

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
КУРГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Энергетика и технология металлов»

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТАНГЕНСА УГЛА  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ  
ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы  
по курсу «Электротехнические материалы»  
для студентов специальности  
140211 (100400) «Электроснабжение»

Курган 2010

Кафедра: «Энергетика и технология металлов»

Дисциплина: «Электротехнические материалы»

Составили: доцент, канд.техн.наук Т. А. Дудорова,  
ст.преподаватель И. А. Семкина.

Работа выполнена при равноценном участии авторов.

Утверждены на заседании кафедры 3 декабря 2009 г.

Рекомендованы методическим советом университета « 24 » декабря 2009 г.

## ***Цель работы***

Научиться определять тангенс диэлектрических потерь различных диэлектрических материалов.

## ***Приборы и материалы***

1. Прибор для измерения тангенса угла диэлектрических потерь ИТП-1М.
2. Набор диэлектрических материалов.

## ***Введение***

Диэлектрическими потерями называют мощность, рассеиваемую в диэлектрике при воздействии на него электрического поля. Недопустимо большие диэлектрические потери в диэлектрике вызывают его сильный нагрев.

С физической точки зрения различают три главных процесса, следствием которых являются диэлектрические потери.

Главным процессом, вызывающим диэлектрические потери, является процесс электропроводности. Вызванные этим потери называются *потерями на электропроводность*.

К потерям на электропроводность добавляются *потери на поляризацию*. Известно, что при воздействии на диэлектрик электрического поля в нем возникает ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация дипольных молекул, т.е. явление поляризации.

Существует два вида поляризации. ***Упругая*** поляризация завершается мгновенно за время  $t$ , намного меньшее полупериода  $T/2 = 1/(2f)$  ( $f$ -частота, Гц) приложенного напряжения. Поэтому процесс быстрой поляризации создает в диэлектрике только реактивный ток. К быстрым поляризациям относятся ***электронная*** (завершается за время  $10^{-16} \dots 10^{-15}$  с) и ***ионная упругая*** (завершается за время  $10^{-14} \dots 10^{-13}$  с). ***Неупругая*** поляризация завершается за время соизмеримое с  $T/2$ .

## ***Упругая поляризация***

***1. Электронная поляризация.*** В электрическом поле в атомах, ионах или молекулах, из которых построен диэлектрик, деформируются (смещаются) электронные оболочки, главным образом внешние. Смещение электронов происходит на малые ( $10^{-13}$  м) расстояния в пределах своих атомов и молекул. Такая поляризация происходит у всех диэлектриков независимо от их агрегатного состояния и существования в них других видов поляризации.

На рис.1а схематически изображены деформация в электрическом поле электронной оболочки атома водорода и образование в поляризованной частице квазиупругого (как бы упругого) электрического момента  $m_p$ .

Диэлектрики, у которых имеет место только электронная поляризация, называются *неполярными* диэлектриками. Например, неполярными диэлектриками являются газы – гелий, водород, азот, метан; жидкости - бензол, тетраформ (четырёххлористый углерод); твердые - алмаз, полиэтилен, фторопласт-4, парафин.

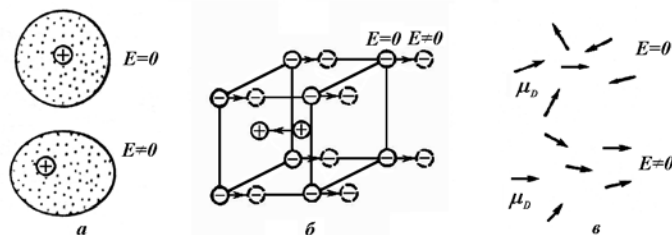


Рис.1. Схемы электронной (а), ионной упругой (б) и дипольной (в) поляризации

2. *Ионная упругая поляризация.* Она происходит в кристаллических диэлектриках, построенных из положительных и отрицательных ионов: в галоидо-щелочных кристаллах, слюде, керамике. В электрическом поле в таких диэлектриках происходит смещение электронных оболочек в каждом ионе - электронная поляризация. Смещаются друг относительно друга подрешетки из положительных и отрицательных ионов (см. рис. 1б), т.е. происходит упругая ионная поляризация.

