

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ. КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ПО ТАНГЕНСУ УГЛА  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ

## 1. Диэлектрические потери, угол диэлектрических потерь, тангенс угла диэлектрических потерь

Если диэлектрик находится в электрическом поле, то часть энергии электрического поля тратится на нагрев диэлектрика. Диэлектрическими потерями называется электрическая мощность, рассеиваемая в виде тепла в диэлектрике, который находится в электрическом поле. Рассмотрим, какие процессы приводят к выделению тепла в диэлектрике.

Технические диэлектрики обладают некоторой электропроводностью (поверхностной или объемной, либо той и другой одновременно). Поэтому по диэлектрику протекает ток проводимости, что приводит к выделению тепла. Диэлектрические потери, обусловленные проводимостью диэлектрика, наблюдаются как в постоянном, так и в переменном электрическом поле.

В объеме и на поверхности диэлектрика, который находится в электрическом поле, возникают электрические диполи. Этот процесс называется поляризацией. Известно несколько видов поляризации – электронная, ионная, релаксационная, миграционная и ряд других. Виды поляризации различаются по времени, которое необходимо для установления поляризации.

Электронная и ионная поляризация относятся к быстрым видам поляризации, которые устанавливаются за очень малое время  $10^{-10}$ - $10^{-15}$  с. Релаксационная и миграционная поляризация относятся к медленным видам поляризации. Например, при миграционной поляризации время, необходимое для установления поляризации, может быть соизмеримо с периодом промышленной частоты или даже превышать его.

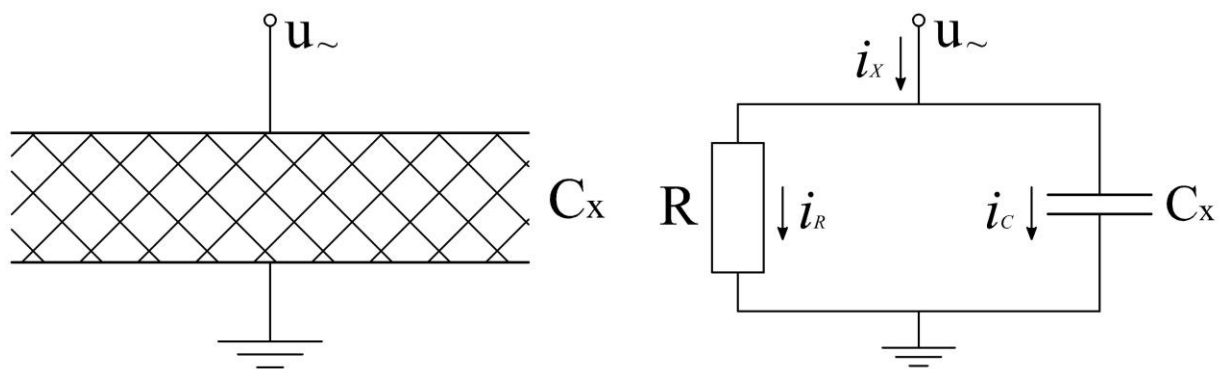
Быстрые виды поляризации не сопровождаются диэлектрическими потерями. Диэлектрические потери на поляризацию возникают только при медленных видах поляризации в переменных электрических полях. В упрощенном виде механизм выделения тепла в диэлектрике за счет поляризации можно представить следующим образом. Отдельно взятый диполь должен менять ориентацию в соответствии с изменением электрического поля. Повороту отдельно взятого диполя будут препятствовать соседние диполи в диэлектрике. При этом между соседними диполями возникают силы трения, что приводит к выделению тепла и нагреву диэлектрика.

Таким образом, в переменном электрическом поле диэлектрические потери складываются из потерь на проводимость и потерь на поляризацию. В постоянном электрическом поле диэлектрические потери включают в себя только потери на проводимость.

Существует ещё один вид диэлектрических потерь, который называется ионизационными потерями. Ионизационные потери наблюдаются при наличии в диэлектрике частичных разрядов. Частичные разряды это электрические разряды, которые перекрывают лишь часть (как правило, малую часть) изоляционного промежутка. Причинами возникновения частичных разряд является локальное усиление напряженности электрического поля или снижение электрической прочности диэлектрика, например, из-за образования в нем газовых включений.

Для оценки способности диэлектрика рассеивать энергию электрического поля используют понятие тангенса угла диэлектрических потерь.

Поместим диэлектрик с потерями в плоский конденсатор, который находится под напряжением  $u$ . (50 Гц) рис. 1а. Емкость конденсатора с диэлектриком равна  $C_x$ .



а) диэлектрик в электрическом поле

б) схема замещения диэлектрика

Рис.1 Схема замещения диэлектрика с потерями

Схема замещения диэлектрика с потерями представлена на рис.1б. Ток  $i_x$ , который протекает через диэлектрик, равен сумме тока потерь  $i_R$  и тока смещения  $i_C$ .

На векторной диаграмме рис.2 вектор тока  $I_x$  через диэлектрик опережает вектор напряжения  $U$  на угол  $\varphi$ . Причем угол  $\varphi$  меньше  $90^\circ$ . Углом диэлектрических потерь  $\delta$  называется угол, который дополняет до  $90^\circ$  угол между вектором напряжения и вектором протекающего через диэлектрик тока.

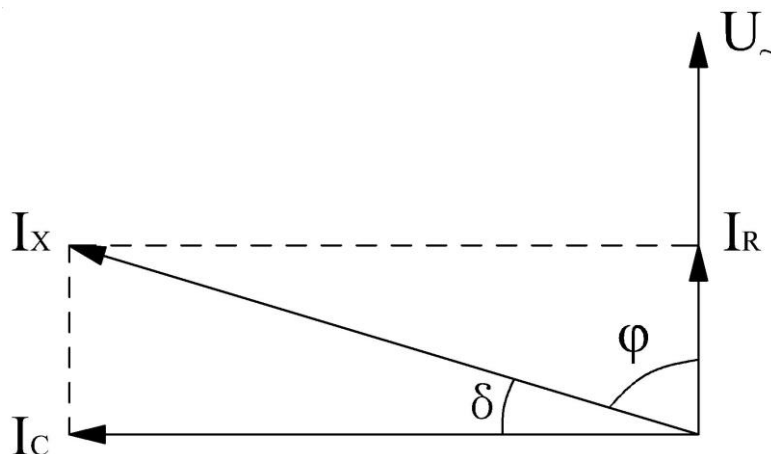


Рис.2 Векторная диаграмма диэлектрика с потерями

Тангенсом угла диэлектрических потерь называется отношение активной составляющей тока  $I_R$ , протекающей через диэлектрик, к току смещения  $I_C$

$$\operatorname{tg}\delta = I_R / I_C \quad (1)$$

Тангенс угла потерь является безразмерной величиной, однако на практике  $\operatorname{tg}\delta$  часто выражают в процентах  $\operatorname{tg}\delta\% = 100 \cdot \operatorname{tg}\delta$ .

Подставив в правую часть выражения (1)  $I_R = U/R$  и  $I_C = U/(1/(\omega \cdot C_x))$ , получим

$$\operatorname{tg}\delta = 1/(\omega \cdot C_x \cdot R), \quad (2)$$

где  $\omega$  – круговая частота.

Примем, что расстояние между пластинами плоского конденсатора рис.1а равно  $d$ , а площадь пластины конденсатора равна  $S$ . Для такого конденсатора можно записать формулы для емкости  $C_x$  и сопротивления диэлектрика  $R$

$$C_x = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S / d \quad (3)$$

$$R = \rho_v \cdot d / S, \quad (4)$$

где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды,  $\rho_v$  – удельное объемное сопротивление диэлектрика.

