

## АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЯ ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ОСНОВНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА И ВВОДОВ 330-750 КВ ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ КОНТРОЛЕ, ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

*У статті розглянуто розроблений алгоритм перехресного вимірювання тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції трансформаторів струму та високовольтних ввідів 330-750 кВ, та представлено результати використання цього алгоритму у системі безперервного контролю під робочою напругою в умовах експлуатації на підстанції 330 кВ.*

*В статті описан розробаний алгоритм перекрестного измерения тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции измерительных трансформаторов тока и высоковольтных вводов 330-750 кВ, а также представлены результаты использования этого алгоритма в системе непрерывного контроля, под рабочим напряжением в условиях эксплуатации на подстанции 330 кВ.*

### ВВЕДЕНИЕ

С целью повышения надежности и качества электроснабжения, многие энергокомпании, в наше время, начинают внедрение систем непрерывного контроля характеристик основной изоляции измерительных трансформаторов тока (ТТ) и высоковольтных вводов (ВВ) 330-750 кВ под рабочим напряжением. Непрерывный контроль имеет ряд преимуществ, которые позволяют более точно диагностировать состояние оборудования подстанций. В мире существует несколько производителей систем непрерывного контроля (СНК). Большинство из представленных на рынке систем базируется на малоэффективном методе балансового контроля [1], где в качестве основного диагностического критерия, используется изменение действуюющего значения тока небаланса, полученного геометрическим суммированием векторов токов проводимости основной изоляции, объектов трехфазной группы. В более редких случаях используются другие методы, такие как контроль за изменением проводимости изоляции, измерение тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции ( $\text{tg}\delta_1$ ) и емкости основной изоляции ( $C_1$ ) [1].

Наиболее эффективным критерием диагностики основной изоляции ТТ и ВВ является  $\text{tg}\delta_1$ . Во-первых, тангенс угла диэлектрических потерь основной изоляции, закреплён в нормативных документах [2], как критерий диагностики при периодическом контроле, во-вторых, имеется достаточно большой опыт отбраковки оборудования по этому критерию и опыт по его измерению. Однако, измерение  $\text{tg}\delta_1$ , в условиях эксплуатации, под рабочим напряжением, вызывает трудности, прежде всего связанные, с высоким уровнем помех на подстанции. Также, в эксплуатации, существует ряд дополнительных факторов, которые могут сделать результаты измерения этого важного параметра абсолютно непригодными для диагностики состояния оборудования [3].

В статье представлена разработанная методика измерения  $\text{tg}\delta_1$ , для систем непрерывного контроля состояния основной изоляции ТТ и ВВ под рабочим напряжением, которая позволяет более достоверно измерять  $\text{tg}\delta_1$  при контроле под рабочим напряжением в условиях эксплуатации.

### МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Утвержденным в энергосетях методом измерения  $\text{tg}\delta_1$  и  $C_1$ , при периодическом контроле, является измерение мостом переменного тока [4]. Данный метод требует наличие эталонного объекта, например, объект одноименной фазы с известным  $\text{tg}\delta_1$  и  $C_1$  (трансформатор тока, ввод, конденсатор связи). Для СНК, наиболее прогрессивным и дешевым, по сравнению с мостовым методом, является метод векторного сравнения, в котором по аналогии с мостовым методом используется эталонный и контролируемый объект. Для определения  $\text{tg}\delta_1$  изоляции используется синхронная запись токов эталонного и контролируемого объекта, с последующим вычислением разности начальных фаз первых гармоник [1]. Основной проблемой для данного метода является необходимость достоверного опорного объекта. Таким объектом может быть другой ТТ и ВВ соответствующей фазы или напряжение с измерительной обмотки ТН соответствующей фазы. Для повышения точности и контроля за изменением состояния опорных объектов необходимо использовать алгоритм перекрестного измерения, который подразумевает использование каждого объекта, одноименной фазы, как в качестве эталонного, так и в качестве контролируемого объекта. В результате такого алгоритма получается  $N^2$  величин относительных  $\text{tg}\delta$  (где  $N$  – количество объектов контроля присоединенных к одной фазе). На рис. 1 представлена матрица результатов измерения, где номера строк (второй индекс) обозначают контролируемые объекты, а номера столбцов (первый индекс) эталонные. Например,  $\text{tg}\delta_{34}$  – эталонным выступал ТТ 3-й группы, а ТТ 4-й группы как контролируемый.

