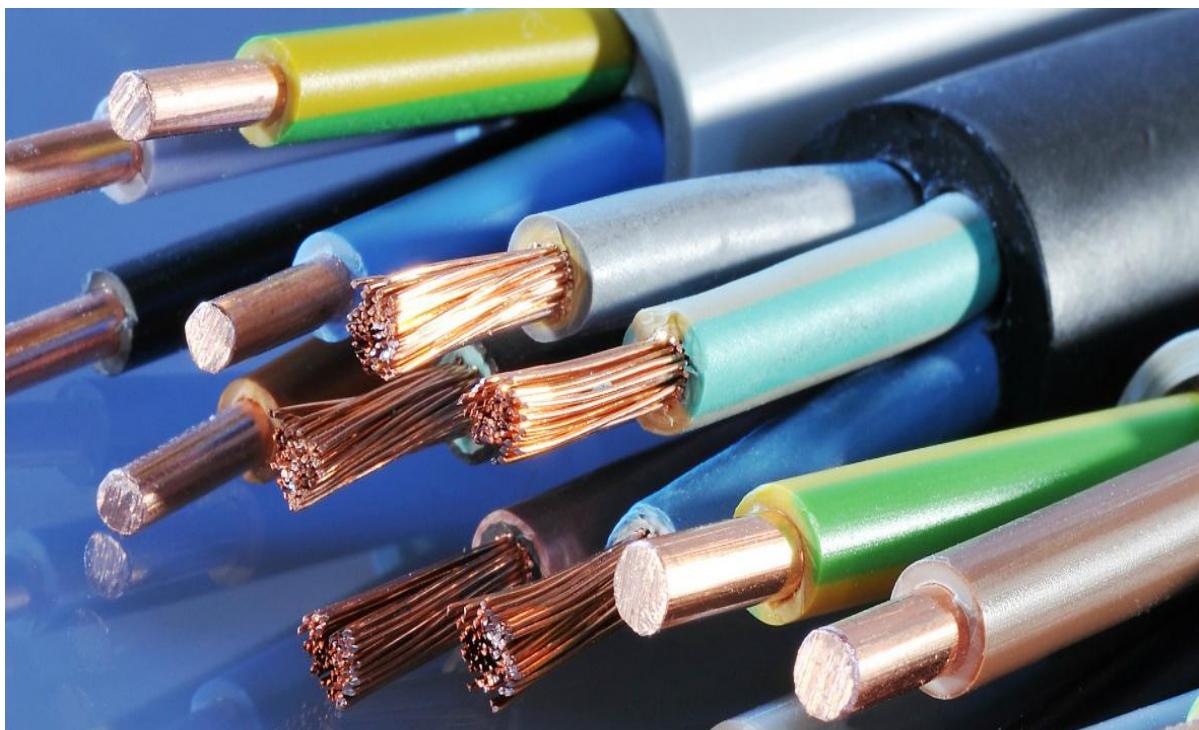


МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Казанский государственный аграрный университет»
Институт механизации и технического сервиса
Кафедра общеинженерных дисциплин

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Практикум для выполнения лабораторных и
самостоятельных работ для студентов очной и заочной форм обучения
по направлению подготовки
35.03.06 - «Агроинженерия»



Казань, 2020

УДК 620. 2, 621.31
ББК 30.3

Составители: д.т.н., профессор Мингалеев Н.З.,
к.т.н., доцент Пикмуллин Г.В.,
к.т.н., доцент Мустафин А.А.

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Машины и оборудование в агробизнесе» ФГБОУ ВО Казанский ГАУ Лукманов Р.Р.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии синтетического каучука» ФГБОУ ВО КНИТУ Зенирова Л.А.

Практикум для выполнения лабораторных и самостоятельных работ «Электротехнические материалы» по дисциплине «Материаловедение и технология конструкционных материалов» обсужден и рекомендован к печати на заседании кафедры общеинженерных дисциплин Казанского ГАУ 25 февраля 2020 года, протокол № 9 и на заседании методической комиссии Института механизации и технического сервиса Казанского ГАУ 27 февраля 2020 года, протокол № 5.

Мингалеев Н.З. Электротехнические материалы: практикум для выполнения лабораторных и самост. работ /Н.З.Мингалеев., Г.В. Пикмуллин, Мустафин А.А. - Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2020. - 20с.

Практикум предназначен для студентов, в учебный план которых включена дисциплина «Материаловедение и технология конструкционных материалов», для студентов направления подготовки 35.03.06 - «Агроинженерия».

