

В.К. Беляев, Е.Н. Паненко

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ПРИ МНОЖЕСТВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ В СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Розглянуто особливості методик обробки результатів множинних вимірів тангенсу діелектричних втрат високовольтної ізоляції, заснованих на методі порівняння. Проаналізовано відомі методики визначення тангенсу втрат з призначенням окремого еталонного об'єкта і без призначення такого еталона. Отримано вирази для визначення методичних похибок. Проведено порівняння і показано, що застосування методик обробки без призначення окремого еталонного об'єкта може призводити до суттєвих ускладнень в оцінці результатів контролю ізоляції. Запропоновано удосконалення методик обробки, що зменшують названі похибки методик і трудомісткість вимірювань. Бібл. 8, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: діагностика, високовольтна ізоляція, методика обробки, похибка, тангенс кута діелектричних втрат, трансформатор струму.

Рассмотрены особенности методик обработки результатов множественных измерений тангенса угла диэлектрических потерь высоковольтной изоляции, основанных на методе сравнения. Проанализированы известные методики определения тангенса потерь с выделением отдельного эталонного объекта и без выделения такого эталона. Получены выражения для определения методических погрешностей. Проведено сравнение и показано, что применение методик обработки без выделения отдельного эталонного объекта может приводить к существенным сложностям в оценке результатов контроля изоляции. Предложены усовершенствования методик обработки, уменьшающие указанные погрешности методик и трудоемкость измерений. Библ. 8, табл. 1, рис. 5.

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

Введение. В энергокомпаниях Украины внедряются технологии контроля состояния высоковольтной изоляции измерительных трансформаторов тока без вывода из эксплуатации (под рабочим напряжением) [1-5]. На настоящий момент, основным методом такого контроля для маслонаполненных трансформаторов тока (изоляция конденсаторного типа) следует считать дифференциальный контроль, при котором среди всех проверяемых трансформаторов тока (далее обозначаются как объекты контроля – ОК) одной фазы выделяются «эталонные», имеющие наилучшее состояние изоляции, а состояние других оценивают по изменению тангенса угла диэлектрических потерь относительно выделенного эталона [3, 6]. Можно выделить технологии периодического и непрерывного контроля, различающиеся, по сути, частотой измерения параметров изоляции объекта контроля (ОК), которая является следствием степени автоматизации процесса измерений [3, 5]. В обеих технологиях могут использоваться сходные средства (мостовые, векторные измерители) и методы измерений.

Для повышения эффективности контроля в таких технологиях предложено [2, 5] использовать множественные измерения, при проведении которых предполагается, что каждый 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. Указанные методики обработки результатов таких измерений отличаются от обработки при выделении эталона использованием различного рода усреднений по всем результатам, что естественно будет приводить к уменьшению влияния случайных отклонений вызванных, например, кратковременными помехами.

В то же время, в [7], указано на возможность возникновения при такой обработке дополнительных ошибок, не возникающих при обработке традиционных измерений с выделением специального эталонного объекта.

Цель работы – определение погрешности методики обработки результатов множественных измерений тангенса угла потерь изоляции без выделения эталонного объекта, разработка способов снижения погрешности.

Основы методик обработки результатов измерений тангенса потерь изоляции. В основе дифференциального контроля лежит мостовой метод сравнения с образцовым объектом (эталон) [3, 6]. Используя мост переменного тока (в последнее время используют высокоточные векторные измерители, например [1]), измеряют тангенс ($tg\delta_{meg}$) разницы углов диэлектрических потерь ОК (δ_{ok}), подключенного к входу «Х» и угла потерь эталона (δ_e), подключенного к входу «0», так что (ввиду малости реальных значений углов потерь можно не учитывать отличие тангенса разницы от разницы тангенсов):

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

Проблема заключается в том, что действительное значение тангенса потерь эталонного объекта, используемое как база для отсчета, во время измерения (контроля) 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)

© В.К. Беляев, Е.Н. Паненко

следующим образом (для упрощения здесь и далее вместо $tg\delta$ 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 [3], 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 [3, 6]. 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.