Подставив (3) и (4) в правую часть выражения (2), получим

$$\operatorname{tg}\delta = 1/(\omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \rho_v) \quad (5)$$

Из формулы (5) следует, что тангенс угла диэлектрических потерь не зависит от геометрических размеров диэлектрика и при неизменной частоте  $\omega$  напряжения определяется только физическими свойствами диэлектрика.

Определим мощность диэлектрических потерь  $P_d$  в диэлектрике

$$P_d = I_R \cdot U_{\sim} = I_C \cdot \text{tg}\delta \cdot U_{\sim} = \omega \cdot C_x \cdot U_{\sim}^2 \cdot \text{tg}\delta, \quad (6)$$

где  $U_{\sim}$  - действующее значение напряжения.

Исходя из (6) мощность диэлектрических потерь связана с тангенсом угла диэлектрических потерь соотношением

$$P_d = \omega \cdot C_x \cdot U_{\sim}^2 \cdot \text{tg}\delta \quad (7)$$

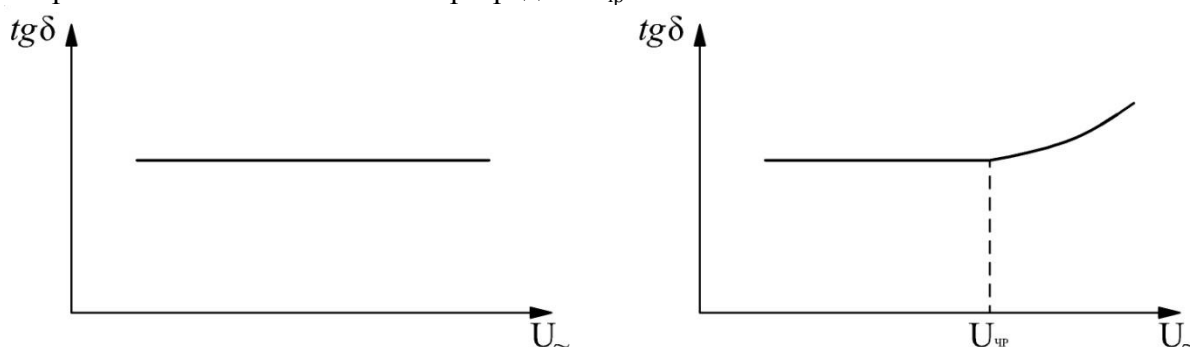
Как видно из (7), при неизменной частоте и значении напряжения мощность диэлектрических потерь зависит как от физических свойств диэлектрика ( $\text{tg}\delta$ ), так и от геометрических размеров диэлектрика ( $C_x$ ). Зависимость  $P_d$  от геометрических размеров указывает на невозможность использования мощности диэлектрических потерь в качестве диагностического параметра. В качестве диагностического параметра, характеризующего диэлектрические потери в изоляции, используется  $\text{tg}\delta$ , который зависит от физических свойств диэлектрика и не зависит от геометрических размеров диэлектрика.

Измерение тангенса угла диэлектрических потерь при напряжении промышленной частоты используется для контроля изоляции электрооборудования высокого напряжения. Предельно допустимое значение  $\text{tg}\delta$  нормируется для различных видов изоляции. Если измеренное значение  $\text{tg}\delta$  изоляции не превышает предельно допустимое, то изоляция считается нормальной.

Как правило, профилактический контроль изоляции электрооборудования по  $\text{tg}\delta$  производится при испытательном напряжении 10 кВ. Однако, из этого правила имеется исключение. При контроле изоляции некоторых видов электрооборудования производят измерения  $\text{tg}\delta$  при нескольких значениях напряжения. Максимальное значение напряжения может достигать полуторократного рабочего напряжения ( $1,5U_{\text{раб}}$ ). Такие испытания обычно проводят в лабораторных условиях.

По результатам измерений  $\text{tg}\delta$  при нескольких значениях напряжения строят зависимость  $\text{tg}\delta = f(U_{\sim})$ . Для изоляции нормального качества значение  $\text{tg}\delta$  остается практически неизменным при всех значениях испытательного напряжения рис.3а. Если же  $\text{tg}\delta$  изоляции увеличивается, начиная с некоторого значения напряжения рис 3б, то это свидетельствует о наличии в изоляции частичных разрядов. Увеличение  $\text{tg}\delta$  обусловлено ионизационными потерями при частичных разрядах. Чем выше напряжение, тем выше интенсивность частичных разрядов и выше диэлектрические потери.

Напряжение, начиная с которого происходит возрастание  $\text{tg}\delta$ , называется напряжением начала частичных разрядов  $U_{\text{чр}}$ .



а) изоляция нормального качества

б) изоляция с дефектами в виде частичных разрядов

Рис.3 Зависимость  $\text{tg}\delta$  изоляции от напряжения

Тангенс угла диэлектрических потерь является диагностическим параметром, который объединяет несколько характеристик изоляции. Так, для однородного диэлектрика с потерями имеет место соотношение

$$\operatorname{tg}\delta = (\gamma + \omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{действ}}) / (\omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{мн}}) \quad (8)$$

где  $\gamma$  – удельная объемная проводимость;  $\omega$  – круговая частота,  $\epsilon_{\text{мн}}$  и  $\epsilon_{\text{действ}}$  – мнимая и действительная составляющая комплексной относительной диэлектрической проницаемости.

Из соотношения (8) видно, что при увлажнении диэлектрика  $\operatorname{tg}\delta$  будет возрастать, поскольку возрастает проводимость диэлектрика.

С ростом температуры диэлектрика в нем возрастает количество свободных зарядов, поэтому его проводимость увеличивается. Следовательно, с ростом температуры будет увеличиваться значение тангенса угла диэлектрических потерь

$$\operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\delta_0 \cdot \exp[a \cdot (T - T_0)] \quad (9)$$

где  $a$  – коэффициент,  $T$  – температура,  $T_0$  – значение температуры, при которой  $\operatorname{tg}\delta = \operatorname{tg}\delta_0$ .

Поскольку диэлектрические потери зависят от температуры, то для того, чтобы задать значения  $\operatorname{tg}\delta$  диэлектрика табл.1 следует указать, при какой температуре диэлектрика было проведено измерение. Зависимость  $\operatorname{tg}\delta$  от температуры для разных диэлектриков неодинакова.

Таблица 1

Значения  $\operatorname{tg}\delta$  для некоторых диэлектриков при температуре 20°C и частоте испытательного напряжения 50 Гц

Диэлектрик	$\operatorname{tg}\delta$
Гетинакс	0,04-0,08
Электрофарфор	0,022-0,025
Полиэтилен	$(2,0-4,0) \cdot 10^{-4}$
Полиэтилентерефталат	$(1,8-2,0) \cdot 10^{-2}$
Трансформаторное масло	0,001-0,003
Касторовое масло	0,008-0,015
Газы	менее $4 \cdot 10^{-8}$

Если для какого - либо участка изоляции электрооборудования были проведены два измерения  $\operatorname{tg}\delta$  при разной температуре изоляции, то для оценки состояния изоляции данные измерений должны быть приведены к одной температуре (9).

## 2. Особенности $\operatorname{tg}\delta$ как диагностического параметра

Допустим, в изоляции имеется дефектный участок, который занимает малый объем по сравнению с объемом изоляции. Как скажется наличие такого дефекта на результате измерения тангенса угла диэлектрических потерь?

