Справочник / В. Б. Березин, Н. С. Прохоров, Г. А. Рыков, А. М. Хайкин. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 504 с.
2. ГОСТ 26093-84. Изоляторы керамические. Методы испытаний. – Взамен ГОСТ 5862-79; введ. 26.09.85. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 14 с.
3. ГОСТ Р 52034-2008. Изоляторы керамические опорные на напряжение свыше 1000 В. Общие технические условия. – Взамен ГОСТ Р 52034-2003; введ. 18.12.2009. – М.: Стандартинформ, 2009. – 53 с.
4. Омельченко Ю. А. Контроль качества изделий из высоковольтного электрофарфора на монтаже и в эксплуатации / Ю. А. Омельченко, А. А. Шейкин // Диагностика технического состояния фарфоровых изоляторов высоковольтных коммутационных аппаратов: сборник материалов семинара. 27-29 октября 1999 г. – М.: ВНИИЭ, 1999. – С. 54-61.

5. Матросова Ю. Н. Разработка устройства автоматизированного неразрушающего контроля физико-механических свойств пористых материалов с учётом размеров и технологии изготовления // Контроль. Диагностика. – 2010. – №10 (148). – С. 68 – 72.
6. Кинаш О. А. Вопросы контроля технического состояния линий среднего класса напряжений на опыте применения систем УФ-диагностики ООО «Энергонефть Томск» / О. А. Кинаш, С. И. Смирнов, Р. Ф. Харисов и др. // Территория NDT. – 2012. – №2. – С. 53 – 55.
7. Черемской П. Г. Поры в твердом теле / П. Г. Черемской, В. В. Слезов, В. И. Бетехтин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 376 с.
8. Ультразвуковой контроль материалов: Справ. изд.: пер. с нем. / Й. Крауткремер, Г. Крауткремер. – М.: Металлургия, 1991. – 752 с.

*Надійшла до редакції
05 травня 2014 року*

© Галаган Р. М., 2014

УДК 621.19

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЗС МАТРИЦ

Серый К. Н.

*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
г. Киев, Украина
skn@bigmir.net*

В статье рассмотрен метод определения пространственных координат измерительного преобразователя дефектоскопа с использованием оптических систем. В качестве чувствительных элементов оптических систем предложено использовать приборы с зарядовой связью (ПЗС). Показано преимущества применения этих приборов в оптических системах, а также обосновано их пространственное расположение относительно друг друга.

Проведенные исследования на экспериментальном стенде позволили определить факторы, влияющие на погрешность определения пространственных координат данным методом.

Предложенный метод позволяет автоматизировать процесс контроля и сформировать в памяти портативного компьютера формуляр с отображением картины выполненной операции в пространственных координатах положения преобразователя дефектоскопа, а также отображать месторасположения выявляемых дефектов. Полученные независимо от дефектоскописта отображения выполненного контроля путем сканирования поверхности объекта измерительным преобразователем является объективным документом, подтверждающим выполнение контроля. Наличие такого документа позволяет оценить качество проведенного контроля и обеспечивает объективность оценки полученных результатов.

Ключевые слова: *пространственные координаты, фотоприёмник, измерительный преобразователь.*

Постановка проблемы

Дефектоскопист, который производит контроль объекта вручную, не имеет возможности определить точные координаты дефекта в случае его выявления. Поэтому результат контроля является субъективным и не обеспечивает документального подтверждения в пространственных координатах поверхности объекта контроля. В этом случае, процедура устранения субъективности кон-