

**Тангенс угла
диэлектрических потерь,
измерение показателя
диэлектрических потерь**

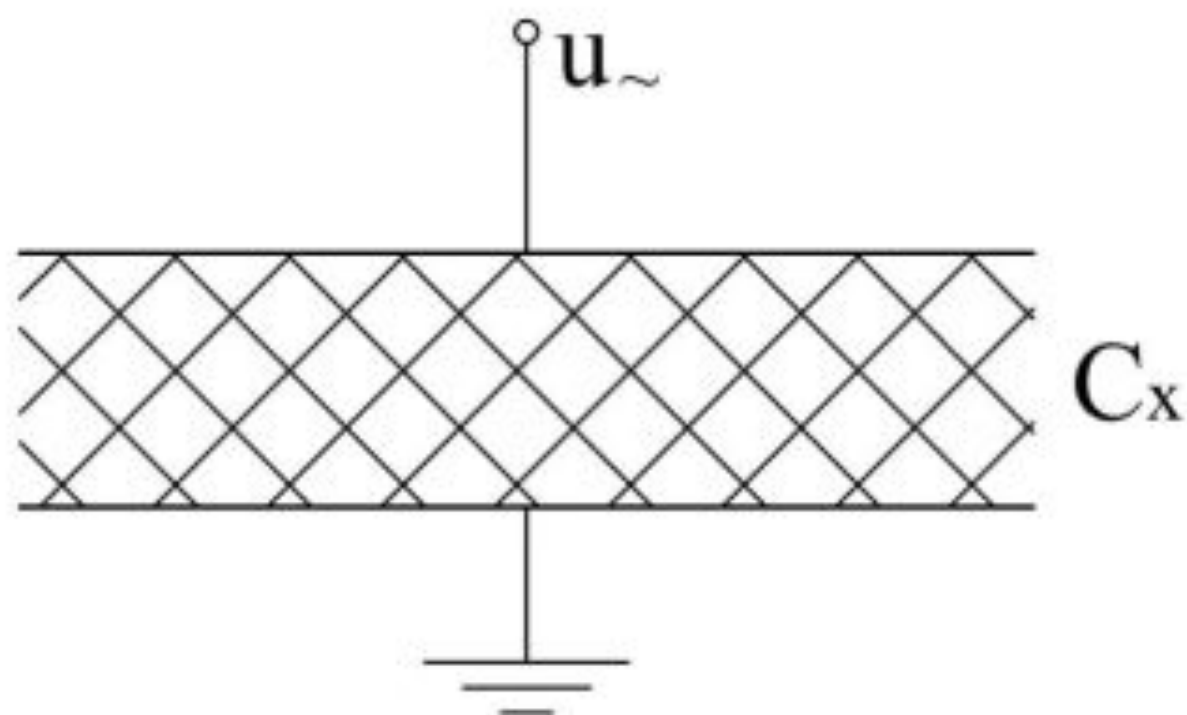
Диэлектрическими потерями называют энергию, рассеиваемую в электроизоляционном материале под воздействием на него электрического поля. Способность диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле обычно характеризуют **углом диэлектрических потерь**, а также **тангенсом угла диэлектрических потерь**. При испытании диэлектрик рассматривается как диэлектрик конденсатора, у которого измеряется емкость и угол δ , дополняющий до 90° угол сдвига фаз между током и напряжением в емкостной цепи. Этот угол называется **углом диэлектрических потерь**.

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.

