

## ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Беляев В. К.<sup>1</sup>, Паненко Е. Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно Производственное Предприятие "ОСТ" (г. Киев),

<sup>2</sup>Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт"

*Рассмотрены особенности методик обработки результатов множественных измерений, применяемых в системах контроля. Получены выражения для оценки методических ошибок рассмотренных методик.*

**Постановка проблемы.** В настоящее время в энергокомпаниях Украины широко внедряются технологии массового контроля состояния высоковольтной изоляции измерительных трансформаторов тока (ТТ) без вывода из эксплуатации. Основным методом такого контроля следует считать дифференциальный контроль, при котором среди всех проверяемых ТТ (объектов контроля - ОК) одной фазы выделяются "эталонные" (Э), имеющие наилучшее состояние изоляции, а состояние других оценивают по изменению тангенса угла диэлектрических потерь относительно выделенного эталона [1]. Можно выделить технологии периодического и непрерывного контроля, различающиеся по-сути частотой измерения параметров изоляции объекта контроля (ОК), которая является следствием степени автоматизации процесса измерений [1-2]. В обеих технологиях могут использоваться сходные средства (мостовые, векторные измерители) и методы измерений [2-4]. Для повышения эффективности контроля в таких технологиях предлагается использовать множественные "перекрестные" измерения, при проведении которых предполагается, что каждый ОК поочередно используется и как эталонный и как контролируемый [2,4]. Методики обработки результатов "перекрестных" измерений отличаются от обработки парных измерений использованием различного рода усреднений по всем результатам, что естественно будет приводить к уменьшению влияния случайных отклонений вызванных, например, помехами или погодными влияниями. В тоже время, как будет показано ниже, эти методики приводят к появлению методических погрешностей, которые могут затруднять оценку результата.

**Цель работы.** Рассмотрены особенности и погрешности методик обработки результатов "перекрестных" измерений.

**Основы используемых методик обработки результатов контроля изоляции.** В основе дифференциального контроля лежит мостовой метод сравнения [5], при котором используя мост переменного тока (в последнее время используют высокоточные векторные измерители, например [3]) определяют тангенс угла диэлектрических потерь ОК подключенного к входу "X" ( $tg\delta_{ок}$ ), как сумму измеренного тангенса ( $tg\delta_{изм}$ ) и известного тангенса потерь "эталона" ( $tg\delta_{э}$ ), подключенного к входу "0":

$$tg\delta_{ок} = tg\delta_{э} + tg\delta_{j} \quad (1)$$

Проблема заключается в том, что реальное значение тангенса потерь эталонного объекта, используемое как база для отсчета, во время измерения (контроля) неизвестно, и вместо него используют при-

ближенные значения, что и является источником методических ошибок - расчетный тангенс отличается от реального тангенса потерь ОК.

Для случая измерений множества объектов под рабочим напряжением, для ОК одной фазы в произвольный момент времени  $k$  запишем формулу (1) следующим образом (для упрощения здесь и далее вместо  $tg\delta$  записываем  $\delta$ ):

$$\delta_j^k = \partial\delta_{i,j}^k + \delta_i^k, \quad \text{или} \quad \partial\delta_{i,j}^k = \delta_j^k - \delta_i^k \quad (2)$$

где  $\delta_j^k$  - тангенс угла потерь  $j$ -го ОК;  $\partial\delta_{i,j}^k$  - тангенс дифференциального угла при измерении для  $j$ -го ОК при  $i$ -м эталоне (первый индекс эталона, второй проверяемого ОК).

Здесь, в соответствии с [1], измеряемая разница тангенсов ОК и Э названа тангенсом дифференциального угла. При дифференциальном контроле, определяется не сам тангенс дифференциального угла ОК, а его изменение ( $\Delta\delta_{i,j}$ ) по отношению к базовым значениям - значениям в начале контроля [1]. Так, при измерении в  $k$  момент времени для  $j$ -го ОК при  $i$ -м эталоне, приращение тангенса дифференциального угла.

$$\Delta\delta_{i,j}^k = \partial\delta_{i,j}^k - \partial\delta_{i,j}^0 = -\Delta\delta_{j,i}^k \quad (3)$$

Используя полученное приращение, определяют расчетное значение тангенса для проверяемого ОК [1]:

$$\delta p_j^k = \Delta\delta_{i,j}^k + \delta_j^0 \quad (4)$$

Для эталонного ОК:

$$\delta p_i^k = -\Delta\delta_{i,j}^k + \delta_i^0 \quad (4^*)$$

Допустимые значения тангенса угла потерь нормированы в [1].