Для этого рассмотрим простейшую модель изоляции в виде плоского конденсатора с дефектным участком рис 4.

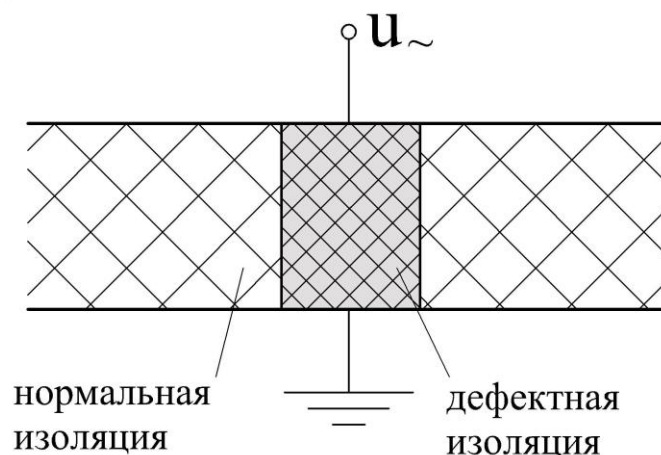


Рис.4 Модель изоляции с дефектом

Будем считать известными значения тангенса угла диэлектрических потерь для нормальной изоляции  $\operatorname{tg}\delta_n$  и для дефектной изоляции  $\operatorname{tg}\delta_d$ , объем нормальной  $V_n$  и дефектной  $V_d$  изоляции, а также относительную диэлектрическую проницаемость для нормальной  $\epsilon_n$  и дефектной изоляции  $\epsilon_d$ . Измеряемое значение  $\operatorname{tg}\delta_{\text{изм}}$  будет определяться согласно [1] следующим выражением

$$\operatorname{tg}\delta_{\text{изм}} = (\epsilon_n V_n \operatorname{tg}\delta_n + \epsilon_d V_d \operatorname{tg}\delta_d) / (\epsilon_n V_n + \epsilon_d V_d), \quad (10)$$

Во многих случаях, с появлением дефекта диэлектрическая проницаемость изоляции меняется мало, поэтому будем считать, что  $\epsilon_n = \epsilon_d$ . В этом случае

$$\operatorname{tg}\delta_{\text{изм}} = \operatorname{tg}\delta_n \{ 1 + (V_d / V) [ (\operatorname{tg}\delta_d / \operatorname{tg}\delta_n) - 1 ] \}, \quad (11)$$

где  $V$  – полный объем изоляции.

Если в изоляции появился дефект  $\operatorname{tg}\delta_d = 10\operatorname{tg}\delta_n$ , который занимает 0,5% объема изоляции, то увеличение  $\operatorname{tg}\delta_{\text{изм}}$  по сравнению с  $\operatorname{tg}\delta_n$  составит всего 5%, что сопоставимо со случайными разбросами значений  $\operatorname{tg}\delta$  для нормальной изоляции. Таким образом, по измеренному значению  $\operatorname{tg}\delta$  изоляции не представляется возможным обнаружить локальный (сосредоточенный) дефект.

Наиболее надежно по измеренному значению  $\operatorname{tg}\delta$  определяются дефекты, которые охватывают значительную часть объема изоляции [1]. Такие дефекты называются распределенными. Например, если в результате измерений получено возрастание  $\operatorname{tg}\delta$  при увеличении испытательного напряжения рис.3б, то это означает, что в изоляции существуют частичные разряды, которые распределены в значительном объеме.

### 3. Принцип измерения тангенса угла диэлектрических потерь

В современных цифровых приборах производится измерение угла диэлектрических потерь  $\delta$ , а тангенс угла диэлектрических потерь вычисляется по измеренному значению  $\delta$ .

Для угла диэлектрических потерь можно дать несколько иное определение по сравнению с тем, что было дано выше. Углом диэлектрических потерь называется угол между вектором полного тока  $I_x$  в изоляции и вектором тока смещения  $I_c$  рис.2. Этому определению соответствует график, представленный на рис.5

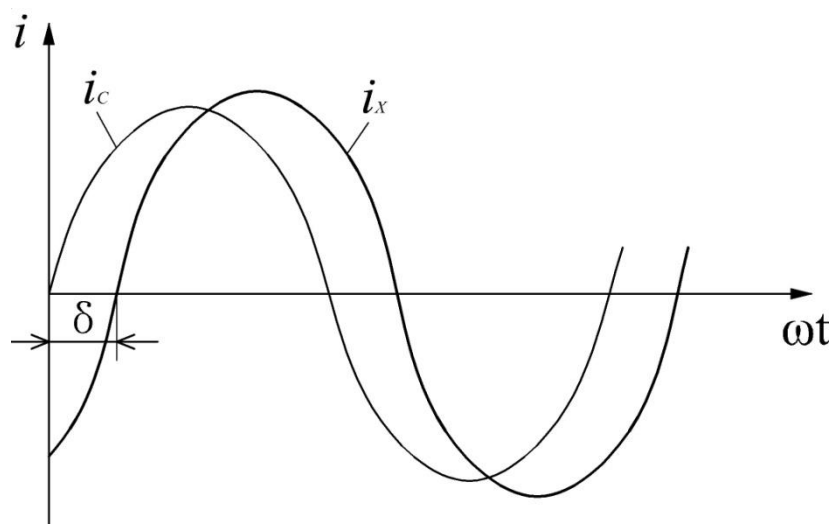


Рис.5 К понятию угла диэлектрических потерь

В основу измерения угла диэлектрических потерь в современных цифровых приборах положено сравнение фазы полного тока, протекающего через изоляцию, и фазы тока смещения. Разность фаз этих токов и есть угол диэлектрических потерь.

Измерение полного тока  $i_x$  не вызывает затруднений. Проблема заключается в измерении тока смещения через изоляцию  $C_x$ . Эта проблема решается следующим образом. Вместо измерения тока смещения через изоляцию производится измерение тока через эталонный конденсатор емкостью  $C_0$ . Эталонным называется конденсатор, диэлектрические потери которого пренебрежимо малы ( $\text{tg}\delta=0$ ). Ток, протекающий через эталонный конденсатор, представляет собой ток смещения. Обозначим этот ток через  $i_0$ . Искомый угол диэлектрических потерь представляет собой разность фаз токов  $i_x$  и  $i_0$ .

На рис.6 приведена блок-схема прибора для измерения угла диэлектрических потерь изоляции  $C_x$ .