Согласно методике 1, описанной в СОУ-Н МПЕ [3], измерения проводят с выделенным эталонным ОК (i – индекс эталона). Используя полученное по (3) приращение, определяют текущее расчетное значение тангенса проверяемого ОК [3, 6]:

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

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 (0,005...0,008), нормированными в [3] (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 $\delta p_{j(k)}$ (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 [5]. Действительно, для каждого проверяемого ОК при неизменном эталоне получаем свой, отличный от других результат для $\Delta\delta_{ij(k)}$

и как следствие – разные значения расчетного тангенса $\delta p_{i(k)}$ для одного и того же i -го эталона.

Чтобы получить возможность контроля эталонного ОК, в Днепровской энергосистеме [5] предложено вместо одного конкретного измеренного значения $\Delta\delta_{ij(k)}$ использовать в (5) усредненное, по всем полученным значениям для N контролируемых объектов на фазе, приращение:

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

где i – индекс эталона.

Методики 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 [2, 7]. 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.

Методика 2, используемая на девяти подстанциях Донбасской энергосистемы [5]. При контроле N объектов на фазе, предлагается при определении текущего значения расчетного тангенса каждого ОК вместо формул (4) и (5) использовать следующие выражения, построенные по аналогии с формулой (7):

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

где индекс iav означает усредненное по всем ОК (кроме i -го) значение.

Объединяем (8) в одно выражение и подставляем определение (3):

$$\begin{aligned} \delta p_{i(k)} &= -\frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N \Delta\delta_{ij(k)} + \delta_{i(0)} = \\ &= \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N (-\partial\delta_{ij(k)} + \delta_{j(0)}) = -\partial\delta_{iav(k)} + \delta_{iav(0)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Полученное выражение показывает (сравним с (6)), что, согласно данной методики, расчетное значение тангенса потерь представляет собой среднее всех парных результатов (каждый ОК с каждым, кроме, как сам с собой) проведенных по методике 1.

Методика 3, предложенная в [2] к использованию в системе непрерывного контроля на подстанции 330 кВ Днепровской энергосистемы. Согласно [2], при контроле N объектов одноименной фазы сначала определяются промежуточные значения тангенса ($\delta l_{ij(k)}$) для каждого i -го ОК при парных измерениях с разными эталонами j по формуле сходной с (6), где вместо значения тангенса эталона в начале контроля, используется расчетное значение тангенса i -го ОК полученное в предыдущем по времени измерении. Для определения окончательного расчетного значения для i -го ОК берется среднее всех промежуточных

значений для этого ОК при разных эталонах j . В формульном выражении описанный алгоритм можно записать так:

$$\delta 1_{ji(k)} = \delta p_{j(k-1)} - \partial \delta_{ij(k)}, \quad \delta p_{i(k)} = \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N \delta 1_{ji(k)}. \quad (10)$$

Последние формулы запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} \delta p_{i(k)} &= \frac{1}{N-1} \sum_{j \neq i}^N (-\partial \delta_{ij(k)} + \delta p_{j(k-1)}) = \\ &= -\partial \delta_{iav(k)} + \delta p_{iav(k-1)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Сравнивая выражения (11) и (9) видим, что алгоритмы обработки результатов для определения расчетного значения тангенса двух последних методик, без выделения отдельного эталона, отличаются только значениями, взятыми за базовые, от которых отсчитываются приращения. Во второй методике за базовое берется среднее всех значений тангенсов ОК при взятии на контроль, в третьей используется среднее всех расчетных значений в предыдущем измерении. В обеих методиках применяют усреднение измеренных значений тангенса дифференциального угла.

