

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ В ЛИНЕЙНЫХ ТАРЕЛЬЧАТЫХ ИЗОЛЯТОРАХ ЗА СЧЕТ ОПРЕДЕЛЕНИЯ $\operatorname{tg}\delta$ И ВЫДЕЛЕНИЯ АКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТОКА УТЕЧКИ

Шевченко С. Ю.<sup>1</sup>, Борзенков И. И.<sup>1</sup>, Данильченко Д. А.<sup>1</sup>, Лебединский И. Л.<sup>2</sup>, Лебедка С. Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт",

<sup>2</sup>Сумской государственной университет

В статье рассматривается вопрос определения потерь энергии в линейных тарелочных изоляторах в зависимости от состояния их поверхности. Уточнение емкости одного изолятора, определение тангенса угла диэлектрических потерь с выделением активной составляющей тока утечки через загрязненную, сухую или смоченной водой поверхность изолятора.

**Постановка проблемы.** Опыт эксплуатации высоковольтных сетей и экспериментальные исследования показали, что увлажнение слоя загрязнения на поверхности изоляторов приводит к значительному увеличению токов утечки по поверхности в сравнении с сухим его состоянием. Это приводит к увеличению потерь энергии за счет ее рассеяния в виде выделения тепла при протекании таких токов. Слой загрязнения на поверхности изоляторов образуется в результате выпадения из потоков воздуха твердых или жидких взвешенных частиц. Интенсивность выпадения частиц из воздушного потока пропорциональна градиенту его скорости у поверхности изолятора. При резком уменьшении скорости воздушного потока, вызываемом препятствиями в виде вертикальных ребер, загрязнение изоляторов происходит более интенсивней, чем в случае ламинарного потока по гладким поверхностям. Например, наличие ребер на нижней поверхности тарелки изолятора ПС-70 Е рис. 1 приводит к увеличению ее загрязняемости по сравнению с верхней, гладкой [1].

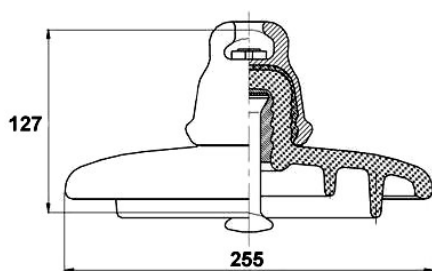


Рисунок 1 – Тарелочный изолятор ПС-70 Е

При приложении напряжения по увлажненному слою загрязнения протекает ток утечки. Величина тока утечки зависит от проводимости слоя загрязнения и конфигурации поверхности изолятора.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В случае изолятора с гладкой цилиндрической поверхностью сопротивление увлажненной поверхности изолятора можно определить из следующей формулы [1]

$$R_n = \frac{\rho_0 \cdot L}{\pi \cdot D \cdot \Delta}$$

где  $\rho_0$  – удельное объемное сопротивление увлажненного слоя загрязнения;

$L$  – длина пути тока утечки по поверхности изолятора;

$D$  – диаметр изолятора;

$\Delta$  – толщина слоя загрязнения.

Но выше приведенная формула не удобна для использования так как трудно определить толщину слоя увлажненного загрязнения, также формула приведена для гладкой цилиндрической поверхности, а тарелочные изоляторы имеют более сложную форму.

В другом источнике [2] приведена формула для расчета электрического сопротивления одного изолятора. При этом сопротивление рассчитанное по этой формуле рекомендовано для расчета годовых потерь энергии в линиях электропередачи

$$R_{\text{изол}} = 1345 - 215 \cdot (N_p - 1)$$

где  $N_p$  – номер уровня степени загрязнения атмосферы (I, II, III, IV, V, VI, VII), которое можно определить согласно [3].

Однако, как видно из формулы, сопротивление изменяется только в зависимости от степени загрязнения атмосферы, то есть линейно, и не дает объективной оценки о его величине.

**Цель статьи.** Исходя из вышесказанного величина тока утечки и проводимости слоя загрязнения или обратной величины поверхностного сопротивления изолятора может быть получена, например, при помощи измерения параметров изоляции таких как: тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$  в конструкции изолятора и его электрической емкости  $C_{\text{изол}}$  в зависимости от воздействия погодных условий (туман, роса, дождь, мокрый снег, изморозь) с выделением активной составляющей тока утечки. [4, 5]

**Основные материалы исследования.** Процесс измерения заключается в уравнивании (балансировке) мостовой схемы с поочередной регулировкой сопротивления резистора и емкости магазинов конденсаторов рис. 2.

В качестве измерителя построенного по принципу моста Шеринга можно использовать прибор мостового типа Вектор 2М рис. 3.

