

## ТЕХНОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІЗОЛЯЦІЇ КОНДЕНСАТОРНОГО ТИПУ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЮ ПІД РОБОЧОЮ НАПРУГОЮ

Бсляєв В. К.<sup>1</sup>, Панько О. М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики та енергозбереження НУБіП України,

<sup>2</sup>Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського"

Порівняно методики визначення параметрів ізоляції за різними методиками що використовуються при контролі стану ізоляції енергообладнання під робочою напругою.

**Постановка проблеми.** Одним з актуальних завдань сучасної енергетики України залишається оцінка стану ізоляції високовольтних трансформаторів струму і введів енергообладнання (ізоляція конденсаторного типу). Традиційна методологія діагностування ізоляції, заснована на періодичному відключенні обладнання і вимірі ряду нормованих параметрів, неефективна, особливо в умовах експлуатації зістареного обладнання. Один із шляхів поліпшення ситуації - впровадження технологій контролю ізоляції без виведення обладнання з експлуатації (контроль під робочою напругою).

Чинними нормами передбачена можливість контролю під робочою напругою двома істотно різними методами: балансовий контроль (за струмами небалансу) і методом порівняння (диференціальний контроль) [1,2]. Не розглядаючи, не раз обговорювані, переваги і недоліки методу балансового контролю та пристроїв що його реалізують, можна сказати, що ці пристрої залишаються швидше приладами аварійної сигналізації, ніж діагностики. Високий поріг спрацьовування, що встановлюється для впевненого виявлення дефекту, не дозволяє проводити раннє виявлення дефектів ізоляції і відстеження їх розвитку.

При здійсненні диференціального контролю під робочою напругою реалізують стеження за зміною тангенса діелектричних втрат і ємності ізоляції об'єкта контролю (ОК), проводячи численні вимірювання. При цьому особливу роль відіграє достовірність одержуваної інформації, що передбачає високу точність проведених вимірювань і коректність процедур обробки результатів. З метою підвищення ефективності диференціального контролю запропоновано декілька різних підходів [1-5] до методів виконання вимірів та визначення контрольованих параметрів ізоляції, особливості яких можуть призводити до складнощів та спотворень результатів.

**Мета роботи.** Порівняння та аналіз похибок методів визначення параметрів ізоляції конденсаторного типу при здійсненні диференціального контролю.

**Засади вимірів тангенсу втрат під робочою напругою.** В основі диференціального контролю під робочою напругою лежить мостовий метод порівняння із зразковим об'єктом (еталоном) [1,2]. Вимірюють тангенс різниці кутів діелектричних втрат ОК і еталона. В якості еталона в більшості випадків використовують один з ОК, наприклад, трансформатор струму або ввід (можливо використовувати окремих вимірювальний трансформатор напруги). Тоді при контролі ОК однієї фази в довільний момент часу  $k$  вираз для тангенсу втрат ОК запишемо наступним чином (для спрощення тут і далі  $tg\delta$  запишемо як  $\delta$ ):

$$\delta_{j(k)} = \partial\delta_{ij(k)} + \delta_{i(k)}, \text{ або } \partial\delta_{ij(k)} = \delta_{j(k)} - \delta_{i(k)} \quad (1)$$

де  $\delta_{j(k)}$  - тангенс кута втрат  $j$ -го ОК;  $\partial\delta_{ij(k)}$  - тангенс ди-

ференціального кута (різниці кутів) при вимірюванні для  $j$ -го ОК при  $i$ -му еталоні (перший індекс - еталонного об'єкта, другий - ОК що перевіряється).

В разі виміру тангенсу втрат обладнання без виводу з експлуатації проблема полягає в тому, що дійсне значення тангенса втрат еталонного об'єкта, що використовується як база для відліку, під час вимірювання невідомо, і замість нього використовують неактуальні попередні значення, що і є джерелом методичних помилок - розрахунковий тангенс відрізняється від дійсного тангенсу втрат ОК.

При диференціальному контролі визначається не сам тангенс диференціального кута ОК, а його приріст ( $\Delta\delta_{ij}$ ) щодо базових значень - значень на початку контролю [1,2]. Тоді, при вимірюванні в  $k$  момент часу для  $j$ -го ОК при  $i$ -му еталоні (один парний вимір), приріст тангенса диференціального кута:

$$\Delta\delta_{ij(k)} = \partial\delta_{ij(k)} - \partial\delta_{ij(0)} = -\Delta\delta_{ji(k)}, \quad (2)$$

де  $\partial\delta_{ij(0)}$  - початкове значення тангенса диференціального кута, що вимірюється при взятті об'єктів на контроль.