Сравнение погрешностей методик. Интерес представляет анализ методических погрешностей, возникающих в результате применения для расчета тангенса потерь приведенных выше формул, вместо точной формулы (2). Под методической погрешностью конкретной методики понимаем отличие расчетных значений тангенса ОК, получаемых при обработке согласно соответствующему выражению, от действительных его значений:

$$D_{j(k)} = \delta p_{j(k)} - \delta_{j(k)}.$$

Представляя каждую методику как отдельную модель для определения выходной величины (расчетного тангенса), данную погрешность можно рассматривать как погрешность адекватности модели, показывающую минимально возможную погрешность, при использовании данной модели-методики [8]. Полу-

ченные выражения для определения $D_{j(k)}$ всех рассмотренных методик приведены в таблице. Для характеристики качества методик целесообразно провести анализ чувствительности, определив соответствующие коэффициенты чувствительности (влияния), которые связывают изменение каждой входной величины с результирующим изменением выходной. В таблице приводятся выражения коэффициентов $b_{i(k)}$, характеризующих чувствительность изменения результирующего расчетного значения тангенса j ОК в k момент $\varepsilon \delta p_{j(k)}$ к изменению действительного значения тангенса каждого i ОК $\varepsilon \delta_{i(k)}$:

$$\varepsilon \delta p_{j(k)} = \sum_{k=1}^k \left(\sum_i b_{i(k)} \varepsilon \delta_{i(k)} \right) + \sum_i b_{i(0)} \varepsilon \delta_{i(0)}, \quad i, j = 1 \dots N. \quad (12)$$

Здесь приведено общее выражение связи. Очевидно, что составляющие, связанные с моментами времени от 1 до $k-1$, появляются только при использовании методики 3. Предполагая малость изменения входных величин, коэффициенты чувствительности определялись на основе производных соответствующих функциональных связей выходной величины с входными [8]. Коэффициенты последней составляющей приведенного выражения ($k=0$) характеризуют чувствительность к ошибкам при принятии на контроль.

Приведенные в табл. 1 выражения показывают, что наибольшее влияние на расчетный результат для какого-либо проверяемого ОК оказывают значения последних измерений на этом же ОК ($b_{j(k)}=1$). Значения тангенсов других ОК не влияют на результат у проверяемого ОК в случае использования методики 1, но могут существенно влиять при использовании других методик. Это влияние обратно пропорционально количеству ОК.

Отрицательные знаки коэффициентов влияния $b_{i \neq j(k)}$ указывают, что любое повышение значения тангенса на каком-либо ОК приведет к уменьшению значений расчетных тангенсов на других ОК.

Таблица 1

Выражения погрешностей рассмотренных методик и коэффициенты чувствительности (влияния)

№ методики, формула расчета	Погрешность $D_{j(k)}$:	Коэффициенты чувствительности
1, (4), i – эталон	$-(\delta_{i(k)} - \delta_{i(0)})$	$b_{j(k)} = 1, b_{i(k)} = -1, b_{i(0)} = 1$
2, (9)	$-\frac{1}{N-1} \sum_{i \neq j}^N (\delta_{i(k)} - \delta_{i(0)})$	$b_{j(k)} = 1, b_{i \neq j(k)} = -1/(N-1), b_{i \neq j(0)} = 1/(N-1)$
3, (11)	$-\frac{1}{N-1} \sum_{i \neq j}^N (\delta_{i(k)} - \delta p_{i(k-1)})$	$b_{j(k)} = 1, b_{i \neq j(k)} = -1/(N-1), b_{j(k-1)} = -1/(N-1),$ $b_{i \neq j(k-1)} = 1/(N-1)^2, \dots, b_{j(0)} \rightarrow 0$
4, (13)	$-\frac{1}{Nm-1} \sum_{i \neq j}^{Nm} (\delta_{i(k)} - \delta_{i(0)})$	$b_{j(k)} = 1, b_{i \neq j(k)} = -1/(Nm-1), b_{i \neq j(0)} = 1/(Nm-1).$