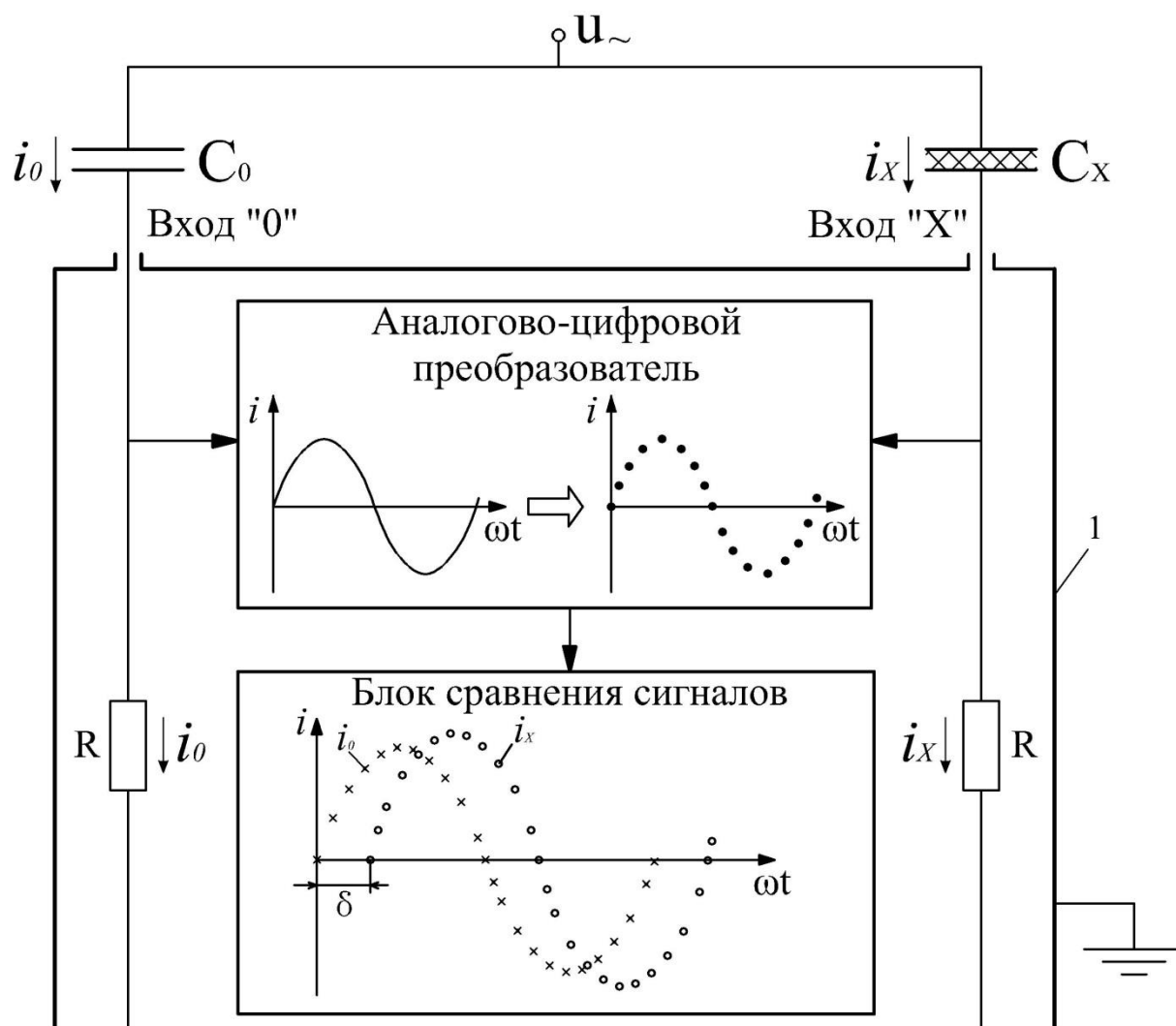


Рис.6 Блок-схема измерения угла диэлектрических потерь

1 – корпус измерительного прибора,  $C_x$  – контролируемая изоляция;  $C_0$  – эталонный конденсатор,  $R$  – измерительное сопротивление

Испытательное напряжение промышленной частоты приложено к изоляции испытуемого объекта  $C_x$  и к эталонному конденсатору  $C_0$ . Ток, протекающий через изоляцию  $i_x$ , и ток, протекающий через эталонный конденсатор  $i_0$ , подаются, соответственно, на вход «X» и вход «0» измерительного прибора и далее через измерительное сопротивление  $R$  на землю. Аналоговые сигналы, пропорциональные токам  $i_x$  и  $i_0$ , поступают в аналогово-цифровой преобразователь, где производится оцифровка сигналов (см. Приложение 1) и определение действующих значений токов. Оцифрованные сигналы поступают в блок сравнения для определения разности фаз токов  $i_x$  и  $i_0$ , то есть искомого угла диэлектрических потерь. По значению угла диэлектрических потерь  $\delta$  в приборе производится вычисление  $\text{tg}\delta$ .

Таким образом, установка для измерения  $\text{tg}\delta$  изоляции должна включать в себя источник испытательного напряжения, измерительный прибор и эталонный конденсатор. В некоторых измерительных приборах имеется встроенный эталонный конденсатор.

Прибор для измерения угла диэлектрических потерь, позволяет также определить емкость  $C_x$  испытуемой изоляции. Покажем, каким образом реализуется функция определения емкости изоляции.

Исходя из условия равенства напряжения в цепи протекания тока  $i_0$  и тока  $i_x$ , можно записать



$$I_0 \cdot R + j \cdot I_0 / (2\pi \cdot f \cdot C_0) = I_x \cdot R + j \cdot I_x \cdot (\cos\delta) / (2\pi \cdot f \cdot C_x), \quad (12)$$

где  $f$  – частота испытательного напряжения и  $\omega$ .

Действующее значение тока  $I_0$  и тока  $I_x$  не превышает 100мА, значение измерительного сопротивление обычно составляет около 100 Ом. Следовательно, в уравнении (12) слагаемые  $I_0 R$  и  $I_x R$  пренебрежимо малы

$$I_0 / (2\pi \cdot f \cdot C_0) = I_x \cdot (\cos\delta) / (2\pi \cdot f \cdot C_x). \quad (13)$$

Из уравнения (13) определяем искомое значение  $C_x$

$$C_x = C_0 \cdot (I_x / I_0) \cdot (\cos\delta) \quad (14)$$

Таким образом, емкость контролируемой изоляции является расчетной величиной, которая вычисляется в приборе по формуле (14). Исходными данными к расчету являются измеренные значения  $\delta$ ,  $I_x$  и  $I_0$ , а также значение емкости эталонного конденсатора  $C_0$ .

Итак, в цифровом приборе для измерения тангенса угла диэлектрических потерь часть величин являются измеренными -  $\delta$ ,  $I_0$ ,  $I_x$ , а часть расчетными -  $\text{tg}\delta$ ,  $C_x$ .

Некоторые приборы, например, Вектор 2.0, кроме  $\text{tg}\delta$  и  $C_x$  позволяют определить действующее значение испытательного напряжения

$$U_{\sim} = I_0 / (2\pi \cdot f \cdot C_0). \quad (15)$$

Рассмотрим варианты подключения прибора при измерении  $\text{tg}\delta$  изоляции.

По месту подключения прибора в измерительном контуре различают перевернутую и прямую схемы включения [2].

В перевернутой схеме рис. 7 измерительный прибор подключается между источником испытательного напряжения и объектом испытаний. При этом измерительный прибор находится под высоким напряжением относительно земли. Перевернутая схема используется в тех случаях, когда один из выводов испытуемого объекта не может быть отключен от земли. Недостатком перевернутой схемы является то, что измерительный прибор находится под высоким напряжением.

