

УДК 621.314

Беляев В.К.Учебно-научный институт энергетики, автоматики и энергосбережения
Национального университета биоресурсов и природопользования Украины**Паненко Е.Н.**Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

В статье рассмотрены методики обработки результатов измерений тангенса угла диэлектрических потерь высоковольтной изоляции, используемые в системах контроля без вывода оборудования из эксплуатации. Сопоставлены методика с использованием назначения определенного стандартного объекта и методики, не использующие назначения специальных стандартных объектов. Показано, что применение методик обработки без выделения отдельного эталонного объекта может приводить к существенным сложностям в оценке результатов контроля изоляции. Предлагаются усовершенствования методики обработки, уменьшающие погрешности методик и трудоемкость измерений.

Ключевые слова: высоковольтная изоляция, диагностика, методика обработки, погрешность, тангенс угла диэлектрических потерь.

Постановка проблемы. Одной из актуальных задач современной энергетики Украины остается оценка состояния изоляции высоковольтных трансформаторов тока и вводов силового маслонаполненного оборудования. Традиционная методология диагностирования изоляции, основанная на периодическом отключении оборудования и измерении ряда нормированных параметров, неэффективна, особенно в условиях эксплуатации состаренного оборудования. Один из путей улучшения ситуации – внедрение новых современных технологий контроля изоляции без вывода оборудования из эксплуатации (контроль под рабочим напряжением).

Действующими нормами предусмотрена возможность контроля под рабочим напряжением рассматриваемого оборудования двумя существенно различающимися методами: неравновесно-компенсационным (балансовый контроль) и методом сравнения (дифференциальный контроль) [1; 2]. Не рассматривая не раз обсуждаемые достоинства и недостатки неравновесно-компенсационного метода контроля и устройств, его осуществляющих, можно сказать, что эти устройства остаются приборами скорее аварийной сиг-

нализации, чем диагностики. Высокий порог срабатывания, устанавливаемый для уверенного обнаружения дефекта, не позволяет использовать эти приборы для раннего обнаружения дефектов изоляции и отслеживания их развития.

При осуществлении дифференциального контроля под рабочим напряжением реализуют слежение за изменением традиционно измеряемых электрических характеристик изоляции: тангенса диэлектрических потерь и емкости, проводя множественные измерения названных величин. При этом особую роль играет достоверность получаемой информации, что предполагает высокую точность проводимых измерений и корректность процедур обработки результатов.

Анализ последних исследований и публикаций. Для повышения эффективности контроля в таких технологиях предложено [3; 4] использовать методики, при которых предполагается, что каждый объект контроля (далее – ОК) поочередно используется как эталонный для всех других контролируемых ОК (без выделения отдельного эталонного объекта). Названный подход позволяет отказаться от специального контроля и неудобных смен эталонных объектов. В то же время в работе

В.К. Беляева, Е.Н. Паненко [5] указано на возникновение дополнительных ошибок при такой обработке, не возникающих при обработке традиционных измерений с выделением специального эталонного объекта.

Постановка задания. Цель статьи – разработка методики обработки результатов измерений тангенса угла потерь изоляции конденсаторного типа при осуществлении дифференциального контроля без вывода из эксплуатации (под рабочим напряжением) и оценка погрешности такой методики.

Изложение основного материала исследования. Основы измерений тангенса потерь изоляции. В основе дифференциального контроля лежит мостовой метод сравнения с образцовым

объектом (эталонном) [1; 2]. Используя мост переменного тока, измеряют тангенс ($\text{tg}\delta_{\text{meg}}$) разницы углов диэлектрических потерь ОК ($\delta_{\text{ок}}$), подключенного к входу «X», и угла потерь эталона (δ_e), подключенного к входу «0» (ввиду малости реальных значений углов потерь можно не учитывать отличие тангенса разницы от разницы тангенсов):

$$\text{tg}\delta_{\text{ок}} = \text{tg}\delta_{\text{meg}} + \text{tg}\delta_e . \quad (1)$$

Системы непрерывного контроля множества ОК строятся на основе приборов нового поколения, основанных на микропроцессорной технике, способных осуществлять автоматический контроль электрических характеристик изоляции с высокой точностью (в последнее время используют высокоточные векторные измерители, например [6]).