УДК 620. 2, 621.31
ББК 30.3

© Казанский государственный аграрный университет, 2020г.

Введение

Целью данной дисциплины является формирование у студентов знаний принципов использования электротехнических материалов в устройствах электротехники и электроэнергетики.

Задачами курса являются: усвоение классификации современных электротехнических материалов (ЭТМ), изучение взаимосвязи электротехнических характеристик материалов с их структурой и процессами, происходящими в ЭТМ под влиянием электромагнитного поля, а также при воздействии различных внешних факторов.

В результате изучения этой дисциплины студент приобретает умение ориентироваться в многообразии материалов, пользоваться справочной и специальной литературой в области ЭТМ, а в лаборатории - первичные навыки экспериментального определения основных характеристик электроматериалов распространенными методами.

Обучение дисциплине базируется на знании студентами физики, химии, инженерной графики, высшей математики, механики, технологии электротехнических материалов, электротехники.

Сведения о свойствах ЭТМ окажутся весьма полезными при изучении всех дисциплин электротехнического характера, а также при исследовании вопросов экономики электроэнергетики.

Будущий специалист на основе знаний о перспективных направлениях совершенствования материалов и способов их обработки. Он должен также уметь правильно оценить надежность, экономичность и экологическую целесообразность выбора материалов при разработке новой электротехнической аппаратуры, предназначенной для различных условий эксплуатации.

При конструировании даже простейших изделий, предназначенных для работы в электрическом поле, необходимо четко представлять, какие процессы происходят в материале, как влияет тот, или иной материал на работу других частей устройства, в том числе за счет перераспределения электрического поля. Здесь необходимо учитывать разноплановые характеристики материала - механические характеристики (плотность и вес материала, прочность на сжатие, разрыв или изгиб), теплофизические характеристики, электрофизические характеристики (диэлектрическая проницаемость, электропроводность, электрическая прочность), физико-химические характеристики и т.д.

Правильный выбор электротехнических материалов для каждого конкретного случая не может быть произведен без знания их свойств, подтвержденных опытом. Поэтому изучению теоретического курса сопутствует работа в лаборатории, в ходе которой студент знакомится с аппаратурой и установками, применяемыми при исследовании электротехнических материалов.

Общие указания к выполнению лабораторных работ.

Выполнение каждой лабораторной работы складывается из следующих этапов:

1) Самостоятельная подготовка студентов к работе. Перед началом работы необходимо четко представить себе цель работы, ознакомиться со схемой установки, методами измерений, подготовить протокол измерений, содержащий таблицы для записи результатов измерений и основные расчетные формулы.

2) Проведение эксперимента. Этот этап осуществляется в соответствии с методическими указаниями, содержащимися в каждой работе. Включать схему можно только после собеседования с преподавателем, получив соответствующее разрешение. Любые изменения в схеме производятся только при отключении схемы от источника напряжения.

3) Отчет о проделанной работе должен содержать:

а) цель работы;

б) схему установки, основные технические характеристики приборов и описание методики измерения, а также расчетные формулы, используемые в работе;

в) числовой материал эксперимента и вычислений, сведенный в таблицы;

г) графики, построенные на основании числового материала эксперимента;

д) общие выводы о работе и заключение, о качестве исследованных материалов.

4) Защита лабораторной работы происходит с предоставлением отчета. При ответе на контрольные вопросы студенты должны показать понимание сущности физических явлений в исследованных материалах, объяснить полученные результаты и сделать вывод.

Техника безопасности

При выполнении работы в лаборатории студенты обязаны помнить о возможном поражении электрическим током и необходимости соблюдения правил техники безопасности.

Запрещается:

1) прикасаться к открытым токоведущим частям схем, приборов и распределительных щитов;

2) производить какие-либо изменения в схеме, находящейся под напряжением;

3) включать установку без разрешения преподавателя;

4) выполнять лабораторные работы без надзора сотрудников лаборатории;

5) оставлять без наблюдения, включенные под напряжение лабораторные установки.

Лабораторная работа №1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЩИХ И УДЕЛЬНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы

1. Изучить физические основы электропроводности диэлектриков.
2. Изучить методику измерения удельного объемного ρ_v и удельного поверхностного ρ_s сопротивлений диэлектриков.
3. Определить значения удельного объемного и поверхностного сопротивлений диэлектриков.
4. Исследовать влияние различных факторов на проводимость диэлектриков.