К примеру, предположим, что произошло изменение на одном («поврежденном») ОК. Пусть до k -го момента времени никаких изменений не происходило. В k -й момент времени на m -м ОК скачком изменился тангенс потерь на величину $\varepsilon \delta_{m(k)} = \delta_{m(k)} - \delta_{m(k-1)} = d$, на

остальных ОК изменений тангенса не было ($\varepsilon \delta_{j \neq m(k)} = 0$) и 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, n . В соответствии со значениями коэффициентов влияния, по (12) получаем изменения

расчетного тангенса, а по выражениям в табл. 1 определяем погрешности $D_{j(k)}$:

- По методике 1: для «поврежденного» ОК $\varepsilon \delta p_{m(k)} = d$, $D_{j(k)} = 0$; для других ОК $\varepsilon \delta p_{j \neq m(k)} = 0$, $D_{j \neq m(k)} = 0$.
- По методике 2: для «поврежденного» ОК $\varepsilon \delta p_{m(k)} = d$, $D_{j(k)} = 0$; для других ОК $\varepsilon \delta p_{j \neq m(k)} = -d/(N-1)$, $D_{j \neq m(k)} = -d/(N-1)$.
- По методике 3: для «поврежденного» ОК в момент k : $\varepsilon \delta p_{m(k)} = d$, $D_{j(k)} = 0$; в следующий момент $\varepsilon \delta p_{j \neq m(k+1)} = -d/(N-1)$, $D_{j \neq m(k+1)} = -d/(N-1)$; для других ОК в момент k : $\varepsilon \delta p_{j \neq m(k)} = -d/(N-1)$, $D_{j \neq m(k)} = -d/(N-1)$; в следующий момент $\varepsilon \delta p_{j \neq m(k+1)} = -d/(N-1)^2$, $D_{j \neq m(k+1)} = -d(N-2)/(N-1)^2$.

Как видим, при использовании методик 2 и 3 отличия расчетных значений тангенса от действительных его значений ($\varepsilon \delta p_{j(k)} \neq \varepsilon \delta j_{(k)}$, $D_{j(k)} \neq 0$) появляются для «здоровых» ОК. При использовании методики 3 расчетные тангенсы отличны от действительных не только у «здоровых», но и у «поврежденного» ОК – не в момент изменения, а начиная со следующего измерения.

При реальном контроле множества трансформаторов тока возможны ситуации, 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 [3]. В таких случаях влияние изменения тангенсов одного ОК на другие при использовании методик 2 или 3, затрудняет оценку состояния изоляции.

Для примера рассмотрим модельную ситуацию контроля нескольких ОК ($N=6$, в [5] рекомендовано использовать не более 6 ОК в связи с трудоемкостью измерений). На рис. 1 показана идеализированная картина изменения действительных значений тангенсов изоляции 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. 2-4 приведены графики изменения расчетных тангенсов, определенных соответственно по формулам (4), (9) и (11), отвечающим методикам 1, 2 и 3. При использовании методики 1 (рис. 2) 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. 1) 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 не оценивается.

На рис. 2 также приведены расчетные тангенсы эталонного ОК №1, определенные по формуле (7)

(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. 3).