Подставляя определение (3) в формулу (4) после несложных преобразований получаем такое выражение для определения расчетного значения тангенса:

$$\delta p_j^k = \partial\delta_{i,j}^k + \delta_i^0 \quad (5)$$

Сравнивая (5) с точным выражением (2) для тангенса ОК видим, что в методике [1] при определении расчетного тангенса при парных измерениях предлагается вместо неизвестного во время измерений значения тангенса эталонного объекта  $\delta_i^k$  использовать значение,

определяемое при взятии объектов под контроль  $\delta_i^0$ . Получаемое расчетное значение тангенса угла потерь  $\delta p_i^k$  (которое сравнивается с допустимой нормой) будет отличаться от реального  $\delta_j^k$  на величину изменения тангенса эталонного объекта за время от начала контроля.

При массовом контроле ТТ на ОРУ, возникают определенные неудобства с выбором и контролем состояния эталонного ТТ, а при выборе одного эталона для всех ТТ фазы (наиболее удобный вариант) формула (4\*) для оценки эталонного ТТ становится неприемлемой [2]. Действительно, для каждого проверяемого ОК при неизменном эталоне получаем свой, отличный от других результат для  $\Delta\delta_{i,j}^k$  и как следствие разные значения расчетного тангенса  $\delta p_i^k$  для одного и того же  $i$ -го эталона.

**Особенности методик обработки при "перекрестных" измерениях.** В случаях проведения массового или непрерывного контроля ТТ и для облегчения контроля эталонных объектов, предложено несколько методик (алгоритмов) обработки результатов отдельных измерений проводимых при контроле [2, 4]. Рассмотрим две методики, основанные на проведении множества так называемых "перекрестных" измерений. В этих измерениях каждый ОК одноименной фазы поочередно выступает то как проверяемый, то как эталонный объект. Поскольку каждый ОК проходит измерения в паре с каждым, общее количество измерений значительно возрастает - пропорционально квадрату количества ОК.

1. Методика, используемая на девяти подстанциях Донбасской энергосистемы [2]. При контроле  $N$  объектов на фазе, предлагается при определении текущего значения расчетного тангенса каждого ОК вместо формул (4) и (4\*) использовать следующие выражения [2]:

$$\delta p_i^k = -\Delta\delta_{icp}^k + \delta_i^0, \quad \Delta\delta_{icp}^k = \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N \Delta\delta_{i,j}^k \quad (6)$$

где  $\Delta\delta_{icp}^k$  - усредненное по всем ОК значение приращения в измерениях с  $i$ -м эталоном.

Объединяем (6) в одно выражение и подставляем определение (3):

$$\begin{aligned} \delta p_i^k &= -\frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N \Delta\delta_{i,j}^k + \delta_i^0 = -\frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N (\partial\delta_{i,j}^k - (\delta_j^k - \delta_i^0)) + \delta_i^0 = \\ &= \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N (-\partial\delta_{i,j}^k + \delta_j^k). \end{aligned} \quad (7)$$

Полученное выражение показывает (сравним с (5)), что согласно рассматриваемой методике расчетное значение тангенса потерь представляет собой среднее всех парных результатов (каждый ОК с каждым, кроме как сам с собой) проведенных по методике [1].

2. Методика, описанная в [4] и использованная в системе непрерывного контроля "Safe-СТ" на подстанции 330кВ Днепровской энергосистемы. Согласно [4] при контроле  $N$  объектов одноименной фазы сначала определяются промежуточные значения тангенса для каждого ОК при парных измерениях с раз-

ными эталонами ( $\delta_{j,i}^k$ ) по формуле аналогичной (5), но, вместо значения тангенса эталона в начале контроля, используется расчетное значение тангенса полученное в предыдущем по времени измерении. Для определения окончательного расчетного значения для ОК берется среднее всех промежуточных значений для этого ОК при разных эталонах. В формульном выражении описанный алгоритм записывается так:

$$\delta_{j,i}^k = \delta p_j^{k-1} - \partial\delta_{i,j}^k, \quad \delta p_i^k = \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N \delta_{j,i}^k \quad (8)$$