При измерениях тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}\delta$  применяют две схемы включения моста: так называемую "Нормальную", или "Прямую", в ко-

торой измерительный элемент включен между одним из электродов испытуемой изоляционной конструкции и землей, и "Перевернутую", где он включен между электродом испытуемого объекта и выводом высокого напряжения моста. "Нормальную" схему применяют, когда оба электрода изолированы от земли, "Перевернутую" – когда один из электродов наглухо соединен с землей.

Как правило выходное напряжение  $U_{ВН}$  подаваемое на объект испытания по "Прямой" схеме измерения составляет 10 кВ с промышленной частотой 50 Гц.

В табл. 1 представлены экспериментальные данные по измерению тангенса угла диэлектрических потерь и электрической емкости двух изоляторов типа ПФ-70А и ПСД-70Е которые были получены в лабораторных условиях для трех состояний поверхности изоляторов.

Таблица 1 – Средние значения электрической емкости изолятора  $C_x$  и  $tg\delta$

Тип	Состояние поверхности изолятора					
	Сухой чистый		Сухой грязный		Чистый смоченный водой	
	$C_x$ , pF	$tg\delta$ , %	$C_x$ , pF	$tg\delta$ , %	$C_x$ , pF	$tg\delta$ , %
ПФ-70А	87.82	9.12	82.86	21	120.3	20.9
ПСД-70Е	67.76	2.039	65.72	2.067	77.31	3.49

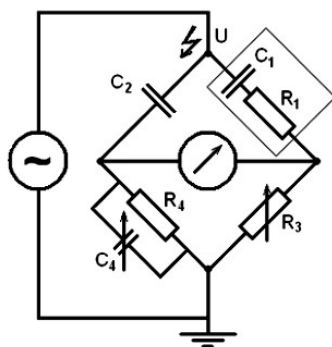


Рисунок 2 – Схема моста Шеринга:

- $C_1$  – исследуемый объект;
- $R_1$  – последовательное сопротивление в эквивалентной схеме исследуемого конденсатора;
- $C_2$  – эталонный конденсатор;
- $R_3$  – безиндукционный резистор;
- $C_4$  – переменный конденсатор;
- $R_4$  – переменный безиндукционный резистор, включённый параллельно с  $C_4$ .

Данные приведенные в таблице 1 получены для разных состояний загрязнения поверхности тарелки изоляторов. Измеренные значения электрической емкости  $C_x$  и  $tg\delta$  имеют разные значения при разном состоянии поверхности изолятора. Следует отметить, что значения электрической емкости изолятора

превышают значения, приведенные в [6]. Полученные экспериментальные данные дают возможность, расчетным путем выделить активную составляющую тока утечки  $I_a$ .

Как известно при воздействии переменного напряжения в изоляции протекает ток, опережающий по фазе приложенное напряжение на угол  $\phi$  (рис. 4), а угол  $\delta$  обусловленный наличием активного сопротивления слоя загрязнения на поверхности изолятора.

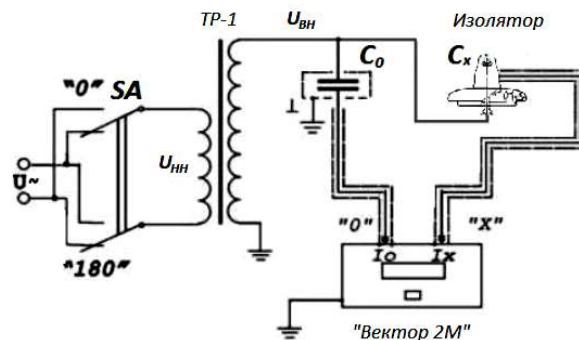


Рисунок 3 – Принципиальная электрическая схема установки по измерению  $tg\delta$  с использованием измерителя Вектор 2М

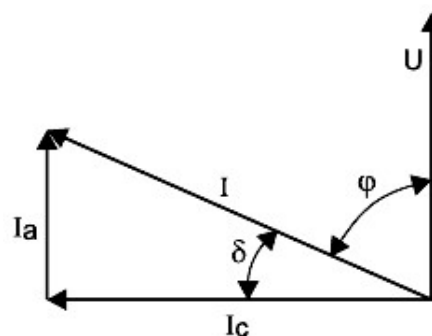


Рисунок 4 – Векторная диаграмма токов через диэлектрик с потерями:

- $U$  – напряжение на диэлектрике;
- $I$  – полный ток через диэлектрик;
- $I_a$ ,  $I_c$  – соответственно активная и емкостная составляющие полного тока;
- $\phi$  – угол фазного сдвига между приложенным напряжением и полным током;
- $\delta$  – угол между полным током и его емкостной составляющей.

Диэлектрическими потерями называют энергию, рассеиваемую в единицу времени в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика.

При постоянном напряжении потери энергии определяются только силой сквозного тока, обусловленного объемной и поверхностной проводимостями. При переменном напряжении к этим потерям добавляются потери, обусловленные различного вида поляризациями, а также наличием полупроводниковых примесей, окислов железа, углерода, газовых включений и т. п.