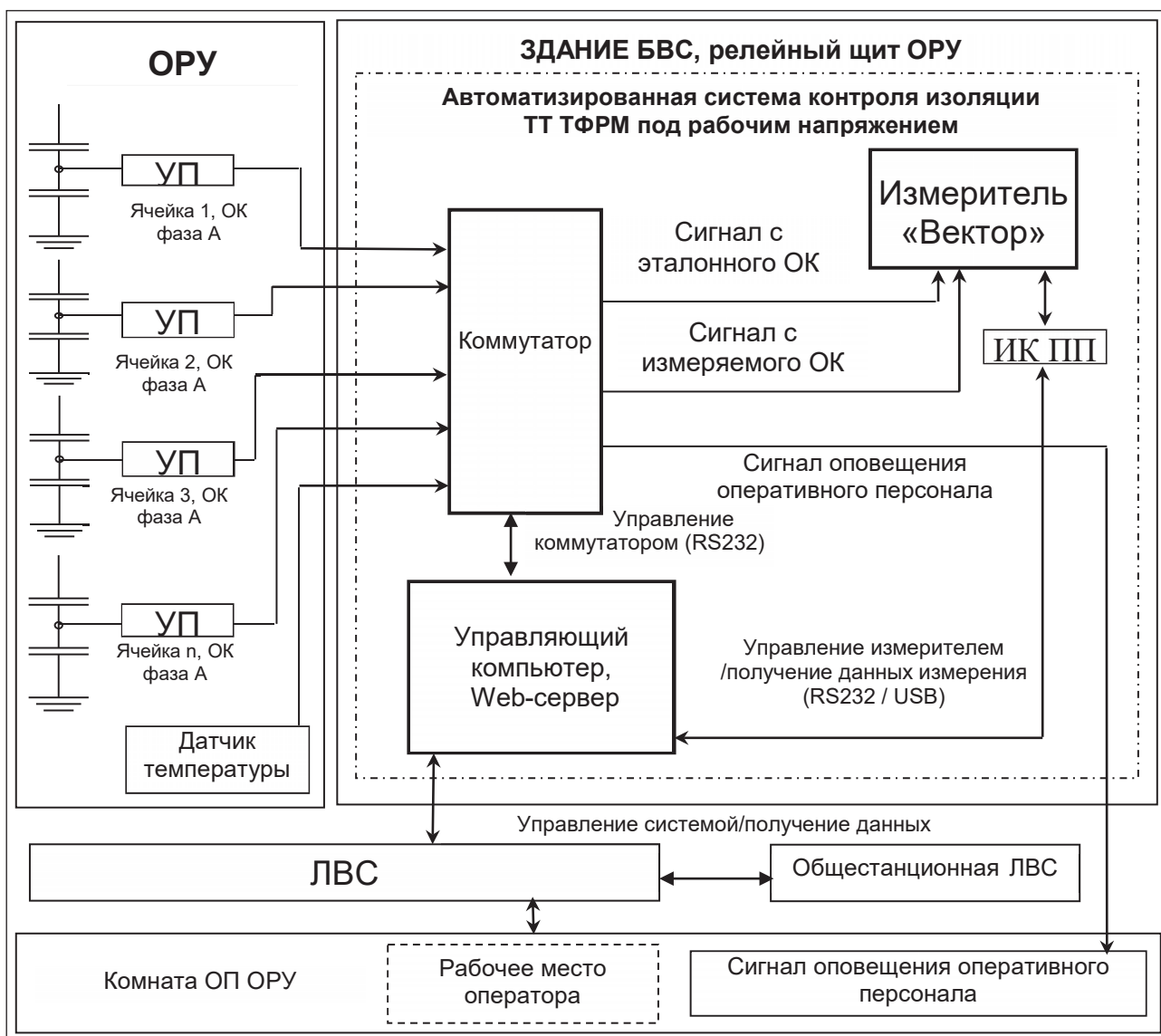


Рис. 1. Блок-схема автоматизированной системы контроля параметров изоляции трансформаторов тока на подстанции [6]