**Методика з виділенням окремого еталонного ОК.** Згідно з методикою, СОУ-Н МПЕ [1], вимірювання проводять з виділеним еталонним ОК ( $i$  - індекс еталона). Використовуючи отриманий за (2) приріст, визначають поточне розрахункове значення тангенса ОК що перевіряється [1, 2]:

$$\delta p_{j(k)} = \Delta\delta_{ij(k)} + \delta_{j(0)}, \quad (3)$$

де  $\delta_{j(0)}$  - початкове значення тангенса  $j$ -го ОК, яке визначається при прийманні об'єктів на контроль.

Отримані розрахункові значення порівнюють з допустимими значеннями, нормованими в [1].

Підставляючи (2) в формулу (3), отримуємо:

$$\delta p_{j(k)} = \partial\delta_{ij(k)} + \delta_{i(0)}. \quad (4)$$

Порівнюючи (4) з точним вираженням (1) для дійсного значення тангенса ОК бачимо, що в методиці СОУ при визначенні розрахункового тангенса пропонується замість невідомого під час вимірювань значення тангенса еталонного об'єкта  $\delta_{i(k)}$  використовувати значення, яке визначається при взятті об'єктів на контроль  $\delta_{i(0)}$ . Отримане розрахункове значення тангенса кута втрат  $\delta p_{j(k)}$  (яке порівнюється з допустимою нормою), буде відрізнятися від дійсного  $\delta_{j(k)}$  на величину приросту тангенса еталонного об'єкта за час від початку контролю.

У разі контролю ізоляції багатьох ОК на ВРП, викликають певні незручності з вибором і контролем

стану еталонного ОК, а при виборі єдиного еталона для всіх ОК фази (найбільш зручний варіант) оцінка стану еталонного ОК стає неможливою [3].

**Методики обробки без виділення окремого еталона.** Для підвищення ефективності контролю запропоновано [3,4] використовувати методики, при яких передбачається, що кожен ОК по черзі використовується як еталонний для всіх інших ОК однойменної фази (без виділення окремого еталонного об'єкта). Загальна кількість вимірювань значно зростає - пропорційно квадрату кількості ОК. Такий підхід дозволяє відмовитися від спеціального контролю і незручних змін еталонних об'єктів.

Відповідно до методики що описана в [3], при контролі  $N$  об'єктів на фазі, при визначенні поточного значення розрахункового тангенса кожного ОК замість (3) використовують такий вираз:

$$\delta p_{i(k)} = -\frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N \Delta \delta_{ij(k)} + \delta_{i(0)}. \quad (5)$$

Відмінності алгоритмів обробки результатів, без виділення окремого еталона [3,4], складаються тільки в значеннях, взятих за базові, від яких відраховуються приріст. У методиці [3] за базове береться середнє всіх значень тангенсів ОК при прийомі на контроль, в [4] використовується середнє всіх розрахункових значень в попередньому вимірі. В обох методиках застосовують усереднення виміряних значень тангенса диференціального кута.

Аналіз названих методик обробки результатів вимірювань без виділення окремого еталонного ОК показав [5], що їх особливістю є можливість впливу зміни тангенса втрат одного з ОК на результати оцінки тангенсів інших ОК. Цей вплив призводить до складно прогнозованих методичних похибок, які ускладнюють оцінку дійсного значення тангенса і можуть викликати помилки при оцінці стану об'єктів контролю. Поява ОК з дійсними параметрами ізоляції що сильно погіршуються, призводить до зниження розрахункових тангенсів втрат всіх ОК, що маскує появу інших неблагополучних ОК, з меншими відхиленнями, і робить складним виявлення таких відхилень для визначення дефекту ізоляції на ранніх стадіях розвитку.

Для ілюстрації похибок використання різних методик розглянемо модельну ситуацію, що виникає при контролі множини ОК, коли в результаті старіння ізоляції одночасно поступово з різною швидкістю зростають тангенси у кількох ОК. На рис. 1 показана ідеалізована картина зміни дійсних значень тангенсів ізоляції 6 контрольованих ОК (початкові значення від 0,001 до 0,0015) в процесі експлуатації з постійною швидкістю (ідеалізація) - від виміру до виміру ( $k$  - момент часу, індекс вимірювання). У ОК №2 на 20-му кроці контролю тангенс досягає критично великого значення (0,005), у ОК № 3,4 наростання слабші, у ОК №1 погано помітне наростання (в 20 разів менше ніж у №2), у двох, що залишилися зміни тангенса відсутні. На рис. 2 представлено результати використання описаної методи без виділення еталону. Визначити, наскільки великі дійсні значення тангенсів (що необхідно для виявлення значень що перевищують нормовані) і як швидко вони зростають, складно. Розпізнати при таких похибках об'єкт з малим наростанням тангенса (початкові стадії розвитку дефектів) важкоздійснюване завдання. Реальні ситуації ускладнюють

нерівномірністю наростання втрат, температурною залежністю параметрів ізоляції (різної навіть для однотипних реальних ОК), неможливістю повністю відсіяти зовнішні випадкові і не випадкові впливи.