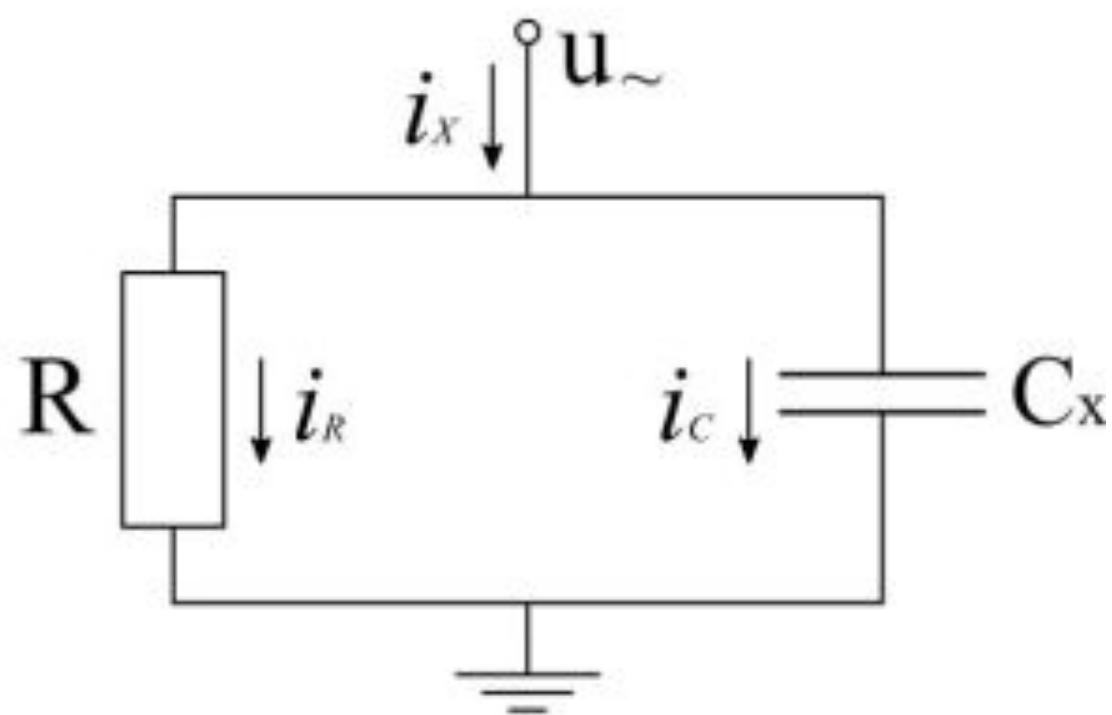
Электронная и ионная поляризация относятся к быстрым видам поляризации, которые устанавливаются за очень малое время 10^{-10} - 10^{-15} с. Релаксационная и миграционная поляризация относятся к медленным видам поляризации. Например, при миграционной поляризации время, необходимое для установления поляризации,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

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.