Типичная блок-схема автоматизированной системы контроля параметров изоляции под высоким напряжением приведена на рис 1. Система осуществляет пофазные, попарные измерения для ОК, находящихся в разных ячейках, обработку измерений, анализ полученных результатов [6].

Проблема заключается в том, что действительное значение тангенса потерь эталонного объекта, используемое как база для отсчета, во время измерения неизвестно, и вместо него используют приближенные значения, что и является источником методических ошибок: расчетный тангенс отличается от действительного 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 $\text{tg}\delta$ записываем δ):

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

где $\delta_{j(k)}$ – тангенс угла потерь j -го ОК; $\partial\delta_{ij(k)}$ – тангенс дифференциального угла при измерении для j -го ОК при i -м эталоне (первый индекс – эталона, второй – проверяемого ОК). Здесь, в соответствии с [1], измеряемый тангенс разницы углов потерь ОК и эталона назван тангенсом дифференциального угла.

При дифференциальном контроле определяется не сам тангенс дифференциального угла ОК, а его приращение ($\Delta\delta_{ij}$) относительно базовых значений – значений в начале контроля [1; 2]. Так, при измерении в k момент времени для j -го ОК при i -м эталоне (одно парное измерение) приращение тангенса дифференциального угла:

$$\Delta\delta_{ij(k)} = \partial\delta_{ij(k)} - \partial\delta_{ij(0)} = -\Delta\delta_{ji(k)}, \quad (3)$$

где $\partial\delta_{ij(0)}$ – начальное значение тангенса дифференциального угла, измеряемое при взятии объектов на контроль.

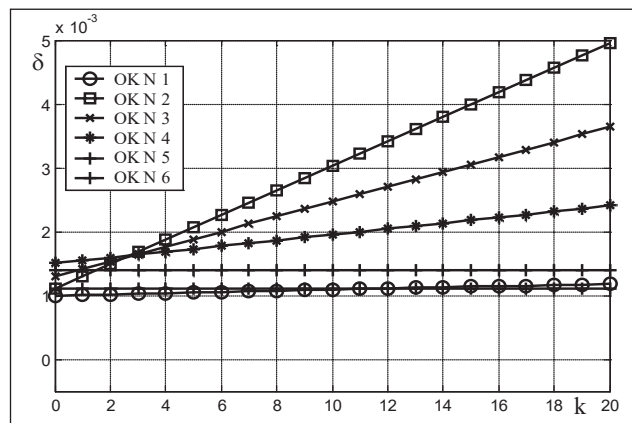


Рис. 2. Изменения действительных значений тангенса потерь изоляции ОК

Согласно методике, описанной в СОУ-Н МПЕ [1], измерения проводят с выделенным эталонным ОК (i – индекс эталона). Используя полученное по (3) приращение, определяют текущее расчетное значение тангенса проверяемого ОК [1; 2]:

$$\delta p_{j(k)} = \Delta\delta_{ij(k)} + \delta_{j(0)}, \quad (4)$$

где $\delta_{j(0)}$ – начальное значение тангенса для j -го ОК, определяемое при взятии объектов на контроль.

Для эталонного ОК:

$$\delta p_{i(k)} = -\Delta\delta_{ij(k)} + \delta_{i(0)}. \quad (5)$$

Полученные расчетные значения сравнивают с допустимыми значениями тангенса угла потерь, нормированными в [1] (критерии отбраковки).