Основные теоретические положения

Через диэлектрик, помещенный в постоянное электрическое поле, протекает электрический ток, который складывается из двух составляющих: **тока поляризации и тока утечки, или тока сквозной проводимости.**

Токи поляризации вызваны упругим смещением связанных зарядов в процессе **поляризации**. При постоянном напряжении эти токи протекают в короткие промежутки времени в момент включения и выключения напряжения и затем постепенно затухают. У большинства диэлектриков время существования поляризационных токов не превышает долей секунд, но в некоторых случаях достигает десятков секунд и дольше, что наблюдается при замедленных видах поляризации. Токи, связанные с замедленными видами поляризации, называют **токами абсорбции**. С ними приходиться считаться при определении сопротивления диэлектриков.

Токи сквозной проводимости обусловлены наличием в диэлектрике **свободных зарядов**. Ток сквозной проводимости протекает через диэлектрик все время, пока он находится под напряжением, и по величине этого тока определяется сопротивление диэлектрика.

Сопротивление изоляции R_{uz} можно определить по формуле:

$$R_{uz} = \frac{U}{i - i_{abc}}, \quad (1.1)$$

где U - приложенное напряжение, i - наблюдаемый ток, i_{abc} - ток абсорбции.

Токи абсорбции обычно учесть трудно, поэтому принято измерять ток J_{min} через минуту после включения образца под напряжением, а сопротивление рассчитывать по формуле:

$$R_{uz} = \frac{U}{I_{min}}. \quad (1.2)$$

Для сравнительной оценки различных материалов применительно к цепи постоянного тока используют величину их **удельного сопротивления**.

Для твердых диэлектриков различают два удельных сопротивления: объемное и поверхностное.

Удельное объемное сопротивление ρ_v определяется в системе СИ для куба с ребром 1 м и выражается в Ом·м. **Удельное поверхностное сопротивление** ρ_s численно равно сопротивлению квадрата поверхности диэлектрика со стороной 1 см и измеряется в Ом. Удельные сопротивления ρ_v и ρ_s характеризуют два различных свойства диэлектрика: проводить электрический ток через толщу диэлектрика или по его поверхности. Для полной характеристики изоляционного материала нужно знать его объемное и поверхностное сопротивления.

Для определения объемного сопротивления применяется схема, приведенная на рисунке 1.1, из которой видно, что в результате разности потенциалов между электродами А и В через образец потечет ток, величина которого будет измерена гальванометром.

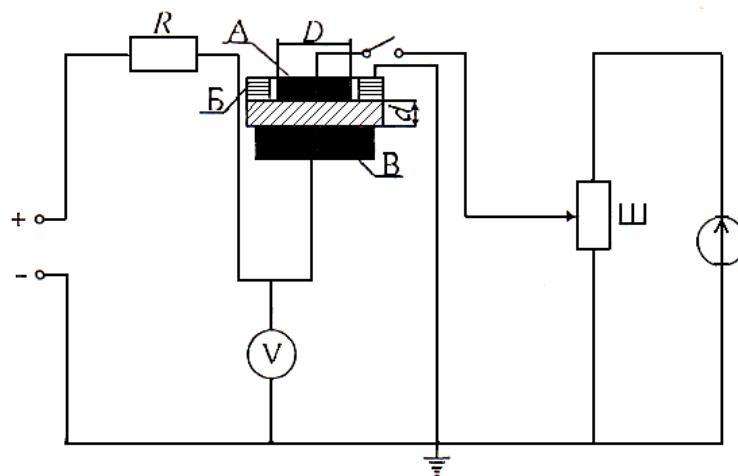


Рисунок 1.1 - Схема для определения объемного сопротивления

Зная величину приложенного напряжения и величину тока, проходящего через образец, можно найти **объемное сопротивление** образца диэлектрика, R_v , Ом:

$$R_v = \frac{U}{I_v}. \quad (1.3)$$

Величина R_v зависит как от качества диэлектрика, так и от геометрических размеров образца.

$$R_v = \rho_v \frac{d}{S}, \quad (1.4)$$

где d – толщина диэлектрика, м; S – площадь электрода, м².

При измерении объемного сопротивления весьма существенное значение имеет заземление охранного кольца – электрода Б. При незаземленном кольце на электрод А попадает не только ток, протекающий в объеме диэлектрика через расчетное сечение S , но и ток, протекающий по поверхности диэлектрика, а также ток, протекающий по объему диэлектрика, минуя сечение S .

Поверхностный ток вызывается чаще всего свободными ионами тех загрязнений, которые могут быть на поверхности материала. Для измерения поверхностного сопротивления электроды на испытываемом образце должны быть расположены так, чтобы электрическое поле вызывало движение свободных ионов в тонком поверхностном слое диэлектрика.