а) диэлектрик в электрическом поле



б) схема замещения диэлектрика

Рис.1 Схема замещения диэлектрика с потерями

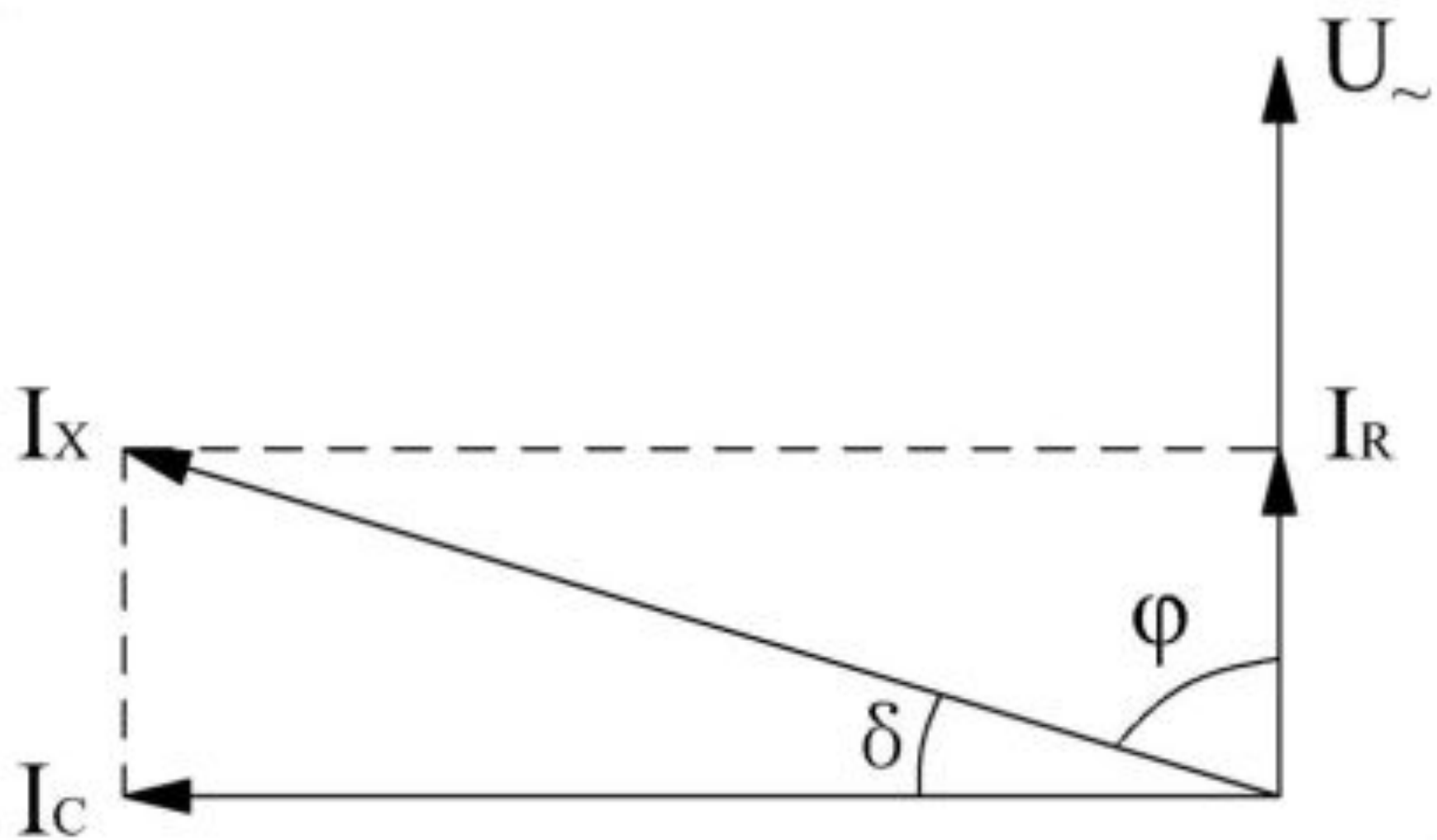


Рис.2 Векторная диаграмма диэлектрика с потерями

Тангенсом угла диэлектрических потерь называется отношение активной составляющей тока I_R , протекающего 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 ω – 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

$$C_x = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S/d \quad (3)$$

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

где ε_0 – диэлектрическая постоянная, ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды, ρ_v – удельное объемное сопротивление диэлектрика.

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

$$\operatorname{tg}\delta = 1/(\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \rho_v) \quad (5)$$

Определим мощность диэлектрических потерь P_D в диэлектрике

$$P_D = I_R \cdot U_{\sim} = I_c \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot U_{\sim} = \omega \cdot C_x \cdot U_{\sim}^2 \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (6)$$

где U_{\sim} - действующее значение напряжения.

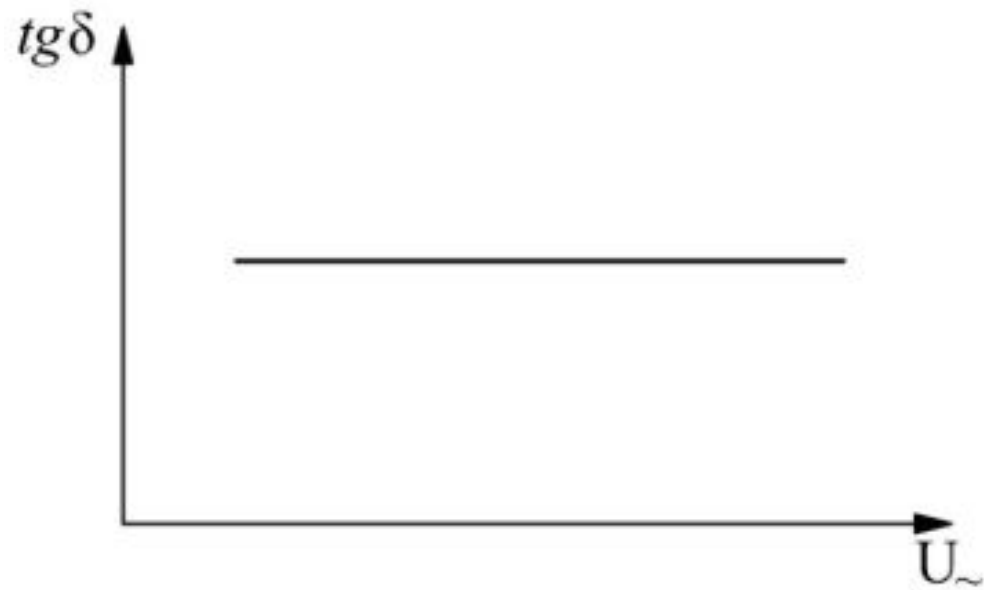
Исходя из (6) мощность диэлектрических потерь связана с тангенсом угла диэлектрических потерь соотношением