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

$$\delta p_{j(k)} = \partial\delta_{ij(k)} + \delta_{i(0)}. \quad (6)$$

Сравнивая (6) с точным выражением (2) для действительного значения тангенса ОК, видим, что в методике 1 при определении расчетного тангенса предлагается, вместо неизвестного, во время измерений значения тангенса эталонного объекта $\delta_{i(k)}$ использовать значение, определяемое при взятии объектов на контроль $\delta_{i(0)}$. Получаемое расчетное значение тангенса угла потерь $\delta_{pj(k)}$ (которое сравнивается с допустимой нормой) будет отличаться от действительного $\delta_{j(k)}$ на величину приращения тангенса эталонного объекта за время от начала контроля.

При массовом контроле изоляции ОК на ОРУ возникают определенные неудобства с выбором и контролем состояния эталонного ОК, а при выборе одного эталона для всех ОК фазы (наиболее удобный вариант) формула (5) для оценки эталонного ОК становится неприемлемой [3]. Действительно, для каждого проверяемого ОК при неизменном эталоне получаем свой, отличный от других результат

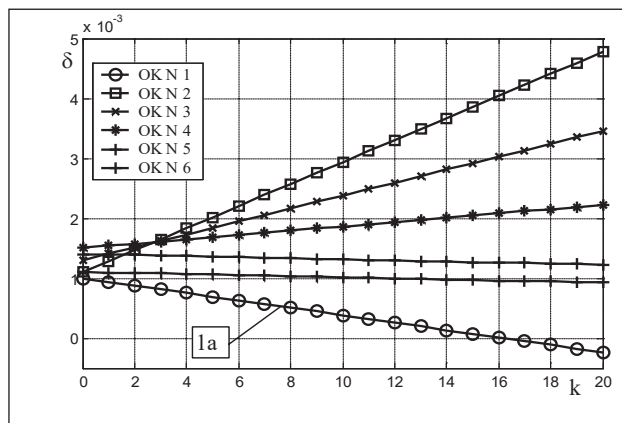


Рис. 3. Изменения расчетных значений тангенса потерь изоляции ОК, определенных по методике [1]

для $\Delta\delta_{ij(k)}$ и, как следствие, разные значения расчетного тангенса $\delta_{pi(k)}$ для одного и того же i -го эталона.

Методика обработки без выделения отдельного эталона. В случаях проведения автоматизированного периодического или непрерывного контроля трансформаторов тока предложено несколько методик (алгоритмов) определения расчетного тангенса, основанных на проведении множества измерений, без выделения отдельного эталонного ОК [3; 4]. В этих измерениях каждый ОК поочередно выступает в качестве эталонного для других проверяемых ОК одноименной фазы. Поскольку каждый ОК проходит измерения в паре с каждым, общее количество измерений значительно возрастает – пропорционально квадрату количества ОК.

К примеру, согласно методике, используемой на девяти подстанциях Донбасской энергосистемы и описанной Г.В. Шинкаренко, В.А. Онищенко, О.А. Орнатский [3], при контроле N объектов на фазе, при определении текущего значения расчетного тангенса каждого ОК, вместо формул (4) и (5), используют следующее выражение:

$$\delta_{P_{i(k)}} = -\frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N \Delta\delta_{ij(k)} + \delta_{i(0)}. \quad (7)$$

Отличия алгоритмов обработки результатов без выделения отдельного эталона [3; 4] состоят только в значениях, взятых за базовые, от которых отсчитываются приращения. В методике [3] за базовое берется среднее всех значений тангенсов ОК при взятии на контроль, в [4] используется среднее всех расчетных значений в предыдущем измерении. В обеих методиках применяют усреднение измеренных значений тангенса дифференциального угла.