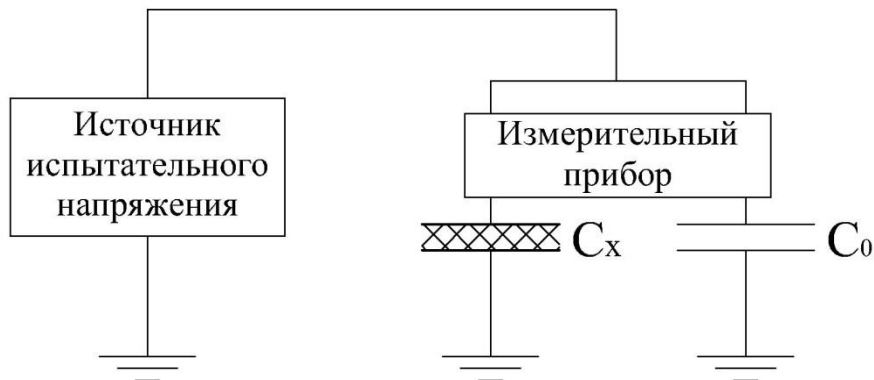


Рис.7 Перевернутая схема подключения прибора для измерения  $\text{tg}\delta$  изоляции

Прямой схемой подключения прибора для измерения  $\text{tg}\delta$  изоляции рис. 8, называется схема, в которой измерительный прибор расположен между низко потенциальным выводом изоляции объекта и землей. Прямая схема применяется в тех случаях, когда имеется доступ к обоим выводам объекта измерений. В этой схеме измерительный прибор находится под небольшим потенциалом относительно земли, такая схема обладает наилучшей помехозащищенностью.

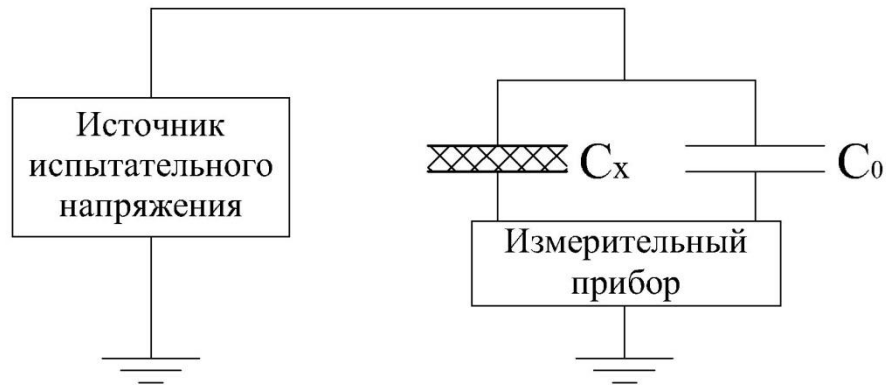


Рис.8 Прямая схема подключения прибора для измерения  $\text{tg}\delta$  изоляции

#### 4. Влияние внешних электрических полей промышленной частоты на измерение $\text{tg}\delta$

При отсутствии внешних электрических полей через изоляцию  $C_x$  протекает только ток  $i_x$  от источника испытательного напряжения.

Если рядом с местом проведения измерений расположено электрооборудование, находящееся под высоким напряжением промышленной частоты, то электрическое поле этого оборудования может оказывать влияние на результаты измерений. Допустим, в непосредственной близости от объекта измерений  $C_x$  установлен однофазный силовой высоковольтный трансформатор рис. 9, который находится под рабочим напряжением.

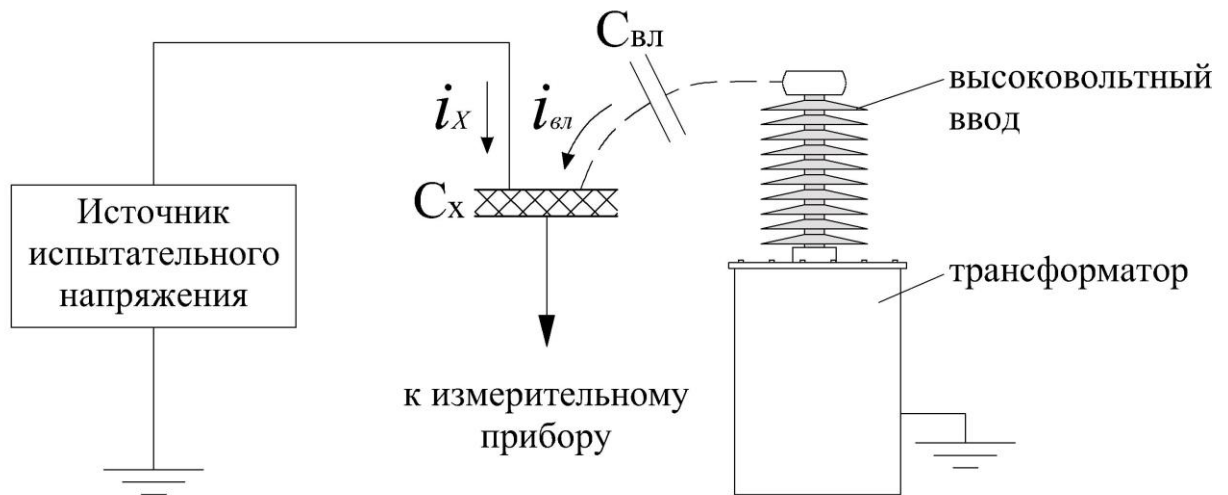


Рис.9 Влияние внешнего электрического поля близко расположенного высоковольтного трансформатора на измерение тангенса угла диэлектрических потерь

В этом случае по изоляции  $C_x$  протекает сумма токов - ток  $i_x$  от источника испытательного напряжения и ток влияния  $i_{вл}$  с верхней части ввода трансформатора. Емкость, через которую протекает ток влияния к объекту измерений называют емкостью влияния  $C_{вл}$ . Ток влияния представляет собой ток смещения промышленной частоты, значение которого тем больше, чем выше рабочее напряжение трансформатора и больше значение емкости влияния. Напряжение трансформатора, работающего в непосредственной близости от места измерений, называют эдс влияния  $E_{вл}$ . Как правило, значение эдс влияния превышает значение испытательного напряжения.

Таким образом, при наличии внешнего электрического поля через испытуемую изоляцию  $C_x$  вместо тока  $i_x$  протекает сумма токов  $i_x$  и  $i_{вл}$ , что может привести к

искажению результатов измерений. Это иллюстрируется векторными диаграммами, представленными на рис.10.

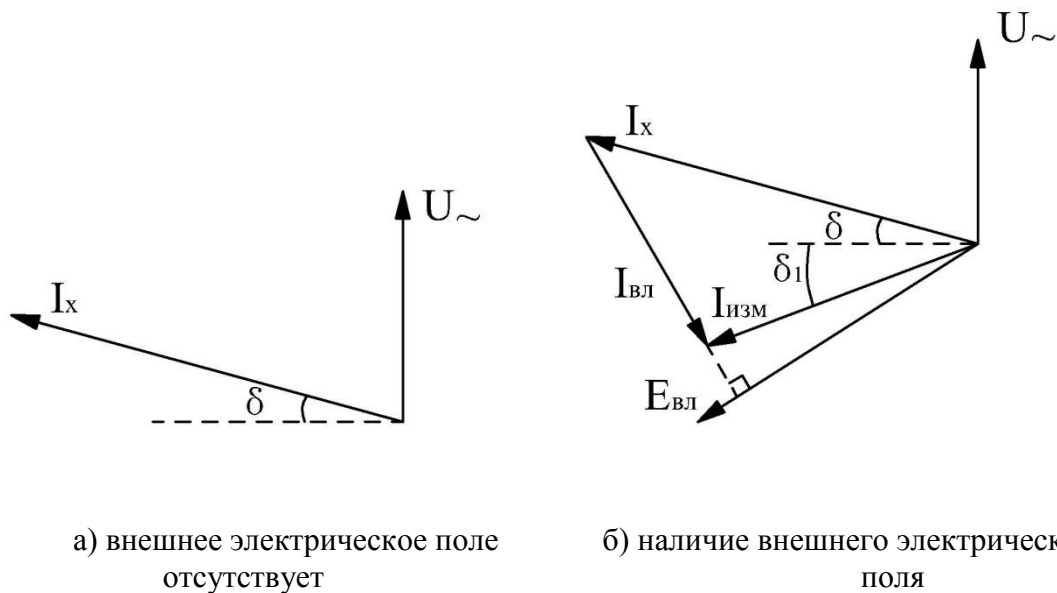


Рис.10 Влияние внешнего электрического поля на значение измеренного угла диэлектрических потерь

На рис.10а приведена векторная диаграмма, где показано взаимное расположение вектора испытательного напряжения и вектора тока через изоляцию при отсутствии внешнего электрического поля. При этом угол диэлектрических потерь равен  $\delta$ .