### **Неупругая поляризация**

1. *Дипольная поляризация* наблюдается в полярных газообразных и жидких диэлектриках. Полярные диэлектрики построены из полярных молекул, в которых центры положительных и отрицательных зарядов не совпадают (рис.1в). Полярная молекула имеет собственный электрический момент (дипольный момент)  $\mu_D$  (Кл · м). Из полярных молекул состоят газообразные аммиак  $NH_3$ , пары воды и спиртов. Полярными жидкостями являются вода, хлорбензол  $C_6H_5Cl$  и нитробензол  $C_6H_5NO_2$ .

2. *Ионно-релаксационная поляризация.* Используемые в технике твердые диэлектрики могут иметь неплотную упаковку объема частицами. В таких материалах образуются ионы, которые в ходе тепловых колебаний перемещаются из положений временного закрепления на расстояния, соизмеримые с расстояниями между частицами ( $10^{-10}$  м), и закрепляются в

новых положениях В электрическом поле такие перемещения становятся направленными. В результате в диэлектрике возникает различие в расположении центров положительного и отрицательного зарядов, т.е. появляется электрический момент. Такой процесс называют ионно-релаксационной поляризацией.

3. *Миграционная поляризация.* Электроизоляционные материалы могут быть неоднородными, состоящими из диэлектриков, у которых  $\epsilon_r$  и  $\sigma$  различаются.

4. *Спонтанная (самопроизвольная) поляризация. Доменная поляризация. Сегнетоэлектрики.* Характерные для сегнетоэлектриков свойства впервые были обнаружены у сегнетовой соли. В дальнейшем сегнетоэлектриками стали называть вещества, свойства которых подобны свойствам сегнетовой соли. В сегнетоэлектриках даже в отсутствие электрического поля наблюдается самопроизвольное смещение частиц – ионов в ионных кристаллах или полярных радикалов молекул, которое приводит к несовпадению центров положительного и отрицательного зарядов в объеме диэлектрика, то есть поляризации. Такая поляризация называется спонтанной. В результате в диэлектрике образуются области – домены. В каждом домене частицы, обуславливающие самопроизвольную поляризацию, смещены в одном направлении.

В области сильных электрических полей к указанным процессам добавляются *потери на ионизацию*, которые возникают при ионизации диэлектрика.

При включении на постоянное напряжение конденсатора, между электродами которого находится диэлектрик, через него протекает уменьшающийся со временем ток

$$I = I_{абс} + I_{ск},$$

где  $I_{абс}$  – спадающий со временем ток абсорбции обусловлен смещением связанных зарядов в ходе медленных поляризаций и вызывает рассеяние энергии в диэлектрике, диэлектрические потери.

$I_{ск}$  – сквозной ток утечки вызван перемещением свободных зарядов в диэлектрике в процессе электропроводности и не изменяется со временем (в отсутствие электроочистки диэлектрика или его старения) и вызывает потери, аналогичные джоулевым потерям в проводнике.

Следовательно, при постоянном напряжении потери, вызванные током абсорбции, имеют место только в период, когда происходит процесс медленных

поляризаций, т.е. при включении конденсатора.

При переменном напряжении  $I_{abc}$  имеет место, если время релаксации процесса медленных поляризаций меньше или соизмеримо с полупериодом приложенного напряжения  $\tau = T/2$ .

Потери в этом случае наблюдаются в течение всего времени воздействия приложенного напряжения.

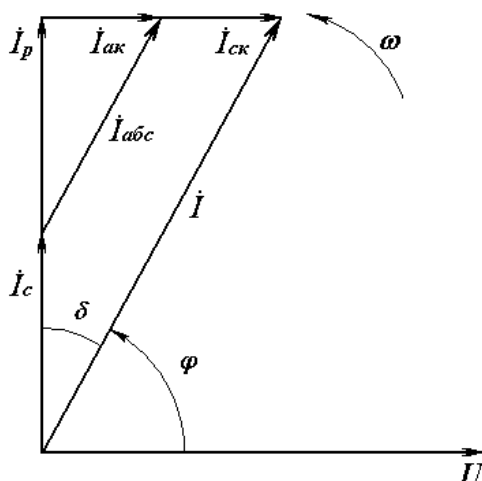


Рис. 2. Векторная диаграмма токов, протекающих через диэлектрик при переменном напряжении