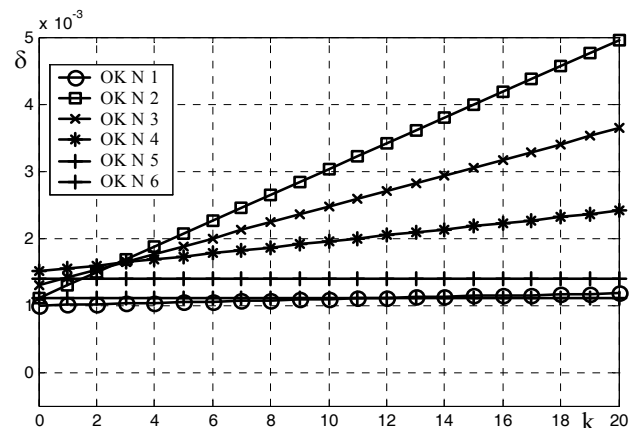


Рис. 1. Изменения действительных значений тангенсов потерь изоляции ОК

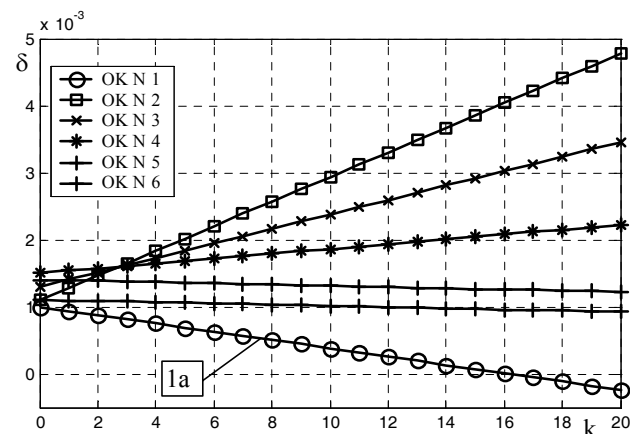


Рис. 2. Изменения расчетных значений тангенсов потерь изоляции ОК, определенных по методике 1

Графики рис. 3 и 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) трудно-выполнимая задача.

Следует отметить, что при использовании методики 3 отличие расчетных значений тангенсов от действительных больше, чем для методики 2. Методика 1 обладает легче прогнозируемой погрешностью (определяется состоянием эталонного ОК). Учитывая, что в качестве эталонного выбирается объект в лучшем состоянии, погрешность методики 1 будет меньше чем у методик 2 и 3.

Сложности оценки действительных значений тангенсов и тенденций их изменения по методикам 2 и 3 обусловлены зависимостью погрешности $D_{j(k)}$ не только от количества контролируемых ОК, но и от

суммарного прироста изменившихся действительных тангенсов (см. выражения в табл. 1), значение которого неизвестно заранее. Реальные ситуации усложняются неравномерностью нарастания потерь, температурной зависимостью измеряемых параметров изоляции (разной даже для однотипных реальных ОК), невозможностью полностью отсеять внешние случайные и не случайные влияния.

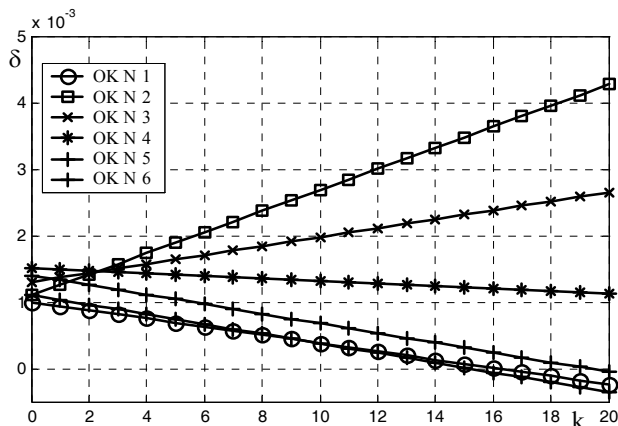


Рис. 3. Изменения расчетных значений тангенсов потерь изоляции ОК, определенных по методике 2