Последние формулы можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta p_i^k &= \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N (\delta p_j^{k-1} - \partial\delta_{i,j}^k) = -\frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N \partial\delta_{i,j}^k + \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N \delta p_j^{k-1} = \\ &= -\partial\delta_{icp}^k + \delta p_{cp}^{k-1} \end{aligned} \quad (9)$$

Сравнивая выражения (8,9) и (7) видим, что алгоритмы обработки результатов для определения расчетного значения тангенса двух методик отличаются значениями, взятыми за базовые, от которых отсчитываются изменения. В первой методике за базовое берется среднее всех значений тангенсов ОК при взятии на контроль, во втором используется среднее всех расчетных значений в предыдущем измерении. В обеих методиках применяют усреднение измеренных значений тангенса дифференциального угла.

Интерес представляет оценка отличий расчетных значений тангенса ОК получаемых при обработке согласно рассматриваемым методикам от реальных его значений - оценка методических погрешностей.

Для оценки указанной погрешности рассмотрим реакцию величины расчетного тангенса определенно-го согласно методам 1 и 2 на изменение реального тангенса одного из ОК.

Предположим, что до  $k$ -го момента времени изменений тангенса на всех ОК не происходило, расчетные значения совпадали с реальными  $\delta p_i = \delta_i = \delta_i^0$ . Пусть в  $k$ -й момент времени на  $m$ -м ("поврежденном") ОК произошло изменение тангенса потерь на величину  $D\delta_m = \delta_m^k - \delta_m^{k-1} = \delta_m^k - \delta_m^0$ , на остальных ОК изменения тангенса не было ( $\delta_i^k = \delta_i^{k-1} = \delta_i^0$ , для  $i \neq m$ ). В последующие моменты времени значения тангенса на всех ОК более не изменялись ( $\delta_i^{k+n} = \delta_i^{k+1} = \delta_i^k$ , для любых  $i$ ). Таким образом, на "поврежденном" ОК скачком изменился тангенс потерь.

Система контроля зафиксирует изменения тангенса дифференциального угла и его приращения только в случае участия в парных измерениях "поврежденного" ОК (при  $i=m$ ):

$$\begin{aligned} \partial\delta_{m,j}^k &= \delta_j^k - \delta_m^k = \delta_j^k - (\delta_m^{k-1} + D\delta_m) = \partial\delta_{m,j}^{k-1} - D\delta_m = \partial\delta_{m,j}^0 - D\delta_m \\ \Delta\delta_{m,j}^k &= \partial\delta_{m,j}^k - \partial\delta_{m,j}^0 = \partial\delta_{m,j}^{k-1} - D\delta_m - \partial\delta_{m,j}^0 = -D\delta_m. \end{aligned}$$

В случае  $i \neq m$  и  $j \neq m$ , приращения не будет

$$\Delta\delta_{i,j}^k = 0; \quad \partial\delta_{i,j}^k = \partial\delta_{i,j}^{k-1} = \partial\delta_{i,j}^0.$$

В любой последующий момент времени  $k+1 \dots k+n$  значение тангенса дифференциального угла и его приращения не изменятся, в частности ( $n>0$ ):

$$\partial\delta_{m,j}^{k+n} = \partial\delta_{m,j}^k = \partial\delta_{m,j}^0 - D\delta_m \text{ и } \Delta\delta_{m,j}^{k+n} = \Delta\delta_{m,j}^k = -D\delta_m \quad (10)$$

Как реакцию на скачок получим следующие значения расчетного тангенса в момент скачка.

По первой методике, согласно (7):

$$\delta p_m^k = -\frac{1}{N-1} \sum_{j \neq m}^N \Delta\delta_{m,j}^k + \delta_m^0 = D\delta_m + \delta_m^0 = \delta_m^k \text{ для "поврежденного" ОК (} i=m \text{) и}$$

$$\delta p_i^k = -\frac{D\delta_m}{N-1} + \delta_i^0 = -\frac{D\delta_m}{N-1} + \delta_i^k \text{ для остальных ОК, } i \neq m.$$

В последующие моменты времени значения  $\delta p_i$  и  $\delta p_m$  определяемые по первой методике не изменятся.