На рис.10б приведена векторная диаграмма, на которой показано влияние внешнего электрического поля. ЭДС влияния  $E_{вл}$  направлена под некоторым углом к вектору испытательного напряжения. Вектор тока влияния  $I_{вл}$  опережает вектор ЭДС влияния  $E_{вл}$  на  $90^\circ$ . В результате вектор измеренного тока  $I_{изм}$  (сумма токов  $I_x$  и  $I_{вл}$ ) опережает вектор испытательного напряжения на угол более  $90^\circ$ . В рассматриваемом случае угол диэлектрических потерь  $\delta_1$  принял отрицательное значение.

Таким образом, под действием внешнего электрического поля произошло изменение не только абсолютного значения угла диэлектрических потерь, но и его знака. Следует отметить, что при наличии внешнего электрического поля значение угла потерь не всегда является отрицательным.

Рассмотрим методы устранения влияния внешнего электрического поля при измерении  $\text{tg}\delta$  изоляции.

## 5. Методы устранения влияния внешнего электрического поля промышленной частоты на результат измерения $\text{tg}\delta$

### 5.1 Компенсация тока влияния

Метод компенсации тока влияния заключается в том, что производят два замера  $\text{tg}\delta$  изоляции, при которых фаза испытательного напряжения отличается на  $180^\circ$ . При этом действующее значение испытательного напряжения остается неизменным.

Пусть первому замеру соответствует векторная диаграмма на рис.10б, где угол диэлектрических потерь равен  $\delta_1$ . Второму замеру соответствует векторная диаграмма на рис.11, где угол потерь равен  $\delta_2$ , а фаза испытательного напряжения отличается от исходной фазы рис.10б на угол  $180^\circ$ .

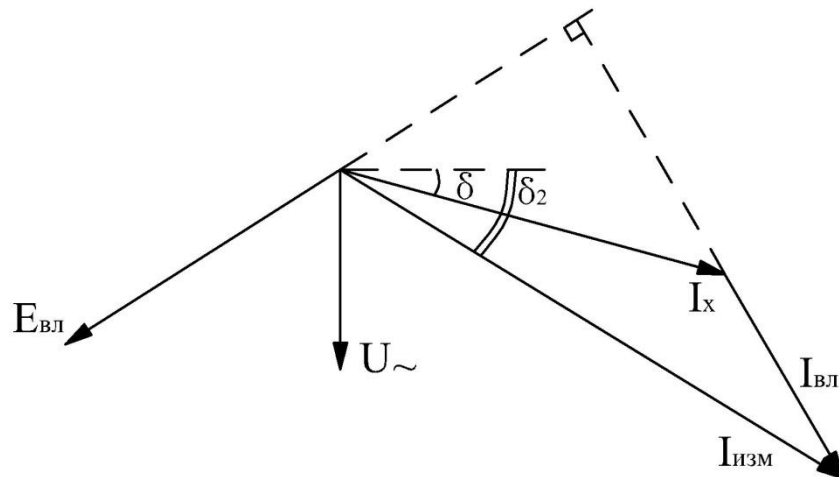


Рис.11 Компенсация тока влияния путем изменения фазы испытательного напряжения

Значение  $\operatorname{tg} \delta$  с учетом компенсации тока влияния определяют как среднее двух измерений

$$\operatorname{tg} \delta = (\operatorname{tg} \delta_1 + \operatorname{tg} \delta_2) / 2 \quad (7)$$

5.2 Измерение  $\operatorname{tg} \delta$  при испытательном напряжении, частота которого отличается от промышленной частоты

Частота тока влияния соответствует промышленной частоте 50 Гц. Если измерить  $\operatorname{tg} \delta$  при испытательном напряжении, частота которого отличается от промышленной частоты, то в этом случае влияние внешнего электрического поля будет исключено. Однако результат измерения должен быть приведен к частоте 50 Гц.

Для параллельной схемы замещения диэлектрика верно соотношение (2).

Характер изменения зависимости  $\operatorname{tg} \delta$  от частоты испытательного напряжения представлен на рис. 12.

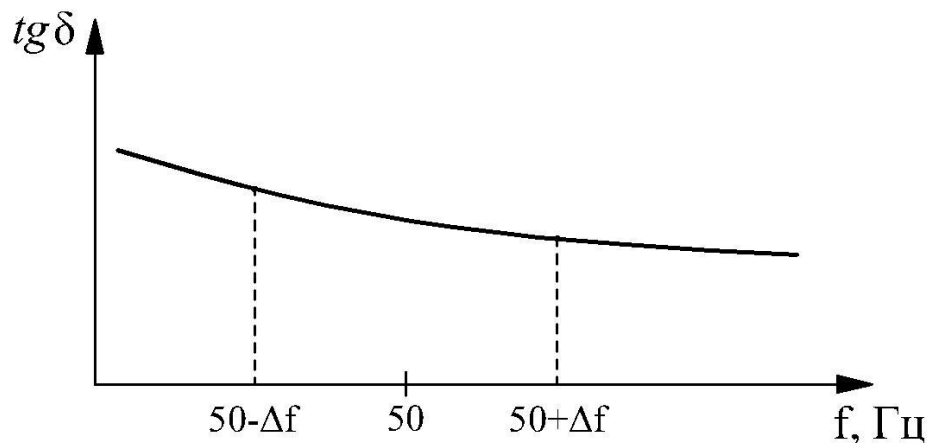


Рис.12 К определению  $\operatorname{tg} \delta$  при промышленной частоте

Если провести измерения при двух частотах испытательного напряжения, одна из которых будет несколько меньше промышленной частоты ( $50 - \Delta f$ ), а другая несколько больше ( $50 + \Delta f$ ), то искомое значение  $\operatorname{tg} \delta$  при промышленной частоте можно определить как среднее арифметическое двух измерений

$$\operatorname{tg} \delta = (\operatorname{tg} \delta_{50 - \Delta f} + \operatorname{tg} \delta_{50 + \Delta f}) / 2 \quad (9)$$

### 7. Лабораторный стенд

Лабораторный стенд включает в себя два измерителя параметров изоляции - Тангенс 2000 и Вектор 2.0 рис 13. Объектом испытаний выступает высоковольтный ввод 35 кВ. Измерения проводятся по перевернутой схеме. Возможны измерения, как при наличии, так и при отсутствии внешнего электрического поля.



а) Прибор Вектор 2.0

б) Прибор Тангенс 2000

Рис.13 Приборы для измерения  $\text{tg}\delta$

Прибор Тангенс 2000 позволяет проводить измерение по прямой и по перевернутой схеме, На рис 14 приведена перевернутая схема измерения. Прибор обеспечивает получение испытательного синусоидального напряжения от 1 до 10 кВ.