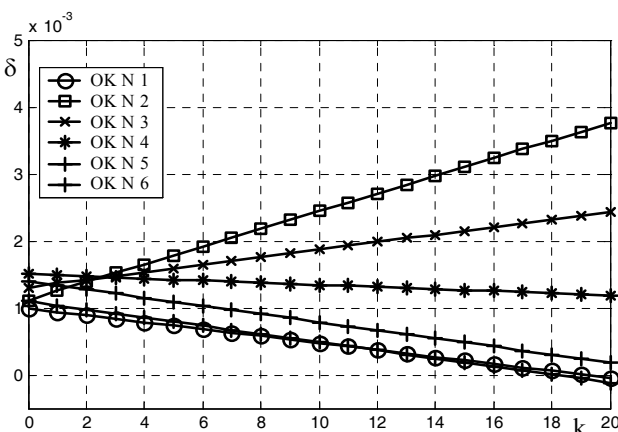


Рис. 4. Изменения расчетных значений тангенсов потерь изоляции ОК, определенных по методике 3

Полученные выражения $D_{j(k)}$ позволяют оценить погрешность (заниженное значение реальной методической погрешности) после получения результата о увеличении расчетных тангенсов у ОК ($\delta p_{j(k)}$), предположив, что прирост действительных тангенсов соответствует приросту расчетных ($\delta_{j(k)} - \delta_{j(0)} = \delta p_{j(k)} - \delta_{j(0)}$). Также выражения позволяют оценивать ожидаемую погрешность определения расчетных тангенсов в системах контроля, делая предположения об увеличении действительных тангенсов у нескольких ОК.

В итоге можно констатировать, что методики обработки без выделения отдельного эталона (методики 2 и 3) не дают преимуществ в точности определения результата, но требуют проведения существенно большего количества измерений (N^2 против N у методики 1).

Совершенствование методик. Уменьшения погрешностей методик без выделения отдельного эталона можно достичь, изменив порядок расчета следующим образом. Усреднение результатов измерений,

проводимое в формулах (7), (9) или (11) при определении расчетного тангенса, должно осуществляться не по всем ОК, а по выделенной меньшей группе объектов объемом Nm . Состав этой «опорной» группы определяется на предыдущем $(k-1)$ временном шаге измерений, путем выбора ОК с наименьшими приростами расчетного тангенса относительно начальных значений: $(\delta p_{j(k-1)} - \delta_{j(0)})$. При таком подборе из усреднения исключаются объекты несущие потенциальную опасность большого искажения расчетных результатов, что уменьшает ожидаемую погрешность (суммарный прирост тангенсов «опорной» группы меньше общего прироста). Таким образом, например, формулы (7), (9) при измененной методике будут записаны:

$$\begin{aligned} \delta p_{i(k)} &= -\frac{1}{Nm-1} \sum_{j \neq i}^{Nm} \Delta \delta_{ij(k)} + \delta_{i(0)} = \\ &= \frac{1}{Nm-1} \sum_{j \neq i}^{Nm} (-\partial \delta_{ij(k)} + \delta_{j(0)}), \end{aligned} \quad (13)$$

если i -й ОК входит в выделенную группу, если нет — то в (13) вместо $Nm-1$ следует писать Nm .

Учитывая малую вероятность одновременного значительного ухудшения состояния у многих ОК, «опорная» группа может содержать всего 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 (7), (9), (11), (13) 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 определении $\partial \delta_{ij(k)}$ теряется возможность дополнительной проверки результата путем сравнения результатов «прямых» и «обратных» измерений ($\partial \delta_{ij(k)} \approx -\partial \delta_{ji(k)}$), предлагаемой в [2, 7]. Отметим, что указанную проверку при необходимости можно, без потери эффективности отклонения неудачных результатов, заменить контролем отклонений при статистической обработке результатов повторяющихся измерений с выделенным эталоном.

На рис. 5 приведены графики изменения расчетных тангенсов, определенных по формуле (13), усовершенствованной методики для модельной ситуации описанной ранее. При расчете выбиралась «опорная» группа из 4 ОК (66 % общего количества ОК) обладающих 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 методиках 2 и 3. В отличие от методики 1 контролируются все ОК, включая эталон.

Погрешность методик без выделения эталона меньше при большем количестве контролируемых ОК и при меньшем суммарном изменении тангенсов (меньший рост значений действительных тангенсов, меньшее количество ОК с ухудшением состояния).