Для определения поверхностного сопротивления применяется схема, приведенная на рисунке 1.2, из которой видно, что вследствие разности потенциалов между электродами А и Б по поверхности диэлектрика между этими электродами будет протекать ток, величина которого измеряется гальванометром.

Зная диаметр D электрода А и внутренний диаметр D_1 кольцевого электропровода Б, можно вычислить величину удельного поверхностного сопротивления по формуле:

$$\rho_v = R_s \frac{S'}{l}, \text{ где } R_s = \frac{U}{I_s}. \quad (1.5)$$

Длина пути утечки тока по поверхности диэлектрика равна ширине зазора между электродами, т.е.

$$l = \frac{D_1 - D}{2}, \quad (1.6)$$

а условное сечение S' :

$$S' = \pi \frac{D_1 + D}{2}. \quad (1.7)$$

Тогда можно записать:

$$\rho_s = R_s \pi \frac{D + D_1}{D_1 - D}. \quad (1.8)$$

Так как поверхность загрязнить легче, чем толщу материала, то обычно ρ_s численно хотя бы на один порядок ниже, чем ρ_v ($\rho_v \geq \rho_s$).

Объемное сопротивление диэлектриков R_v зависит от температуры и величины приложенного напряжения, а для гигроскопичных диэлектриков – и от влажности и времени приложенного напряжения.

С повышением температуры удельное объемное сопротивление твердых и жидкких диэлектриков, как правило, снижается.

Объяснение уменьшения сопротивления твердых и жидкких диэлектриков при их нагреве следует искать в ослаблении связей и росте подвижности молекул и ионов вещества.

В сильных электрических полях с увеличением приложенного напряжения сопротивление диэлектриков уменьшается. Это следует объяснить вырыванием электронов силами электрического поля из объема диэлектрика и материала электродов, что и создает в диэлектрике дополнительную электропроводность электронного характера. Снижение же сопротивления с ростом напряжения в сравнительно слабых полях объясняется образованием в диэлектрике объемных зарядов,

перераспределением влаги в порах диэлектрика, влиянием контактов с электродами и другими причинами.

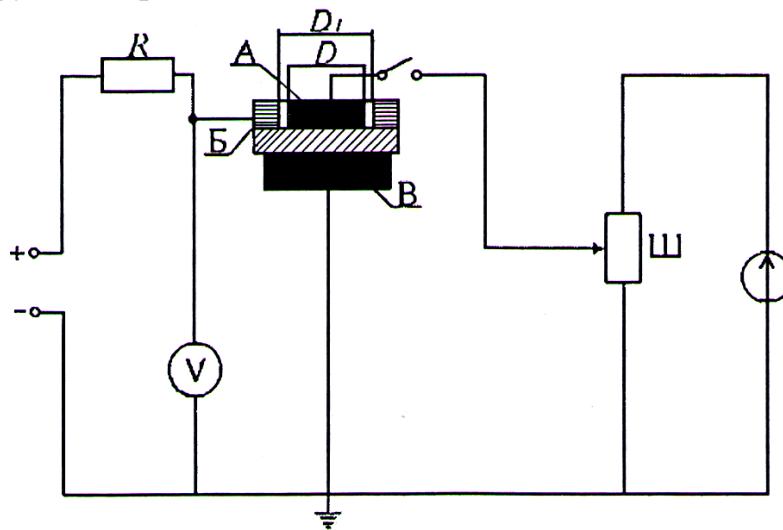


Рисунок 1.2 - Схема для определения поверхностного сопротивления

Сопротивление диэлектриков зависит также от времени приложения напряжения. Длительность приложения напряжения влечет за собой снижение величины его сопротивления, что следует объяснить постепенным развитием в его объеме путей наименьшего электрического сопротивления и образования объемных зарядов – происходит старение диэлектрика.

На величину поверхностного сопротивления твердых диэлектриков особенно сильное влияние оказывает состояние их поверхности и способность к адсорбированию на ней влаги, что связано со строением диэлектрика. Как правило, диэлектрики нейтрального строения (парафины, полистирол и др.) слабо адсорбируют влагу (не смачиваются), в связи с этим их удельное поверхностное сопротивление численно бывает почти равным удельному объемному сопротивлению.

Если поверхность диэлектриков шероховатая, то, в связи с удержанием пыли, осевшей из воздуха, или других случайно попавших частиц, поверхностное сопротивление диэлектриков будет значительно снижена.

В целях увеличения поверхностного сопротивления твердых диэлектриков, особенно при работе на открытом воздухе, их поверхность обычно шлифуется, лакируется, покрывается глазурью и пр.