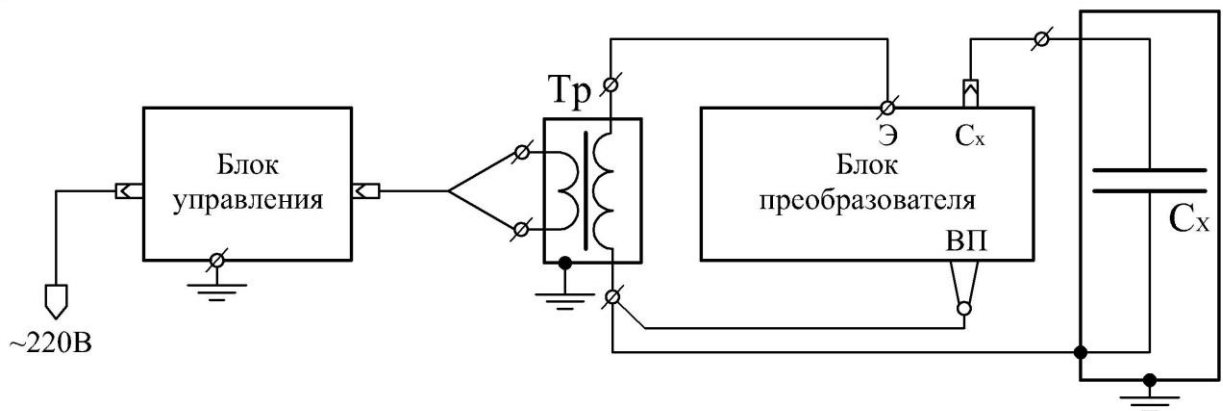


Рис.14. Перевернутая схема измерения  $\text{tg}\delta$  изоляции прибором Тангенс 2000

Измеритель состоит из трех блоков - блока управления, блока преобразователя и повышающего трансформатора. В блок преобразователя встроен эталонный конденсатор.

Тангенс 2000 производит измерения при двух частотах испытательного напряжения 44 и 56 Гц, что позволяет исключить влияние внешнего электрического поля промышленной частоты.

Диапазон измеряемых значений составляет по  $\text{tg}\delta$  от 0,00001 до 1, по емкости от 10пФ до 340нФ.

Прибор Вектор 2.0 также позволяет проводить измерения по прямой и по перевернутой схеме. Измерения производятся при напряжении до 10 кВ. На рис. 15 представлена перевернутая схема измерения.

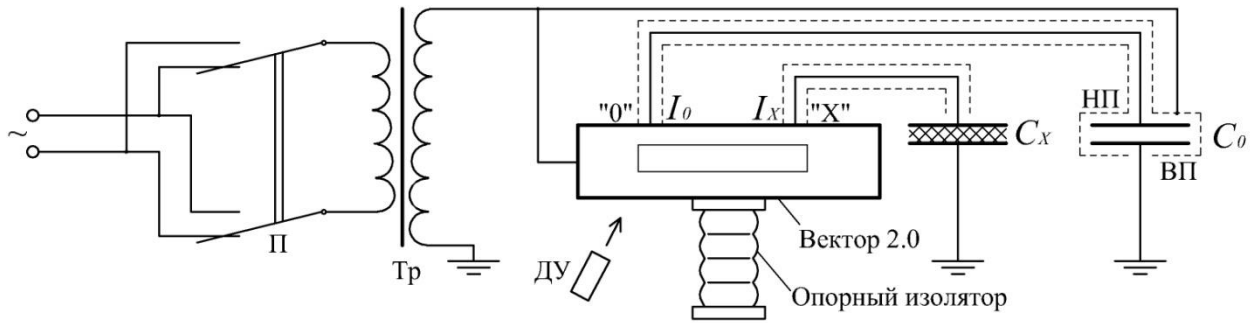


Рис.15 Перевернутая схема измерения  $\text{tg}\delta$  изоляции прибором Вектор 2.0  
П – переключатель, ДУ – пульт дистанционного управления

Прибор Вектор 2.0 позволяет проводить измерения при частоте испытательного напряжения от 48 до 52 Гц, диапазон измеряемых значений составляет по  $\text{tg}\delta$  от 0,00001 до 100, по емкости от 1пФ до 1мкФ.

Вектор 2.0 измеряет следующие величины - частоту сигнала на входе «0», угол фазового сдвига между входными токами  $\delta$ , действующее значение тока  $I_0$  на входе «0», действующее значение тока  $I_x$  на входе «X». На основе измеренных величин Вектор 2.0 производит вычисление действующего значения испытательного напряжения,  $\text{tg}\delta$  и емкости испытуемой изоляции. Эти величины называются расчетными. На дисплее прибора выводятся значения как измеряемых, так и расчетных величин.

На рис. 16 представлена схема измерения  $\text{tg}\delta$  высоковольтного ввода прибором Вектор 2.0 при наличии внешнего электрического поля. Значение эталонной емкости составляет 24 пФ.

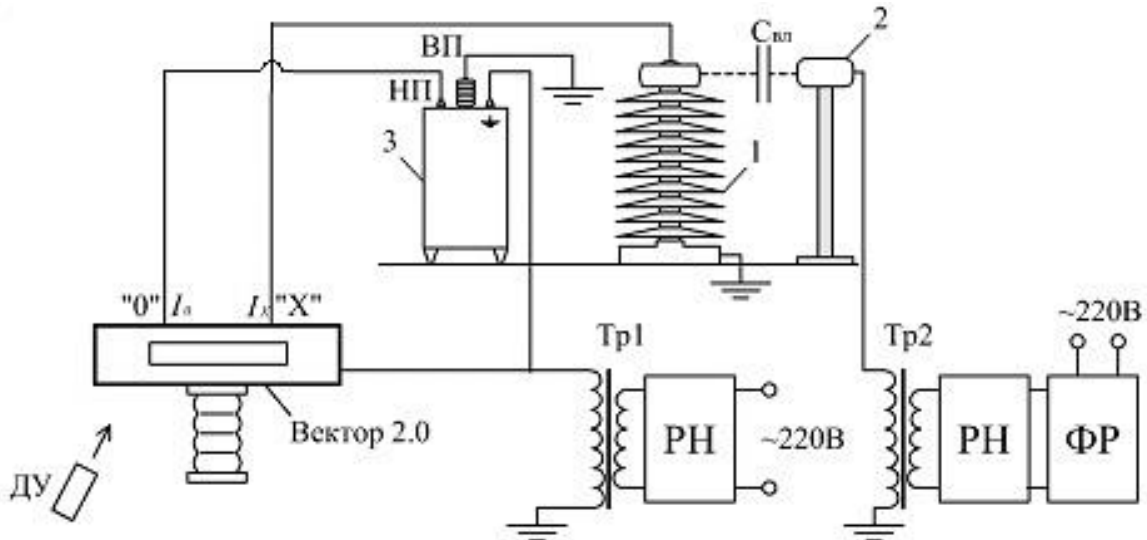


Рис.16 Схема измерения  $\text{tg}\delta$  высоковольтного ввода прибором Вектор 2.0 при наличие внешнего электрического поля. 1 - высоковольтный ввод, 2 - металлический электрод, 3 – эталонный конденсатор, ВП – высокопотенциальный вывод эталонного конденсатора, НП – низкопотенциальный вывод эталонного конденсатора, ДУ – пульт дистанционного управления, РН – регулятор напряжения, ФР – фазовый регулятор, Tr1, Tr2 – высоковольтные трансформаторы

Внешнее электрическое поле создается с помощью металлического электрода, расположенного в непосредственной близости от верхней части высоковольтного ввода. На электрод подается высокое напряжение (эдс влияния), фазу которого можно изменять в широких пределах. Ток влияния протекает от металлического электрода к верхней части ввода через емкость влияния  $C_{вл}$ .