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

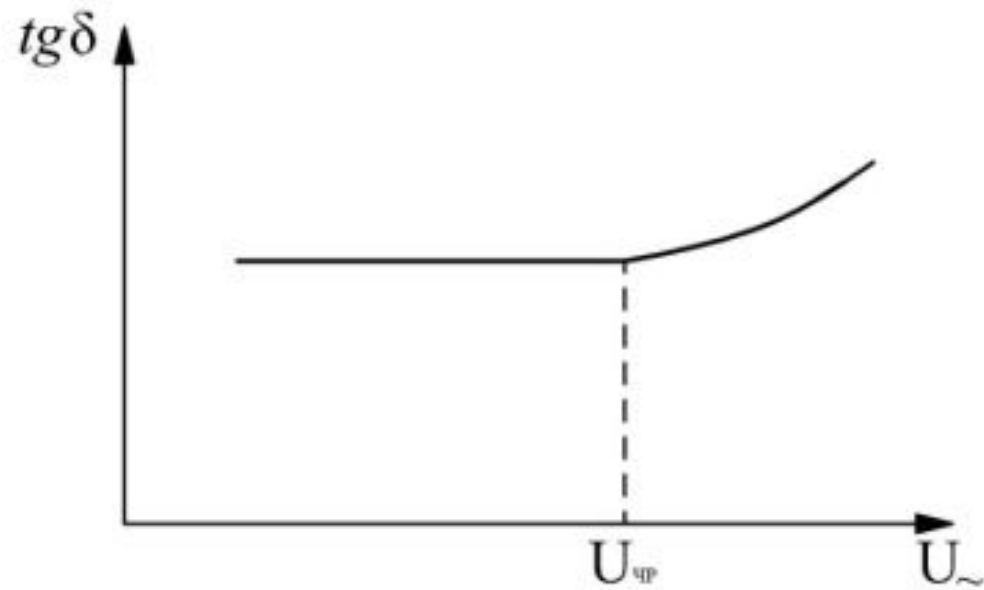
Измерение тангенса угла диэлектрических потерь при напряжении промышленной частоты используется для контроля изоляции электрооборудования высокого напряжения. Предельно допустимое значение $\operatorname{tg} \delta$ нормируется для различных видов изоляции. Если измеренное значение $\operatorname{tg}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

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

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



а)изоляция нормального качества



б)изоляция с дефектами
в виде частичных разрядов

Рис.3 Зависимость $tg\delta$ 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 γ – удельная объемная проводимость; ω – круговая частота, $\epsilon_{\text{мн}}$ и $\epsilon_{\text{действ}}$ – мнимая и действительная составляющая комплексной относительной диэлектрической проницаемости.

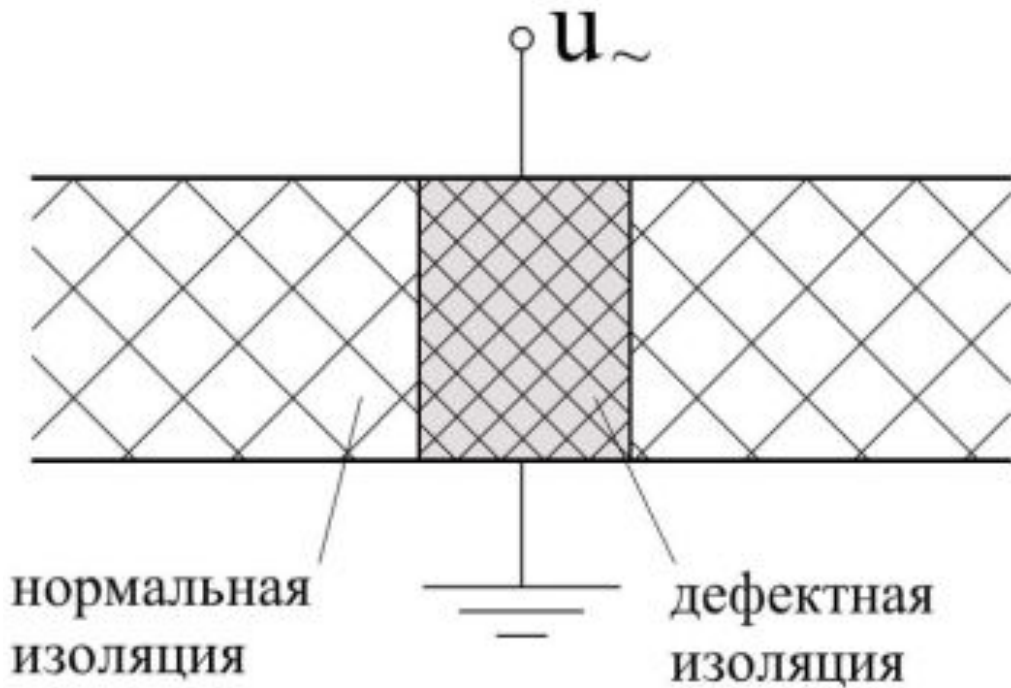
С ростом температуры диэлектрика в нем возрастает количество свободных зарядов, поэтому его проводимость увеличивается. Следовательно, с ростом температуры будет увеличиваться значение тангенса угла диэлектрических потерь