Анализ названных методик обработки результатов измерений без выделения отдельного эталонного ОК показал [5], что их отличительной особенностью является возможность влияния изменения тангенса потерь одного из ОК на результаты оценки

тангенсов других ОК. Это влияние приводит к сложно прогнозируемым методическим погрешностям, которые затрудняют оценку действительного значения тангенса и могут вызывать ошибки при оценке состояния объектов контроля.

Появление хотя бы одного ОК с сильно ухудшающимися действительными параметрами приводит к снижению расчетных тангенсов потерь всех ОК, что маскирует появление других неблагоприятных ОК с меньшими отклонениями и делает затруднительным выявление таких отклонений для определения развивающегося дефекта изоляции на ранних стадиях.

Для иллюстрации указанного влияния и возникающих погрешностей в [5] рассмотрена модельная ситуация, подобная возникающей при реальном контроле множества ОК, когда в результате старения изоляции одновременно постепенно растут тангенсы у нескольких объектов с разной скоростью. При достижении критических нормированных значений тангенсов у одного из ОК принимается решение о дополнительной проверке или выводе его из эксплуатации [1].

На рис. 2 показана идеализированная картина изменения действительных значений тангенсов изоляции 6 контролируемых ОК (начальные значения от 0,001 до 0,0015) в процессе эксплуатации с постоянной скоростью – от измерения к измерению (k – момент времени, индекс измерения). У ОК № 2 сильное изменение приводит к достижению на 20-м шаге контроля критически большого значения (0,005), у ОК № 3, 4 нарастания более слабые, у ОК № 1 плохо различимое нарастание (в 20 раз меньше, чем у № 2), у двух оставшихся изменения отсутствуют.

На рис. 3, 4 приведены графики изменения расчетных тангенсов, определенных, соответственно, по методикам СОУ [1] и методике с усреднением,

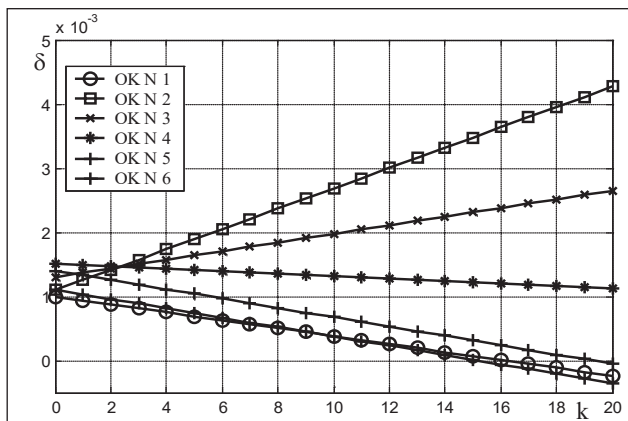


Рис. 4. Изменения расчетных значений тангенсов потерь изоляции ОК

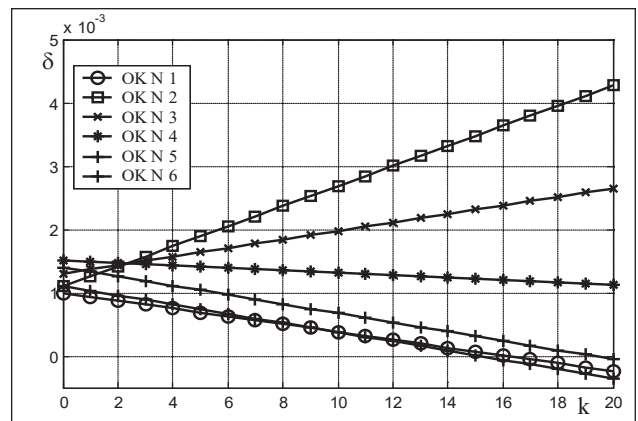


Рис. 5. Изменения расчетных значений тангенсов потерь ОК, определенных по усовершенствованной методике

описанной в [3], обладающей меньшей (для рассмотренной ситуации) погрешностью, чем [4]. При использовании методики 1 (рис. 3) в качестве эталонного принят ОК № 1 с незначительным, но не с самым малым изменением, что встречается на практике. Соответственно, расчетные значения тангенсов у контролируемых объектов меньше действительных (рис. 2) на значение прироста тангенса эталонного ОК. У ОК с неизменными действительными тангенсами будет фиксироваться их незначительное уменьшение (на такое же значение). Состояние эталонного ОК по этой методике нельзя оценить.