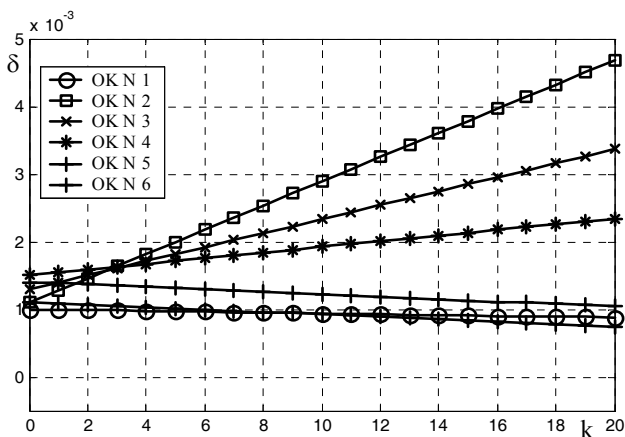


Рис. 5. Изменения расчетных значений тангенсов потерь ОК, определенных по усовершенствованной методике

Выводы. Отличительной особенностью методик без выделения эталона является влияние изменения тангенса потерь одного из ОК на результаты оценки тангенсов других ОК, что приводит к сложно прогнозируемым методическим погрешностям, которые затрудняют оценку действительного значения тангенса и могут вызывать ошибки при оценке состояния объектов контроля.

Появления 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.

Предложенное усовершенствование методик определения расчетных значений тангенса, с усреднением по выделенной «опорной» группе ОК, позволяет уменьшить негативное влияние объектов с ухудшающимися характеристиками на оценку тангенсов других ОК и снизить погрешность, сохраняя при этом возможность одновременного контроля всех ОК.

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).

В заключение отметим, что сделанные выводы справедливы как для ситуаций контроля основной изоляции трансформаторов тока, так и для случаев контроля изоляции высоковольтных вводов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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 изоля-

ции конденсаторного типа под рабочим напряжением // Электрические сети и системы. – 2012. – №4. – С. 68-72.

2. 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 і електромеханіка. – 2010. – №2. – С. 54-56. doi: 10.20998/2074-272X.2010.2.14.

3. СОУ-Н МПЕ 40.1.46.301:2006. Перевірка ізоляції трансформаторів струму 330-750 кВ під напругою. Методичні вказівки. – К.: Мінпаливенерго, 2006.

4. Стогний Б.С., Пилипенко Ю.В., Сопель М.Ф., Тутик В.Л. Аппаратно-программный комплекс непрерывного диагностирования основной изоляции трансформаторов тока и высоковольтных вводов силовых трансформаторов // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. – 2010. – Вип. 26. – С. 38-45.

5. 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.

6. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.

7. Беляев В.К., Паненко Е.Н. Особенности методов определения параметров изоляции в системах контроля трансформаторов тока под рабочим напряжением // Вісник ХНТУСГ. Технічні науки. – 2014. – №153. – С. 122-124

8. Беляев В.К., Ободовский В.Д., Паненко Е.Н. Анализ чувствительности диагностических моделей для контроля состояния обмоток трансформатора под нагрузкой // Технічна електродинаміка. – 2013. – №4. – С. 81-87.

REFERENCES

1. Beliaev V.K., Borshchev P.I., Obodovskii V.D., Kanivetskii Iu.V., Bekhtev G.V., Bogdanov S.G., Masenko D.A., Dvoynikh V.P. Instrumentation and experience of monitoring of capacitor type insulation under operating voltage. *Electrical networks and systems*, 2012, no.4, pp. 68-72. (Rus).

2. Sakhno A.A. Measurement algorithm of the dielectric loss tangent of basic insulation of current transformers and bushings 330-750 kV under monitoring under a working voltage. *Electrical engineering & electromechanics*, 2010, no.2, pp. 54-56. (Rus.) doi: 10.20998/2074-272X.2010.2.14.