	$\text{tg}\delta_{10}$	...	$\text{tg}\delta_{(n-2)0}$	$\text{tg}\delta_{(n-1)0}$
$\text{tg}\delta_{01}$		...	$\text{tg}\delta_{(n-2)1}$	$\text{tg}\delta_{(n-1)1}$
$\text{tg}\delta_{02}$	$\text{tg}\delta_{12}$		$\text{tg}\delta_{(n-2)2}$	$\text{tg}\delta_{(n-1)2}$
...	...	...		$\text{tg}\delta_{(n-1)-(n-2)}$
$\text{tg}\delta_{0(n-1)}$	$\text{tg}\delta_{1(n-1)}$	...	$\text{tg}\delta_{(n-2)(n-1)}$	

Рис. 1. Матрица результатов измерения относительных  $\text{tg}\delta_1$  объектов

После обработки этих данных вычисляются истинные значения  $\text{tg}\delta_1$  каждого объекта. Алгоритм вычисления базируется на достаточно простом, но на-

дежном предположении о том, что дефект не может развиваться одновременно в изоляции хотя бы 50 % всех контролируемых системой объектов одноименной фазы. В общем виде, разработанный алгоритм представлен на рис. 2.

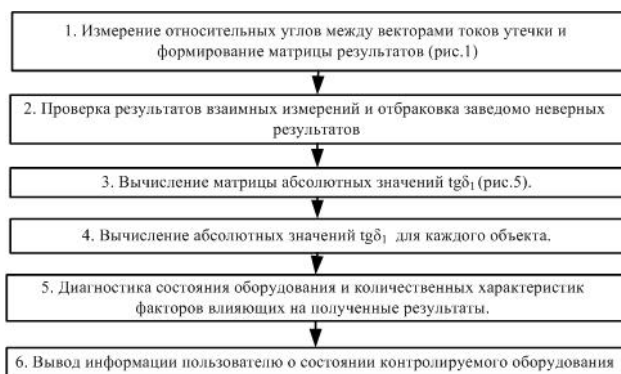


Рис. 2. Общий вид алгоритма диагностики

**Этап 1.** Измерение относительных углов между векторами токов должно проводиться быстродействующим синхронным аналого-цифровым преобразователем (АЦП). Теоретически установлено и подтверждено на практике, что достаточным является частота дискретизации АЦП 30 кГц, для получения средней погрешности измерений угла не более 0,0002 рад. На рис. 3 представлен график расчетной средней погрешности измерения  $tg\delta_1$ , а точками на нем нанесены результаты практического измерения  $tg\delta_1$  с различным количеством точек дискретизации на период тока промышленной частоты 50 Гц.

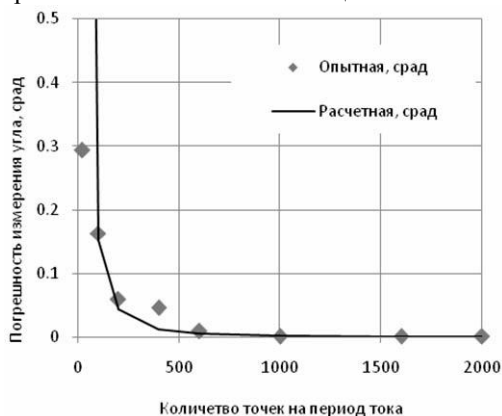


Рис. 3. График зависимости расчетной погрешности измерения  $tg\delta_1$  от числа точек дискретизации на период промышленной частоты 50Гц с нанесенными точками, результатов измерений полученных опытным путем средней погрешности (по результатам 50 измерений)

Однако с учетом необходимости фильтрации сигнала, условий конкретной подстанции и длины измерительных кабелей частота дискретизации АЦП может быть увеличена.

Важным замечанием, является то, что практически невозможно получить достоверный результат измерения  $tg\delta_1$ , используя только один период тока, на рис. 4, представлена гистограмма, полученная экспериментальным путем. На ней показано распределение погрешности измерения при разном количестве анализируемых периодов.