На рис. 2 представлена векторная диаграмма токов, протекающих через конденсатор с диэлектриком при переменном напряжении.  $I_c$  - емкостный ток (ток смещения) обусловлен смещением электронных оболочек в атомах, ионах и молекулах (т.е. процессом установления быстрых, упругих поляризаций).  $I_c$  спадает в течение  $10^{-16} - 10^{-15}$  и опережает напряжение  $U$  по фазе на угол  $90^\circ$ , не вызывая диэлектрических потерь.  $I_{abc}$  – ток абсорбции, имеет  $I_a$  - активную и  $I_p$  – реактивную составляющие.  $I_{ск}$  – сквозной ток совпадает по фазе с приложенным  $U$ . Суммарный ток  $I$  имеет реактивную  $I = I_c + I_p$  и активную  $I_a = I_{ак} + I_{ск}$  составляющие и опережает  $U$  на угол  $\varphi < 90^\circ$ .

Угол  $\delta$ , дополняющий до  $90^\circ$  угол фазового сдвига между током и напряжением в емкостной цепи, называют углом диэлектрических потерь. В соответствии с векторной диаграммой токов

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_p}, \quad (1)$$

где  $\operatorname{tg} \delta$  - тангенс диэлектрических потерь, который является важным

параметром, характеризующим качество диэлектрика при работе при переменном напряжении.

Для идеального диэлектрика вектор тока в такой цепи будет опережать вектор напряжения на  $90^\circ$ , при этом угол диэлектрических потерь  $\delta$  будет равен нулю. Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в теплоту, тем меньше угол фазового сдвига  $\varphi$  и тем больше угол  $\delta$  и его функция  $\operatorname{tg} \delta$ .

Недопустимо большие диэлектрические потери в электроизоляционном материале вызывают сильный нагрев изготовленного из него изделия и могут привести к его тепловому разрушению. Даже если напряжение, приложенное к диэлектрику, недостаточно велико для того, чтобы за счет диэлектрических потерь мог произойти недопустимый перегрев, то и в этом случае большие диэлектрические потери могут принести существенный вред, увеличивая, например, активное сопротивление колебательного контура, в котором использован данный диэлектрик, а следовательно, и величину затухания.

Для диэлектриков, применяемых в технике высоких частот и высоких напряжений, значение  $\operatorname{tg} \delta$  не должно превышать  $10^{-4} \dots 10^{-3}$ . Значение  $\operatorname{tg} \delta$  диэлектриков, предназначенных для работы в менее ответственных условиях, допускается бóльшим.

Если емкость конденсатора  $C$ , то реактивный ток

$$I_p = \omega UC, \quad (2)$$

где  $U$  – приложенное напряжение, В,

$\omega$  – угловая частота, равная  $2\pi f$ , рад/с;

$f$  – частота приложенного напряжения, Гц.

Следовательно, активная составляющая суммарного тока

$$I_a = I_p \operatorname{tg} \delta = \omega UC \operatorname{tg} \delta. \quad (3)$$

Тогда мощность  $P_a = UI_a$  выделяющихся в конденсаторе диэлектрических потерь определяется формулой

$$P_a = \omega U^2 C \operatorname{tg} \delta. \quad (4)$$

Подставив в формулу (4) значение емкости плоского конденсатора, которая рассчитывается по формуле

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{h}, \quad (5)$$

где  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – электрическая постоянная, приняв  $S = 1\text{ м}^2$ ,  $h = 1\text{ м}$  и учитывая, что напряженность электрического поля  $E = U/h$ , получаем выражение для определения удельных диэлектрических потерь:

$$P_{a.уд.} = 5,567 \cdot 10^{-11} \cdot E^2 \cdot \epsilon_r \cdot f \cdot \text{tg}\delta. \quad (6)$$

Диэлектрические потери определяются в данной работе с помощью прибора типа ИТП-1М.

### **Принцип работы прибора ИТП-1М**

Функциональная схема измерителя тангенса угла диэлектрических потерь ИТП-1М представлена на рис. 3.