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

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

Значения $\text{tg}\delta$ для некоторых диэлектриков при температуре 20°C и частоте испытательного напряжения 50 Гц. Если для какого - либо участка изоляции электрооборудования были проведены два измерения $\text{tg}\delta$ при разной температуре изоляции, то для оценки состояния изоляции данные измерений должны быть приведены к одной температуре

Диэлектрик	$\text{tg}\delta$
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 известны значения тангенса угла диэлектрических потерь для нормальной изоляции $\text{tg}\delta_{\text{н}}$ и для дефектной изоляции $\text{tg}\delta_{\text{д}}$, объем нормальной $V_{\text{н}}$ и дефектной $V_{\text{д}}$ изоляции, а также относительную диэлектрическую проницаемость для нормальной $\epsilon_{\text{н}}$ и дефектной изоляции $\epsilon_{\text{д}}$.

$$\text{tg}\delta_{\text{изм}} = (\epsilon_{\text{н}} V_{\text{н}} \text{tg}\delta_{\text{н}} + \epsilon_{\text{д}} V_{\text{д}} \text{tg}\delta_{\text{д}}) / (\epsilon_{\text{н}} V_{\text{н}} + \epsilon_{\text{д}} V_{\text{д}}),$$

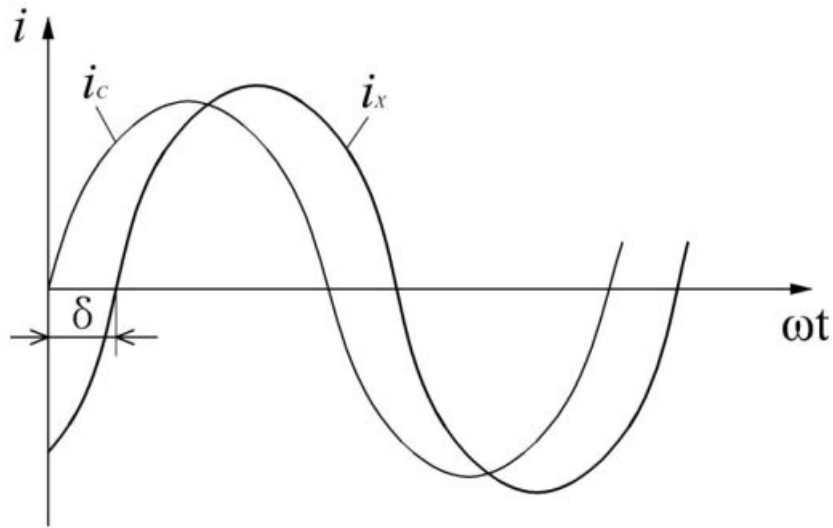
Измеряемое значение $\text{tg}\delta_{\text{изм}}$ будет следующим выражением

$$\text{tg}\delta_{\text{изм}} = \text{tg}\delta_{\text{н}} \{ 1 + (V_{\text{д}} / V) [(\text{tg}\delta_{\text{д}} / \text{tg}\delta_{\text{н}}) - 1] \}$$

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

Принцип измерения тангенса угла диэлектрических потерь

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



В основу измерения $\operatorname{tg} \delta_d$ 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.