В лабораторном стенде для оценки влияния температуры изоляции на значение  $\operatorname{tg}\delta$  имеется печь, внутри которой помещен образец изоляции. Допускается нагрев образца изоляции до температуры не более  $90^\circ\text{C}$ . Измерение  $\operatorname{tg}\delta$  образца изоляции возможно как прибором Вектор 2.0, так и прибором Тангенс 2000.

#### 8. Задание на предварительную подготовку

1. Под каким углом к вектору испытательного напряжения должен быть направлен вектор эдс влияния, чтобы ток влияния не искажал результат измерения  $\operatorname{tg}\delta$ . Нарисуйте соответствующую векторную диаграмму.

#### 9. Задание на измерения

1. Подключите прибор Вектор 2.0 для измерения  $\operatorname{tg}\delta$  изоляции высоковольтного ввода. Для фиксированного значения испытательного напряжения запишите показания прибора  $\delta$ ,  $\operatorname{tg}\delta$ ,  $I_0$ ,  $I_x$ ,  $C_x$ ,  $U_{\dots}$ . Какие из этих величин являются измеренными, а какие расчетными. По измеренным величинам определите расчетные величины и сравните их с показаниями прибора.

2. Снимите зависимость  $\operatorname{tg}\delta$  от испытательного напряжения на

а) изоляции высоковольтного ввода;

б) изоляции образца в печи при комнатной температуре.

Постройте графики  $\operatorname{tg}\delta=f(U_{\dots})$ . Для каждого образца изоляции рассчитайте мощность диэлектрических потерь при различных значениях испытательного напряжения. Постройте графики  $P_d=f(U_{\dots})$ . На основе полученных данных сделайте заключение о состоянии изоляции.

3. При различных значениях фазы эдс влияния измерьте  $\operatorname{tg}\delta$  изоляции высоковольтного ввода прибором Вектор 2.0 и прибором Тангенс 2000. Данные измерений сведите в одну таблицу и постройте на одном графике. Объясните полученные результаты. Для значений  $\operatorname{tg}\delta$ , которые измерены прибором Вектор 2.0, проведите компенсацию тока влияния.

4. Установите некоторое значение фазы эдс влияния. Компенсируйте эдс влияния путем изменения фазы испытательного напряжения на  $180^\circ$ .

5. Снимите зависимость  $\operatorname{tg}\delta$  от температуры для образца изоляции, находящегося в печи. Постройте график  $\operatorname{tg}\delta=f(T)$ . Объясните полученный результат.

#### 10. Контрольные вопросы

1. В чем заключается отличие потерь в проводнике от потерь в диэлектрике?

2. Дополните график, представленный на рис.5, синусоидами напряжения  $u_{\dots}$  и тока потерь  $i_R$ .

3. При измерениях получено отрицательное значение тангенса угла диэлектрических потерь. Объясните полученный результат.
4. Что такое ток влияния? Каков его частотный диапазон?
5. Назовите методы устранения влияния внешнего электрического поля промышленной частоты на результат измерения  $\text{tg}\delta$  и опишите суть этих методов.
6. Каково назначение переключателя П на рис 15
7. Постройте векторные диаграммы, характеризующие компенсацию тока влияния для случая, когда фаза испытательного напряжения неизменна, а фаза эдс влияния может быть изменена.

#### Список литературы

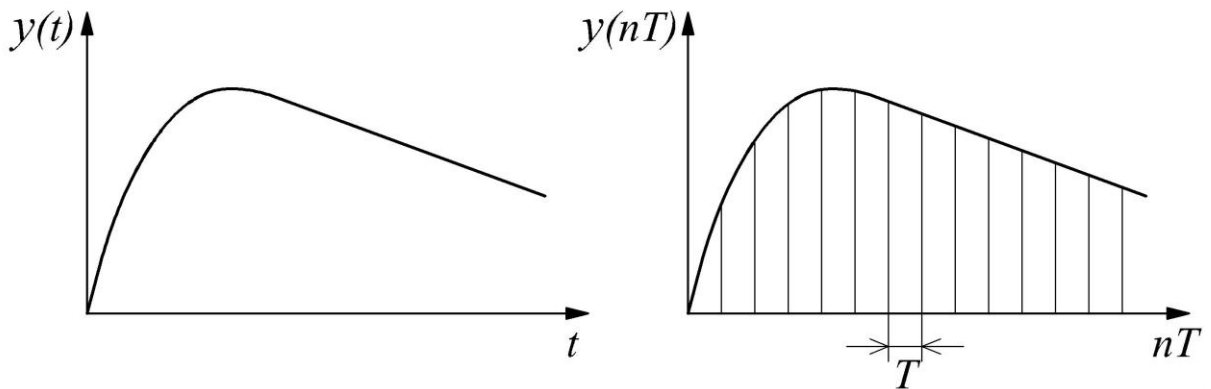
1. Техника высоких напряжений. Под редакцией Д.В. Разевига, М. Энергия , 1976, с.488.
2. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования/ под ред. Ф.Л. Когана. – М.: АО «Фирма ОРГРЭС», 1998. – 94 с

#### Приложение 1

#### Дискретизация сигнала

Различают следующие типы сигналов аналоговый, дискретный и цифровой. Каждому типу сигнала соответствует определенная форма математического описания.

Аналоговый сигнал является непрерывной функцией непрерывного аргумента рис П1а, то есть он определен для любого значения аргумента и описывается непрерывной функцией  $y(t)$ .



а) Аналоговый сигнал

б) Дискретный сигнал

Рис. П1 Аналоговый и дискретный сигнал

Дискретизация аналогового сигнала состоит в том, что сигнал представляется в виде последовательности значений, взятых в дискретные моменты времени  $n \cdot T$ , которые называются отсчетами. Величина  $n$  называется номером отсчета, а  $T$  - интервалом дискретизации. Как правило, отсчеты берутся за равные промежутки времени. Дискретный сигнал по множеству своих значений является конечным рис. П1б и описывается функцией  $y(n \cdot T)$ .

Для того, чтобы получить цифровой сигнал из аналогового следует сначала превратить аналоговый сигнал в дискретный, а затем произвести квантование. При квантовании вся область значений сигнала разбивается на уровни. Каждому уровню присваивается некоторое число. Расстояния между этими уровнями называется шагом квантования  $\Delta u$  рис. П2.



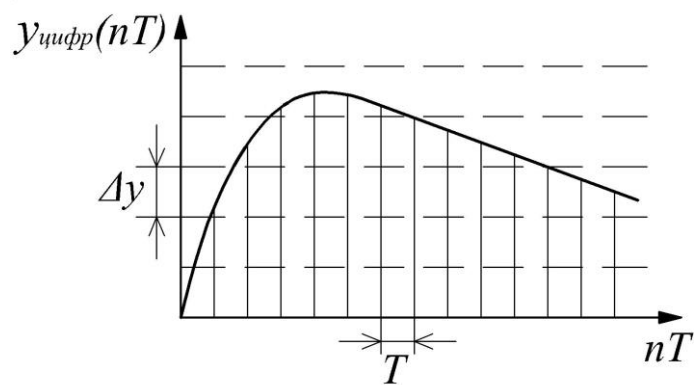


Рис.2 К получению цифрового сигнала

Отсчёты сигнала сравниваются с уровнями квантования. В качестве значения сигнала выбирается число, соответствующее некоторому уровню квантования. Цифровой сигнал описывается функцией  $y_{цифр}(nT)$ , которая, может принимать только конечное число значений.