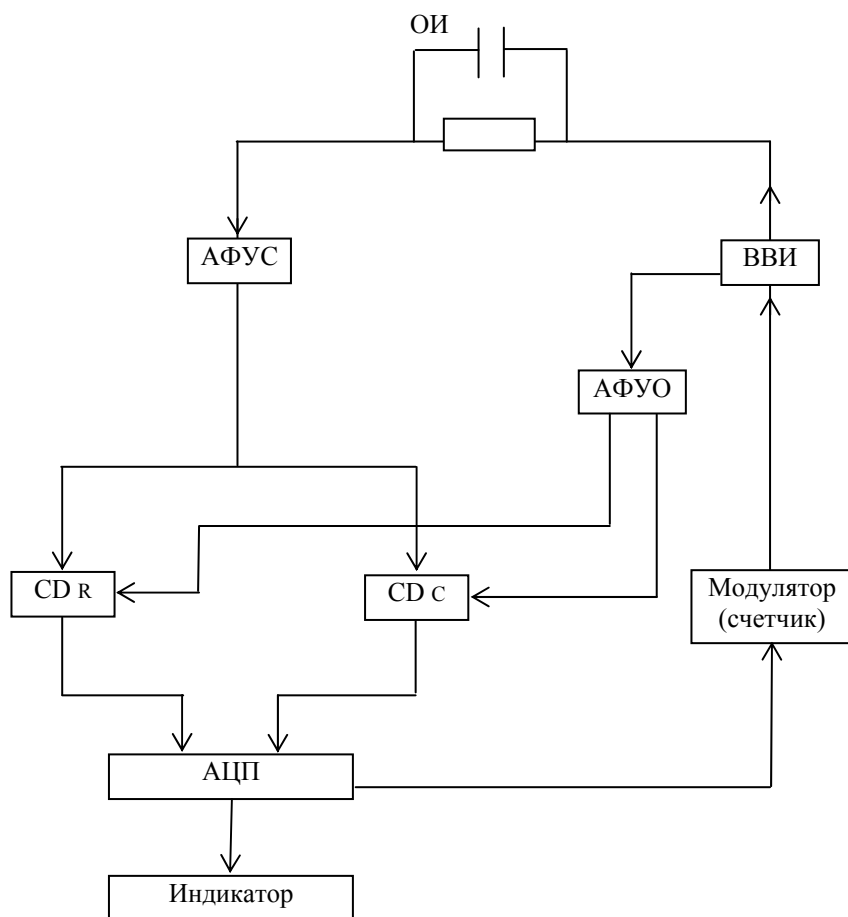


Рис. 3. Функциональная схема ИТП-1М

Внешним по отношению к измерительному блоку элементом является объект измерений (ОИ), обозначенный на схеме емкостью и сопротивлением.



В состав ИТП-1М входят:

ВВИ – высоковольтный источник;

АФУС – активный фильтр – усилитель сигнала;

АФУО – активный фильтр – усилитель опорного сигнала;

CD<sub>R</sub> – синхронный детектор активной составляющей;

CD<sub>c</sub> – синхронный детектор емкостной составляющей;

МОДУЛЯТОР - предназначен для управления амплитудой высоковольтного источника.

АЦП – аналого-цифровой преобразователь;

ИНДИКАТОР – цифровой жидкокристаллический индикатор.

Принцип работы приборы ИТП-1М заключается в измерении отношения активной и реактивной составляющей тока, проходящего через исследуемый объект, при приложении к нему от встроенного в прибор источника высокого напряжения.

На объект измерений подается напряжение прямоугольной формы амплитудой 1,5 кВ, частотой 12,5 Гц и экспоненциальными фронтами длительностью 30 мс. Ток, прошедший через изолятор, усиливается активным фильтром усилителем сигнала (АФУС), где выделяется его первая гармоника 12,5 Гц. С выхода АФУС напряжение синусоидальной формы поступает на входы двух взаимно ортогональных синхронных детекторов, которые выделяют соответственно емкостную и активную составляющую сигнала. Опорные напряжения синхронных детекторов получают из высоковольтного напряжения на входе исследуемого объекта при помощи активного фильтра – усилителя опорного сигнала (АФУО), двух фазовращающих усилителей и формирователей опорных напряжений. Сигналы с выходов синхронных детекторов активной и реактивной составляющей поступают соответственно на сигнальный и опорный входы АЦП, где и происходит измерение их отношения. Результат отображается на цифровом жидкокристаллическом индикаторе. Сигнал частотой 12,5 Гц синхронизирующий работу всего блока, получается в результате деления частоты тактового генератора АЦП при помощи счетчика. Этот сигнал является управляющим для высоковольтного источника.

Так как принцип работы прибора основан на измерении активной и реактивной составляющих тока, протекающего через исследуемый образец, а сопротивление диэлектрического материала очень большое, то для обеспечения величины тока соответствующей чувствительности элементов схемы измерения, необходимо приложить к образцу большое напряжение. В данном приборе ИТП это напряжение равно 1500 В, что весьма опасно при случайном прикосновении к оголенным участкам измерительной цепи прибора.