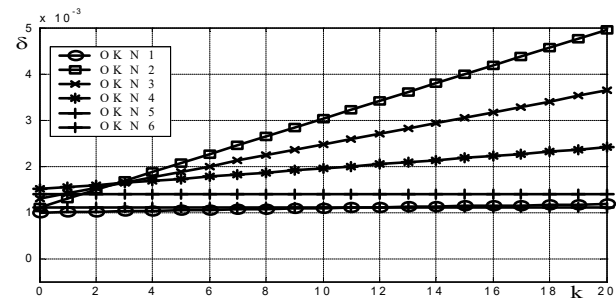


Рисунок 1 – Зміни дійсних значень тангенсів втрат ізоляції ОК (модельна ситуація)

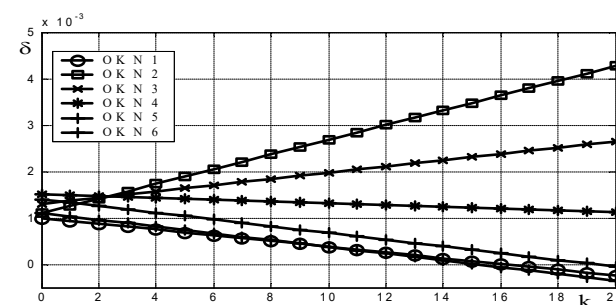


Рисунок 2 – Зміни розрахункових значень тангенсів втрат ізоляції ОК, визначених за методикою [3]

Для зменшення похибок диференціального контролю без виділення окремого еталона можна запропонувати наступну **вдосконалену методику** [5]. Усереднення результатів вимірювань при визначенні розрахункового тангенса, згідно формули (5), має здійснюватися не за всіма  $N$  ОК, а по виділеній меншій групі об'єктів кількістю  $Nm$ . Склад цієї "опорної" групи визначається, на попередньому  $(k-1)$  часовому кроці вимірювань, шляхом вибору ОК з найменшими щодо початкових значень приростами розрахункового тангенса:  $(\delta p_{j(k-1)} - \delta_{j(0)})$ . При такому виборі з усереднення великого спотворення розрахункових результатів, що зменшує очікувану похибку (сумарний приріст тангенсів "опорної" групи менше загального приросту).

Таким чином, при контролі  $N$  об'єктів на фазі, точне розрахункове значення тангенса визначають:

$$\delta p_{i(k)} = -\frac{1}{Nm-1} \sum_{j \neq i}^{Nm} \Delta \delta_{ij(k)} + \delta_{i(0)} = \frac{1}{Nm-1} \sum_{j \neq i}^{Nm} (-\delta \delta_{ij(k)} + \delta_{j(0)}), \quad (6)$$

якщо  $i$ -й ОК входить в виділену групу, якщо ні - то в (6) замість  $Nm-1$  слід писати  $Nm$ .

Для істотного зменшення кількості проведених вимірювань на кожному часовому кроці (від  $\approx N^2$  до  $\approx N$ ), можна визначати тангенс диференціального кута двох ОК в (6) не прямим вимірюванням, а розрахунковим шляхом, використовуючи вимірювання тангенса з виділенням окремого еталонного об'єкта:

$$\partial \delta_{ij(k)} = \partial \delta_{lj(k)} - \partial \delta_{li(k)},$$

де  $l$  - індекс виділеного еталонного об'єкта.

На рис 3 наведено графіки зміни розрахункових тангенсів, визначених за формулою (6), пропонуваної методики для модельної ситуації описаної раніш. При розрахунку вибиралася "опорна" група з чотирьох ОК з найменшим приростом на поточному часовому кроці, тим самим було виключено спотворювальний вплив 2 і 3 ОК на результати оцінки (зміни на ОК 1 і 4 продовжують впливати, обумовлюючи похибку). Розрахункові тангенси краще відтворюють значення і тенденції зміни дійсних тангенсів, ніж в методиці [3]. Позитивний момент, в порівнянні з методикою [1] - контролюються всі ОК, включаючи еталон.