3. SOU-H MPE 40.1.46.301:2006. *Perevirka izoliatsii transformatoriv strumu 330-750 kV pid napruhoiu. Metodychni vказivky* [Standard of organization H MPE 40.1.46.301:2006. Check of insulation of current transformer 330-750 kV under voltage. Methodical instructions]. Kyiv, Minpalyvenerho Publ., 2006. (Ukr).

4. Stognii B.S., Pilipenko Iu.V., Sopel' M.F., Tutik V.L. Hardware-software monitoring complex of insulation of current transformers and high-voltage bushings of power transformers. *Works of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2010, is.26, pp. 38-45. (Rus).

5. Shinkarenko G.V., Onishchenko V.A., Ornatskii O.A. Technologies of measurement of insulation parameters of oil-filled transformers 330-750 kV under operating voltage. *Electrical networks and systems*, 2012, no.3, pp. 67-71. (Rus.)

6. Svi P.M. *Metody i sredstva diagnostiki oborudovaniia vysokogo napriazheniia* [Methods and diagnostic tools of the equipment of a high voltage]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1992. 240 p. (Rus).

7. Beliaev V.K., Panenko H.N. Features of definition methods of insulation parameters in the monitoring systems of current transformers under working voltage. *Bulletin of Kharkiv Petro*

Vasylenko National Technical University of Agriculture. Series: Technical science, 2014, no.153, pp. 122-124 (Rus).

8. Beliaev V.K., Obodovskii V.D., Panenko H.N. The analysis of sensitivity of diagnostic models for the monitoring of a transformer windings condition under load. *Tekhnichna elektrody-namika*, 2013, no.4, pp. 81-87. (Rus).

Поступила (received) 11.06.2016

Беляев Виталий Константинович¹, к.т.н., доц.,

Паненко Елена Николаевна², ассистент,

¹ Научно-производственное предприятие «ОСТ»,
01054, Киев, ул. Бульварно-Кудрявская, 33-Д,

² Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»,
03056, Киев, пр. Победы, 37,
e-mail: bel_vk@ua.fm

V.K. Beliaev¹, H.N. Panenko²

¹ Scientific Industrial Enterprise «OST»,
33-D, Bulvarno-Kudryavskaya Str., Kyiv, 01054, Ukraine.

² National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic
Institute»,
37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

**Determination of insulation parameters of current
transformers at multiple measurements in monitoring
systems under working voltage.**

*Features of the data processing procedures of multiple meas-
urements of the dielectric loss tangent of the high-voltage insu-
lation, which are based on the comparison method, were*

*considered. Three procedures were compared: the one proce-
dure uses an assignment of a particular standard object for
comparison, and two procedures don't use assignments of the
special standard objects. Expressions of methodical errors of
studied procedures were obtained. Analysis and calculations,
which use the obtained expressions were made. Evaluations
showed that an influence of a change of the tangent of dielectric
loss of one from the monitoring objects on results of estimation
of the tangents of other monitoring objects is the distinctive
feature of the procedures without assignment of the standard
object. Errors of these procedures more than errors of the tradi-
tional procedure, with assignment of the standard object. The
study demonstrated that procedures without assignment of stan-
dard objects lead to difficultly predictable methodological er-
rors, which hinder to estimate the actual value of the loss tan-
gent and to estimate outcomes of the monitoring, by means com-
paring with allowable values. Moreover, the decrease of estima-
tions of loss tangents of all objects, as a result of occurrence of
at least one the object with strongly bad parameters, hides oc-
currence of other unsuccessful objects with smaller deviations
and makes difficult recognition of such deviations at early
stages. Improvements in processing techniques which reduce
earlier specified 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. References 8, tables 1, figures 5.*

Key words: high voltage insulation, diagnostics, data process-
ing procedure, processing procedure error, dielectric loss
tangent, current transformer.