По второй методике (9):

$$\begin{aligned} \delta p_m^k &= \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq m}^N (\delta p_j^{k-1} - \partial\delta_{m,j}^k) = \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq m}^N (\delta_j^{k-1} - (\delta_j^k - \delta_m^k)) = \delta_m^k, \\ \delta p_m^{k+1} &= \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq m}^N (\delta p_j^k - \partial\delta_{m,j}^{k+1}) = \\ &= \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq m}^N ((\delta_j^0 - D\delta_m) - (\delta_j^{k+1} - \delta_m^{k+1})) = -\frac{D\delta_m}{N-1} + \delta_m^{k+1}, \end{aligned}$$

- для "поврежденного" ОК ( $i=m$ );

$$\begin{aligned} \delta p_i^k &= \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq m}^N (\delta_j^{k-1} - (\delta_j^k - \delta_i^k)) = -\frac{D\delta_m}{N-1} + \delta_i^k, \\ \delta p_i^{k+1} &= \frac{1}{N-1} \left[ \sum_{j \neq i, j \neq m}^N (\delta_j^0 - \partial\delta_{i,j}^{k+1}) + (\delta p_m^k - \partial\delta_{i,m}^{k+1}) \right] = \\ &= -\frac{N-2}{(N-1)^2} D\delta_m + \delta_i^{k+1} \text{ для } i \neq m. \end{aligned}$$

Как видим, при использовании первой методики наблюдаем занижение (при  $D\delta_m > 0$ ) расчетного тангенса по сравнению с реальным только у "здоровых" ОК ( $i \neq m$ ). При использовании второй методики расчетные тангенсы отличны от реальных не только у "здоровых" но и у "поврежденного" ОК - не в момент скачка, а начиная со следующего измерения. Эти отличия сохраняются на всем временном интервале контроля.

**Выводы.** Рассмотренные методики обработки результатов "перекрестных" измерений приводят к методическим погрешностям, которые затрудняют оценку реального значения тангенса угла потерь и оценку значимости тангенса путем сравнения с нормированными значениями. В случае использования методики [2], методическая погрешность возникает при оценке тангенса только "здоровых" ОК, а в случае методики предлагаемой в [4] погрешности возникают при оценке тангенса, как у "здоровых", так и у "поврежденных" ОК. При повышении реального тангенса использование рассмотренных методик приводит к занижению расчетных значений в указанных случаях. Указанные погрешности обратно пропорциональны

количеству контролируемых ОК и пропорциональны изменению реального тангенса потерь "поврежденного" ОК. В случае постепенного нарастания значения реального тангенса у одного из контролируемых ОК, будет наблюдаться снижение расчетных тангенсов других, "здоровых" ОК, при использовании любой из рассмотренных методик "перекрестных" измерений. Это уменьшение значительно даже при  $N=10$ . Снижение расчетных тангенсов "здоровых" ОК при наличии одного ОК с сильно ухудшающимися параметрами маскирует появление еще нескольких "поврежденных" ОК с меньшими отклонениями, что делает затруднительным выявление таких отклонений на ранних стадиях.

#### Список использованных источников

1. СОУ-Н МПЕ 40.1.46.301:2006. Перевірка ізоляції трансформаторів струму 330-750 кВ під напругою. Методичні вказівки – К.: ГРИФРЭ, 2006.
2. 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.
3. Беляев В. К. Приборное обеспечение и опыт контроля изоляции конденсаторного типа под рабочим напряжением / [Беляев В. К., Борщев П. И., Ободовский В. Д. и др.] // Электрические сети и системы.- 2012.- №4.-С 68-72.
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. Сви П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения/ - М: Энергоатомиздат, 1992. – 240с.

#### Анотація

#### ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІЗОЛЯЦІЇ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЮ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ ПІД РОБОЧОЮ НАПРУГОЮ

Беляев В. К., Паненко О. М.

*Розглянуто особливості методик обробки результатів "перекрестних" вимірів, що використовуються при контролі стану ізоляції трансформаторів струму під робочою напругою. Отримано вирази для оцінки методичних помилок, що виникають при використанні розглянутих методик.*

#### Abstract

#### FEATURES OF DEFINITION METHODS OF INSULATION PARAMETERS IN THE MONITORING SYSTEMS OF CURRENT TRANSFORMERS UNDER WORKING VOLTAGE

V. Beliaev, E. Panenko

*The features of the methods of data processing of multiple measurements used in the monitoring systems of insulation current transformers under operating voltage are discussed. Estimates of methodical errors arising from the use of these methods are presented.*