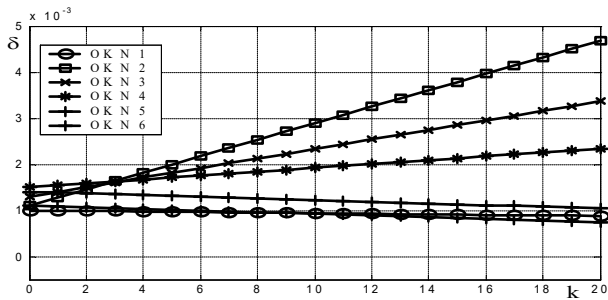


Рисунок 3 – Зміни розрахункових значень тангенсів втрат ОК, визначених за вдосконаленою методикою

**Методика з використанням трансформатора напруги для еталона.** Для утворення еталона можна використовувати вимірювальний трансформатор напруги (до пристрою вимірювання підключається вторинна обмотка ТН через окремі еталонні пристрій, наприклад конденсатор) [1,2]. Зникає проблема вибору та зміни ОК в якості еталону, всі ОК знаходяться під контролем.

В цьому випадку значення тангенсу втрат еталону можна вважати відомим і таким що мало змінюється з часом. Для визначення тангенсу можна використовувати методику СОУ [1]. Новим видом спотворень результатів буде вплив куткової похибки ТН, яка хоча і є систематичною але залежить від навантаження ТН. Оскільки умови зовнішнього впливу (температура, вологість) на еталон в цьому випадку можуть бути контрольовані, такий підхід дозволяє проводити аналіз залежностей тангенсу від впливів що існують в експлуатації (наприклад від температури), що є суттєвою перевагою цієї методики. При використанні ОК в якості еталону виявлення такої залежності утруднюється майже однаковою зміною параметрів ОК та еталону під дією впливів.

**Висновки.** Вдосконалена методика визначення тангенса втрат без окремого еталона, з виділенням "опорної" групи ОК для усереднення, дозволяє зменшити негативний вплив об'єктів з погіршеними характеристиками на оцінку тангенсів інших ОК і знизити відповідні похибки, зберігаючи при цьому можливість одночасного контролю всіх ОК. Використання у вдосконаленій методиці без виділення еталона розрахункового способу визначення тангенсів диференціального кута двох ОК за результатами вимірювань з виділенням еталона, дозволяє істотно знизити кількість необхідних вимірювань (до значення необхідного за традиційною методикою СОУ-Н МПЕ).

Використання методики з трансформатором напруги в якості еталонного об'єкта дозволяє значно зменшити впливи змін з часом базового значення тан-

генса втрат еталонного об'єкта (для традиційної методики визначення розрахункових значень), уникнути незручностей з вибором та зміною еталону, ефективніше використовувати аналіз добових та сезонних змін тангенсу втрат для визначення стану ізоляції.

#### Список використаних джерел

1. СОУ-Н МПЕ 40.1.46.301:2006. Перевірка ізоляції трансформаторів струму 330-750 кВ під напругою. Методичні вказівки. Київ : Мінпаліверенерго, 2006. 27 с.
2. Сви П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
3. Шинкаренко Г. В., Онищенко В. А., Орнатский О. А. Технологии измерения параметров изоляции маслонаполненных трансформаторов тока 330-750 кВ под рабочим напряжением. *Электрические сети и системы*, 2012. №3. С.67–71.
4. Сахно А. А. Алгоритм измерения тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции трансформаторов тока и вводов 330-750 кВ при непрерывном контроле, под рабочим напряжением. *Электротехника та Електромеханіка*, 2010. №2. С.54–55.
5. Беляев В. К., Паненко Е. Н. Определение диэлектрических параметров изоляции трансформаторов тока при множественных измерениях в системах контроля под рабочим напряжением. *Электротехника та Електромеханіка*, 2016. №5. С.40–46.
6. Приборное обеспечение и опыт контроля изоляции конденсаторного типа под рабочим напряжением / Беляев В. К., Борщев П. И., Ободовский В. Д., Канивецкий Ю. В., Бехтев Г. В., Богданов С.Г., Масенко Д. А., Двойных В. П. *Электрические сети и системы*, 2012. №4. С.68–72.

#### Анотація

### ТЕХНОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ КОНДЕНСАТОРНОГО ТИПА В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Беляев В. К., Паненко Е. Н.

*Проведены сравнение и анализ погрешностей методик определения параметров изоляции при дифференциальном контроле. Рассмотрены методики с выделением и без выделения отдельного объекта контроля как эталона при измерениях.*

#### Abstract

### TECHNOLOGIES FOR DETERMINING INSULATION DIELECTRIC PARAMETERS FOR THE MONITORING SYSTEMS UNDER WORKING VOLTAGE

V. Beliaev, E. Panenko

*Comparison and analysis of methods errors for determining the insulation parameters for monitoring were made. The methods with and without assignment of a separate standard for measurements are considered.*