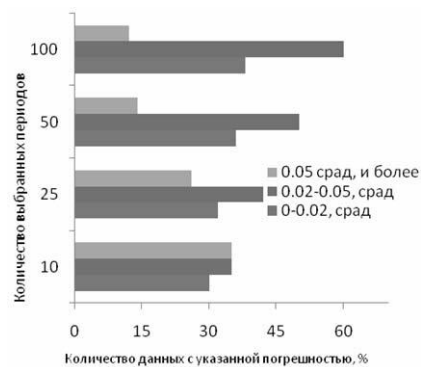


Рис.4. Гистограмма распределения погрешностей измерения угла между векторами токов проводимости изоляции двух объектов при использовании различного количества анализируемых периодов тока промышленной частоты 50 Гц

Таким образом, для получения межвекторного угла с погрешностью не более 0,05 град, необходимо анализировать не менее 50 периодов тока проводимости изоляции для исключения случайных погрешностей.

Точность и разрядность АЦП, играют немаловажную роль при измерении угла. Опытным путем было установлено влияние разрядности АЦП на величину погрешности при измерении, результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Влияние разрядности АЦП на погрешности при измерении  $tg\delta_1$

Разрядность АЦП, бит	Абсолютная погрешность, % ед.	Относительная погрешность (при $tg\delta = 0.2\%$ ), %
10	0,2	100
12	0,039100065	19,55003
14	0,00619212	3,09606
16	0,0006347	0,31735
24	4,09371E-05	0,020469

Из табл. 1 видно, что желательно использовать АЦП с разрядностью 14-16 бит. Менее чувствительные АЦП будут вносить в результат достаточно большую погрешность (20 % и более). АЦП с разрядностью 24 бита имеют большую стоимость, в сравнении, с 16-ти разрядными, что делает их применение не оправданными

**Этап 2.** Сравнение результатов взаимных измерений, т.е. значения  $tg\delta_{01}$  и  $tg\delta_{10}$  должны быть равны по модулю, с заданной погрешностью, и отличаться по знаку. Если результаты не проходят такую проверку, то их места в матрице заполняются нулями т.к. считается, что при данном измерении результаты были подвержены влиянию сторонних факторов и не могут быть учтены при диагностике.

**Этап 3.** Рассчитывается матрица абсолютных значений  $tg\delta_1$  по формулам (1), показано на примере расчета для первого объекта, имеющего индекс "0".

$$\begin{aligned}
 tg\delta_0 &= tg\delta_{1p} - tg\delta_{01}, \\
 tg\delta_0 &= tg\delta_{2p} - tg\delta_{02}, \\
 tg\delta_0 &= tg\delta_{(n-1)p} - tg\delta_{0(n-1)},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где  $n$  – число объектов контроля одноименной фазы;  $p$

– индекс, означающий результат прошлого измерения.

В общем виде алгоритм будет выглядеть:

$$\begin{aligned} x &= 0 \dots n-1, \\ m &= 0 \dots n-1, \\ \text{tg}\delta_x &= \text{tg}\delta_{m_p} - \text{tg}\delta_{xm}. \end{aligned} \quad (2)$$

В результате получится матрица абсолютных значений, имеющая вид рис. 5, где столбец значений соответствует одному объекту.

$\text{tg}\delta_{0-0}$	$\text{tg}\delta_{1-0}$	...	$\text{tg}\delta_{(n-1)-0}$
$\text{tg}\delta_{0-1}$	$\text{tg}\delta_{1-1}$	...	$\text{tg}\delta_{(n-1)-1}$
...	...	...	...
$\text{tg}\delta_{0-(n-1)}$	$\text{tg}\delta_{1-(n-1)}$	...	$\text{tg}\delta_{(n-1)-(n-1)}$

Рис. 5. Матрица абсолютных значений тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции объектов

**Этап 4.** Из  $(n-1)$  числа значений необходимо получить одно, поэтому применяя алгоритмы математической статистики, отсеиваются значения, не попадающие в интервал трехкратного значения стандартного отклонения. Из оставшихся значений рассчитывается среднее арифметическое, которое и является абсолютным значением тангенса угла диэлектрических потерь для объекта.

**Этап 5.** После получения достоверных данных, необходимо осуществлять основную задачу СНК состояния изоляции. На данном этапе необходимо определить и отсеять влияния на результаты измерения различных факторов, например, загрязненная поверхность изолятора аппарата или разгерметизация измерительного датчика. Далее применяются алгоритмы выявления температурных зависимостей, скоростей и значений изменения диагностических параметров и формирования заключения о состоянии основной изоляции аппарата.