С целью обеспечения безопасных приемов работы исследуемые образцы и контактные зажимы измерительной цепи прибора необходимо размещать в специальном ящике с прозрачной крышкой, который содержит блокировочный выключатель напряжения питания прибора ( $U_{\text{пп}}$ ) и световую сигнализацию (на внутренней стороне задней стенки ящика): зеленый цвет – разрешающий, красный цвет – запрещающий соприкосновение с оголенными участками измерительной цепи прибора. Только при закрытой крышке ящика подается напряжение питания на прибор (световой сигнал красного цвета). При открытой крышке ящика напряжение питания прибора отключается, что подтверждается световым сигналом зеленого цвета. При этом разрешается установка (замена) исследуемого образца.

### ***Порядок измерений***

1. Подсоединить провода измерительной цепи с зажимами к клеммам ВН и ВХОД прибора.
2. Зажимы измерительной цепи прибора расположить в ящике, уложив их провода в пазах боковых стенок ящика.
3. Вход ящика (разъем «от БП» на задней стенке ящика) соединить при помощи разъема к выходу блока питания (БП).
4. Выход ящика (провод с разъемом «к  $U_{\text{пп}}$ » на задней стенке ящика) соединить при помощи разъема с гнездом ИП прибора.
5. Выбрать по заданному преподавателем номеру исследуемый образец и подключить его контактные площадки к зажимам измерительной цепи прибора.
6. Закрыть крышку ящика.
7. Проверить правильность выполненных соединений.
8. Установить переключатель рода работы прибора в положение «выкл».
9. Вставить вилку БП в розетку с напряжением сети 220В, 50Гц.

### **Должен быть световой сигнал красного цвета.**

10. Убедиться в исправности блокировочного выключателя, для чего приподнять на 20-30 мм передний край крышки ящика – **световой сигнал должен смениться на зеленый.**
11. Включить питание прибора, переведя переключатель рода работ в состоянии ВКЛ. При этом на табло прибора должны появляться случайные числа.
12. Переключатель рода работ перевести в состояние ВН (включить высокое

напряжение) и по индикатору произвести измерение значения  $tg\delta$  различных диэлектриков; проверить влияние влажности, замеры проводить 3 раза и средние значения записать в табл. 1.

13. За истинные величины  $tg\delta$  принимать средние значения частных обчетов, которые могут изменяться не более чем на 2-3 знака в младшем разряде. Следует помнить, что показания  $tg\delta$  на табло выводятся в процентах.

14. Результаты замеров записать в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений  $tg\delta$  различных диэлектриков

Вид диэлектрика	$tg\delta, \%$	
	При нормальной влажности	При повышенной влажности

### ***Содержание отчета***

1. Цель работы.
2. Краткое описание сущности диэлектрических потерь.
3. Порядок выполнения работы.
4. Начертить функциональную схему ИТП-1М.
5. На основании опытных данных выбрать лучший диэлектрик.
6. Сделать выводы по работе.

### ***Контрольные вопросы***

1. Назовите основные виды диэлектрических потерь.
2. Существуют ли диэлектрики без потерь?
3. Что характеризует собой угол диэлектрических потерь  $tg\delta$ ?
4. Что является источником потерь в газах?
5. Какой вид потерь возрастает при высоких температурах у всех диэлектриков?
6. Какого порядка  $tg\delta$  у лучших диэлектриков?
7. Имеются диэлектрики с  $\epsilon_r = 2$  и  $\epsilon_r = 6$ . У какого из них будут большие потери при прочих равных условиях?

Дудорова Татьяна Александровна  
Семкина Ирина Анатольевна

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТАНГЕНСА УГЛА  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ  
ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы  
по курсу «Электротехнические материалы»  
для студентов специальности  
140211 (100400) «Электроснабжение»

Редактор Н. М. Устюгова

---

Подписано к печати  
Печать трафаретная  
Заказ

Формат 60x84 1/16  
Усл.печ.л. 0,75  
Тираж 100

Бумага тип. № 1  
Уч.-изд. л. 0,75  
Цена свободная

---

Редакционно-издательский центр КГУ.  
640669, г. Курган, ул. Гоголя, 25.  
Курганский государственный университет.