Рассматривая простейший диэлектрик, можно записать выражение рассеиваемой в нем под воздействием переменного напряжения мощности:

$$P_a = U \cdot I_a,$$

где  $U$  - приложенное к диэлектрику напряжение,  
 $I_a$  - активная составляющая тока, протекающего через диэлектрик.

Схему замещения диэлектрика обычно представляют в виде последовательно соединенных конденсатора и активного сопротивления.

Из векторной диаграммы (рис. 4) можно записать что:

$$I_a = I_c \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

где  $\delta$  – угол между вектором полного тока  $I$  и его емкостной составляющей  $I_c$ .

Следовательно, полная мощность диэлектрических потерь будет определяться выражением

$$P_a = U \cdot I_c \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

При этом емкостная составляющая тока равна

$$I_c = U \cdot \omega \cdot C,$$

где  $C$  – электрическая емкость изолятора при угловой частоте  $\omega$ .

В результате рассеиваемая в диэлектрике мощность будет равна

$$P_a = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

То есть потери энергии, рассеиваемые в диэлектрике, пропорциональны тангенсу угла  $\delta$ , частоте приложенного напряжения и электрической емкости изолятора.

#### **Выводы.**

1. Полученные экспериментальные данные (таблица 1) и обзор работ других авторов [1 - 6] показывают, что величина тангенса угла диэлектрических потерь является одним из важнейших параметров определения активной составляющей тока утечки в загрязненном слое, образовавшемся на поверхности твердого диэлектрика сложной конфигурации.

2. Полный ток утечки включает в себя сквозной ток утечки через объемное сопротивление диэлектрика, то есть реактивную составляющую, так и активную составляющую тока по поверхности загрязненного диэлектрика. Активной составляющей тока утечки в объемном сопротивлении можно пренебречь из-за его малой величины.

3. Таким образом уточняя активную составляющую тока утечки можно более точно определить сопротивление или проводимость слоя загрязнения, а также потери энергии на поверхности изоляционной конструкции сложной конфигурации.

#### **Список использованных источников**

1. Александров Г. Н. и др. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции. "Энергия" Ленинград, 1969. 240 с.

2. Железко Ю. С., Артемьев А. В., Савченко О. В. Расчет анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. Москва : Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. 280 с.: ил.

3. ГКД 34.51.101-96 Выбор и эксплуатация внешней изоляции электроустановок 6-750 кВ на предприятиях Минэнерго Украины. Инструкция.

4. Определение токов утечки в изоляции воздушных линий электропередач / Шевченко С. Ю., Данильченко Д. А., Борзенков И. И., Лебединский И. Л. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Серія: Енергетика надійність та енергоефективність*. 2019 № 14 (1339) С. 49-53.

5. Шевченко С. Ю., Окунь А. А. Моделирование электрического поля стеклянного изолятора в ВЛ 110 кВ. *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ"* : сб. науч. тр. Темат. вып. : Энергетика: надёжность и энергоэффективность. Харьков : НТУ "ХПИ". 2011. № 3. С. 136-143.

6. Базуткин В. В., Ларионов В. П., Пинталь Ю. С. Техника высоких напряжений: Изоляция и перенапряжения в электрических системах: учебник для вузов; под общ. ред. В.П. Ларионова. Изд. 3-е, перераб. и доп. Москва : Энергоатомиздат, 1986. 464 с.

#### **Анотація**

#### **ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ В ЛІНІЙНИХ ТАРИЛЬЧАСТИХ ІЗОЛЯТОРАХ ЗА РАХУНОК ВИЗНАЧЕННЯ $\operatorname{tg} \delta$ І ВИДІЛЕННЯ АКТИВНОЇ СКЛАДОВОЇ СТРУМУ ВИТОКУ**

Шевченко С. Ю., Борзенков І. І., Данильченко Д. О., Лебединський І. Л., Лебедка С. Н.

*У статті розглядається питання визначення втрат енергії в лінійних тарільчастих ізоляторах в залежності від стану їх поверхні. Уточнення ємності одного ізолятора, визначення тангенса кута діелектричних втрат з виділенням активної складової струму витоку через забруднену, суху або змочену водою поверхню ізолятора.*

#### **Abstract**

#### **DETERMINATION OF LOSSES OF ENERGY IN LINEAR PLATE INSULATORS BY DETERMINING $\operatorname{tg} \delta$ AND SELECTING THE ACTIVE COMPONENT OF LEAKAGE CURRENT**

S. Shevchenko, I. Borzenkov, D. Danylchenko, I. Lebedinskiy, S. Lebedka

*The article considers the issue of determining energy losses in linear plate insulators, depending on the state of their surface. Clarification of the capacitance of one insulator, determination of the dielectric loss tangent with the release of the active component of the leakage current through the surface of the insulator contaminated, dry or wetted with water.*