На рис. 3 также приведены расчетные тангенсы эталонного ОК № 1, определенные по методике, описанной в [3] (график обозначен 1а), которые показывают, что такая оценка в рассмотренной ситуации дает существенное занижение тангенса, такое же, как при использовании методики 2 (см. далее рис. 4).

Графики рис. 4 четко показывают ОК с сильным изменением тангенса, но расчетные значения тангенса существенно отличаются от действительных значений. Также легко определяется относительное состояние изоляции объектов контроля, но определить, насколько велики действительные значения тангенсов (что необходимо для выявления значений превышающих нормированные) и как быстро они нарастают, сложно. Распознать при таких погрешностях объект с малым нарастанием тангенса (начальные стадии развития дефектов) – трудновыполнимая задача. Реальные ситуации усложняются неравномерностью нарастания потерь, температурной зависимостью измеряемых параметров изоляции (разной даже для однотипных реальных ОК), невозможностью полностью отсеять внешние случайные и неслучайные влияния.

Методика СОУ [1] обладает легче прогнозируемой погрешностью (определяется состоянием эталонного ОК), и, учитывая, что в качестве эталонного выбирается объект в лучшем состоянии, погрешность этой методики будет меньше, чем у методик [3] и [4].

В итоге можно констатировать, что методики обработки без выделения отдельного эталона не дают преимуществ в точности определения результата, но требуют проведения существенно большего количества измерений (N_2 против N у методики 1). Погрешность указанных методик меньше при большем количестве контролируемых ОК и при меньшем суммарном изменении тангенсов (меньший рост значений действительных тангенсов, меньшее количество ОК с ухудшением состояния).

Усовершенствованная методика. Уменьшения погрешностей методик без выделения отдельного эталона можно достичь, следующим образом изменяя порядок расчета. Усреднение результатов измерений, проводимое в формуле (7) при определении расчетного тангенса, должно осуществляться не по всем ОК, а по выделенной меньшей группе объектов объемом N_m . Состав этой «опорной» группы определяется на предыдущем $(k-1)$ временном шаге измерений путем выбора ОК с наименьшими приростами расчетного тангенса относительно начальных значений: $(\delta_{pj(k-1)} - \delta_{j(0)})$. При таком подборе из усреднения исключаются ОК, несущие потенциальную опасность большого искажения расчетных результатов, что уменьшает ожидаемую погрешность (суммарный прирост тангенсов «опорной» группы меньше общего прироста).

Таким образом, при контроле N объектов на фазе определяют текущее расчетное значение тангенса проверяемого ОК:

$$\delta p_{i(k)} = -\frac{1}{Nm-1} \sum_{j=i}^{Nm} \Delta \delta_{ij(k)} + \delta_{i(0)} = \frac{1}{Nm-1} \sum_{j=i}^{Nm} (-\partial \delta_{ij(k)} + \delta_{j(0)}), \quad (8)$$

если i -й ОК входит в выделенную группу, если нет, то в (8), вместо N_{m-1} , следует писать N_m .

Поскольку вероятность одновременного значительного ухудшения состояния у многих ОК мала, «опорная» группа может содержать на несколько объектов меньше общего количества ОК. Чем больше ОК входит в группу, тем реже может изменяться ее состав.

Для существенного уменьшения количества проводимых измерений на каждом временном шаге (от $\approx N^2$ до $\approx N$) можно определять тангенс дифференциального угла двух ОК в (8) не прямым измерением, а расчетным путем, используя измерения тангенса с выделением отдельного эталонного объекта:

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

где l – индекс выделенного эталонного объекта.