Производится измерение тока через эталонный конденсатор емкостью C^0 . Эталонным называется конденсатор, диэлектрические потери которого пренебрежимо малы ($\operatorname{tg} \delta = 0$). 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 .

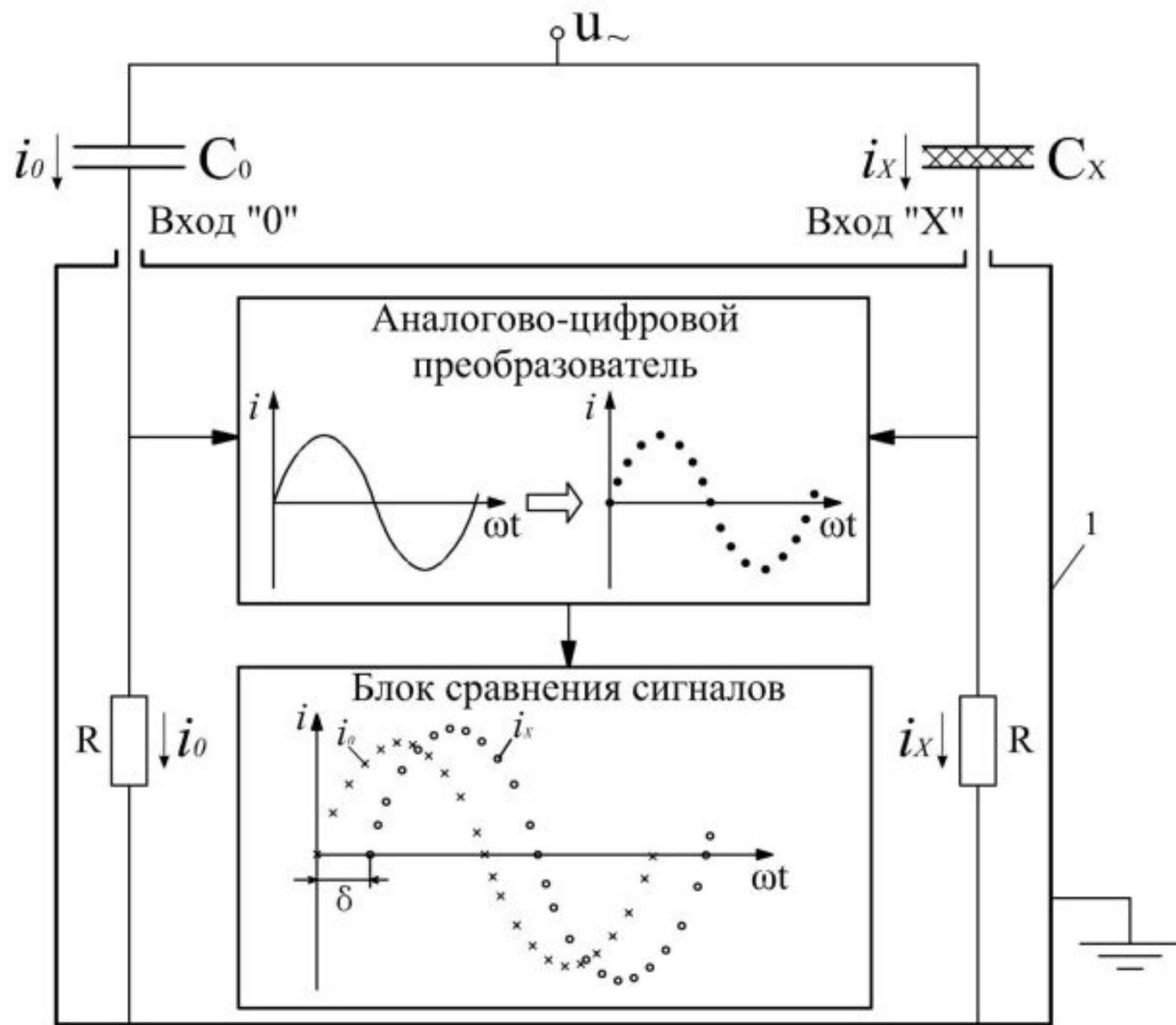


Рис.6 Блок-схема измерения угла диэлектрических потерь
 1- корпус измерительного прибора, C_x - контролируемая изоляция; C_0 - эталонный конденсатор, R - измерительное сопротивление

Испытательное напряжение промышленной частоты приложено к изоляции испытуемого объекта S_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 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 δ в приборе производится вычисление $\operatorname{tg}\delta$. Таким образом, установка для измерения $\operatorname{tg}\delta$ изоляции должна включать в себя источник испытательного напряжения, измерительный прибор и эталонный конденсатор. В некоторых измерительных приборах имеется встроенный эталонный конденсатор.