**Этап 6.** Выдача пользователям СНК заключения о состоянии оборудования по принципу "состояние нормальное", "состояние предаварийное", "состояние аварийное", а также выдача расширенной диагностической информации в табличном и графическом виде.

## ВЫВОДЫ

Использование разработанного алгоритма позволяет, более точно получать данные о  $\text{tg}\delta_1$  аппаратов, что повышает достоверность и эффективность применения СНК. На рис. 6 видно, что данные полученные перекрестным методом более стабильны и соответствуют результатам поверочных измерений испытательной установкой УВПГ-250.

Данные полученные перекрестным методом пригодны для дальнейшей диагностики оборудования. Например, для данного ТТ установлен коэффициент температурной зависимости 0,81, что свидетельствует об ухудшении состояния основной изоляции, хотя роста диэлектрических потерь пока не наблюдается. Проведение такого анализа, по данным "эталонного" метода весьма затруднительно. Перекрестный метод исключает возможность систематической погрешности измерений, при изменении характеристик эталонной группы.

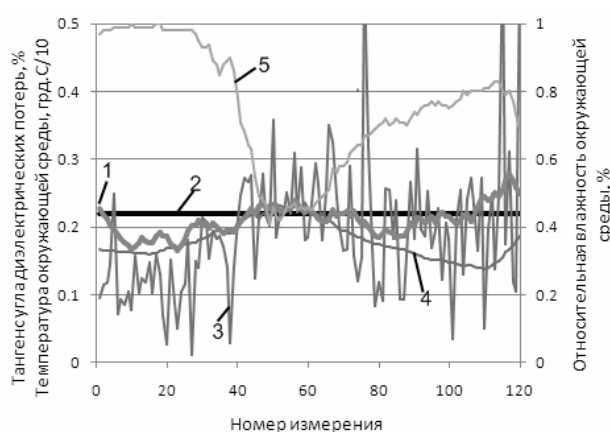


Рис. 6. Графики результатов измерения  $\text{tg}\delta_1$  ТТ типа ТФУМ-330: 1 – результаты измерений перекрестным методом; 2 – результат измерения мостом переменного тока P5026 с использованием установки УВПГ-250; 3 – результаты измерений классическим ("эталонным") методом; 4 – температура окружающей среды; 5 – относительная влажность окружающей среды

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рассальский А.Н., Сахно А.А., Конограй С.П., Спица А.Г., Гук А.А. Анализ методов непрерывного контроля характеристик изоляции трансформаторов тока и вводов на подстанциях 330-750 кВ // Вісник КДПУ ім. М. Остроградського. Кременчук – 2009. – № 3(56), ч. 1. – с. 67-70.
2. ГКД 34.20.302-2002. Норми випробування електрообладнання. Затверджені Наказом № 503 від 28.08.02 Мінпаливенерго України. – К.: ГРИФРЭ, 2002.
3. Рассальский А.Н., Сахно А.А., Конограй С.П., Спица А.Г., Гук А.А. Источники погрешности при контроле характеристик основной изоляции трансформаторов тока и вводов 330-750 кВ под рабочим напряжением // Сборник тезисов Трансформаторостроение-2009. Запорожье – 2009. – с. 67-70.
4. Инструкция №19-07/03 по измерению тангенса угла диэлектрических потерь основной изоляции трансформаторов тока 330-750 кВ под рабочим напряжением. – Запорожские магистральные электрические сети – Запорожье – 2003. – 15 с.

Поступила 30.08.2009

Сахно Александр Анатольевич

Запорожский национальный технический университет, кафедра "Электрические аппараты"  
Украина, 69063, Запорожье, ул. Жуковского, 64  
тел. (061) 289-61-39, e-mail: a\_sakhno@mail.ru

A.A. Sakhno

### A dielectric dissipation measurement algorithm for the main insulation of current transformers and 330-750 kV bushings under on-line monitoring.

In the article, a designed algorithm of dielectric dissipation cross-measurement is presented. This algorithms can be applied to measurements of dielectric dissipation (tan-delta) in the main insulation of measuring current transformers and high-voltage bushings of 330-750 kV. Also, results of the algorithm application in an on-line monitoring system in a 330 kV substations under are given.

**Key words – tan-delta, on-line monitoring, current transformer, bushing.**