При таком подходе проверку результатов и отклонения неудачных предлагается выполнять путем контроля отклонений при статистической обработке результатов повторяющихся измерений с выделенным эталоном.

На рис. 5 приведены графики изменения расчетных тангенсов, определенных по формуле (8), предлагаемой методики для модельной ситуации описанной ранее. При расчете выбиралась «опорная» группа из 4 ОК с наименьшим приростом на текущем временном шаге, тем самым было исключено искажающее влияние 2 и 3 ОК на результаты оценки (изменения на ОК 1 и 4 продолжают

влиять, обуславливая погрешность). Видно, что расчетные тангенсы лучше воспроизводят значения и тенденции изменения действительных тангенсов, чем в методике [3]. Положительный момент, по сравнению с методикой [1], состоит в том, что контролируются все ОК, включая эталон.

Выводы. Описанная усовершенствованная методика определения расчетных значений тангенса с усреднением по выделенной «опорной» группе ОК позволяет уменьшить негативное влияние объектов с ухудшающимися характеристиками на оценку тангенсов других ОК, что

является отличительной особенностью методик без выделения эталона, и снизить погрешность, сохраняя при этом возможность одновременного контроля всех ОК (что нельзя осуществить при стандартной методике с выделением эталона).

Использование расчетного способа определения тангенсов дифференциального угла двух ОК по результатам измерений с использованием выделенного эталона позволяет существенно снизить количество необходимых измерений (до значения, необходимого при традиционной методике с выделением эталона).

Список литературы:

1. СОУ-Н МПЕ 40.1.46.301:2006. Перевірка ізоляції трансформаторів струму 330-750 кВ під напругою: методичні вказівки. Київ: Мінпаливенерго, 2006. 27 с.
2. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. Москва: 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. Електротехніка 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. Електротехніка та Електромеханіка. 2016. № 5. С. 40–46.
6. Беляев В.К., Борщев П.И., Ободовский В.Д., Канивецкий Ю.В., Бехтев Г.В., Богданов С.Г., Масенко Д.А., Двойных В.П. Приборное обеспечение и опыт контроля изоляции конденсаторного типа под рабочим напряжением. Электрические сети и системы. 2012. № 4. С. 68–72.

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ІЗОЛЯЦІЇ ПІД ЧАС ВИМІРІВ У СИСТЕМАХ КОНТРОЛЮ ПІД РОБОЧОЮ НАПРУГОЮ

У статті розглянуто методики оброблення результатів вимірів тангенсу діелектричних утрат високовольтної ізоляції, що використовуються в системах контролю без виведення обладнання з експлуатації. Зіставлені методика з використанням призначення окремого еталонного об'єкта й методики, що не використовують призначення окремих еталонних об'єктів. Показано, що застосування методик без виділення окремого еталонного об'єкта може призводити до суттєвих ускладнень в оцінюванні результатів контролю ізоляції. Пропонуються вдосконалення методики оброблення, що зменшують похибки методик і трудомісткість вимірювань.

Ключові слова: діагностика, високовольтна ізоляція, методика оброблення, похибка, тангенс кута діелектричних втрат.

METHOD OF DETERMINING THE DIELECTRIC PARAMETERS OF INSULATION AT MEASUREMENTS BY MONITORING SYSTEM UNDER WORKING VOLTAGE

Features of the data processing procedures of multiple measurements of the dielectric loss tangent of the high-voltage insulation, which are based on the comparison method, were considered. Three procedures were compared: the one procedure uses an assignment of a particular standard object for comparison, and two procedures don't use assignments of the special standard objects. Improvements in processing techniques which reduce errors and reduce the amount of measurements are proposed. The study results are useful in monitoring and diagnostic of basic insulation of current transformers or high-voltage bushings.

Key words: bushing, current transformer, diagnostic, data processing procedure, dielectric loss, high-voltage insulation, monitoring.