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

где f – частота испытательного напряжения и...

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

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

Из уравнения (13) определяем искомое значение C_x

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

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

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

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

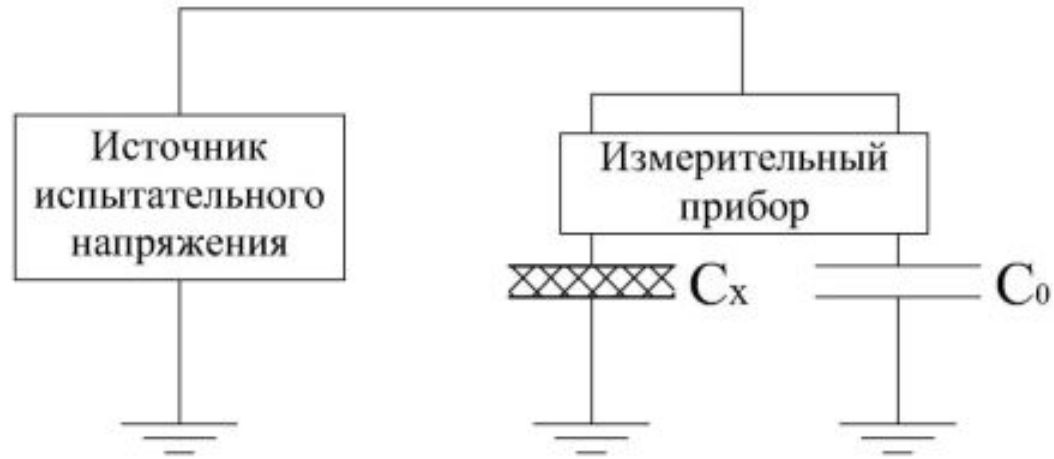


Рис. 7 Перевернутая схема подключения прибора для измерения $\text{tg}\delta$ изоляции

1. 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. Недостаток - измерительный прибор находится под высоким напряжением.

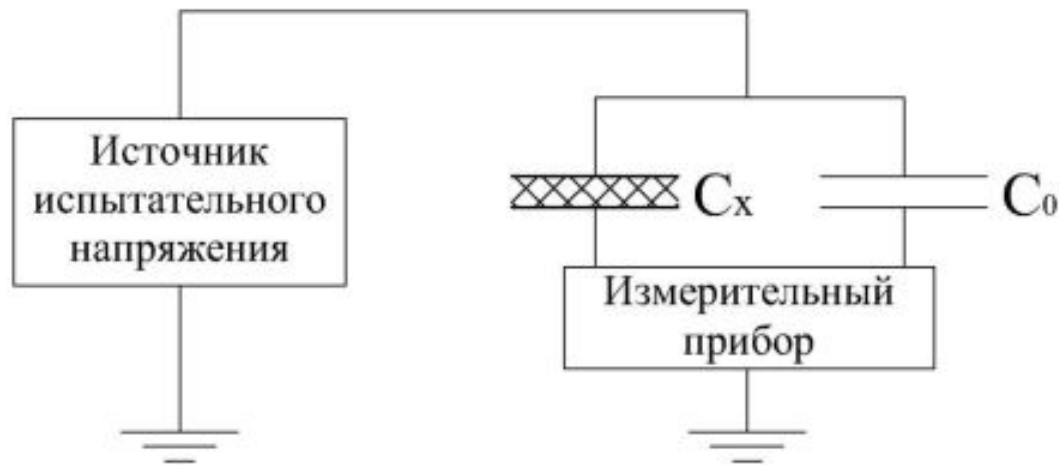


Рис. 8 Прямая схема подключения прибора для измерения $\text{tg}\delta$ изоляции

2. измерительный прибор расположен между низкопотенциальным выводом изоляции объекта и землей. 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.