Порядок и методика выполнения работы

Измерение удельного объемного и удельного поверхностного сопротивления диэлектриков.

Сопротивление образца диэлектрика измеряется методом непосредственного отсчета, который к определению тока протекающего через образец, при подведении к нему известного напряжения U . Ток, протекающий через образец, определяется по формуле:

$$I = \alpha \frac{C}{n}, \quad (1.9)$$

где α – число делений шкалы гальванометра, на которое отклонился «зайчик» на шкале гальванометра спустя 1 минуту после подачи на образец напряжения; C – динамическая постоянная гальванометра ($7,2 \cdot 10^{-9}$ А / дел.); n – дробное шунтовое число, указывающее, какая часть от полного тока прошла через гальванометр, $n = \frac{I_e}{I_u}$, где I_e – ток, прошедший через гальванометр, I_u – ток, прошедший через шунт, А.

Тогда искомая величина сопротивления образца равна:

$$R_x = \frac{U}{I} = \frac{U \cdot n}{\alpha \cdot C}. \quad (1.10)$$

Описание лабораторной установки

Установка (рисунок 1.3) состоит из источника питания ВС-23, баллистического со световым указателем гальванометра М 197, шунта к гальванометру (Ш).

Для ограничения тока в цепи гальванометра в случае пробоя испытуемого образца или случайного замыкания электродов применено водяное сопротивление.

С целью охраны работающего от воздействия высокого напряжения применено блокировочное устройство.

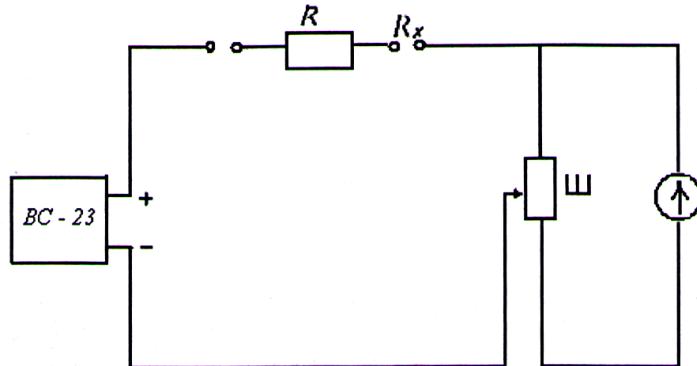


Рисунок 1.3 - Схема лабораторной установки для определения сопротивления диэлектриков

Проведение эксперимента

1.1. Измерение объемного и поверхностного сопротивлений.

Измерение объемного R_v и поверхностного R_s сопротивлений образцов диэлектриков производится в следующем порядке:

1) При определении R_v установить образец диэлектрика между электродами А, Б и В согласно схеме, представленной на рисунке 1.1. При определении R_s использовать схему, представленную на рисунке 1.2.

2) Включить сеть 220 В, при этом должна загореться зеленая сигнальная лампочка. Через 2-3 минуты включить тумблер «Высокое напряжение», при этом загорается красная сигнальная лампочка, а

вольтметры показывают напряжение. Соответствующей ручкой регулировки выходных напряжений установить необходимое напряжение;

3) записать установившееся отклонение светового пятна гальванометра α (число делений), напряжение U и значение силы тока, прошедшего через шунт I_{sh} . Замер тока производить через одну минуту после включения образца под напряжение;

4) замерить геометрические размеры образца: толщину d (м), диаметр меньшего электрода D (м), внутренний диаметр кольцевого электрода D_1 (м).

5) рассчитать R_x , ρ_v , ρ_s , а так же значение удельной потери

мощности при постоянном напряжении $\rho = \frac{E^2}{\rho_v}$, Вт/м³.

1. 2. Исследование зависимости объемного сопротивления R_v образцов диэлектриков от величины приложенного напряжения.

Измерения производить через каждые 1 кВ. Для каждого материала сделать пять замеров в интервале значений напряжения 1 – 5 кВ. Результаты измерений и расчетов записать в таблицу.

1. 3. Исследование зависимости R_v образцов диэлектриков от времени приложения напряжения. Замеры производить в течение 10-15 мин. с интервалом 1 мин.

Полученные результаты проведенных экспериментов записать в таблицы 1.1, 1.2, 1.3.

Таблица 1. 1

Таблица 1. 2

Таблица 1. 3

Содержание отчета по работе

Отчет по работе должен содержать следующие разделы:

Цель работы.

1. Теоретические положения.

Раздел должен содержать описание основных процессов, происходящих в диэлектрике, находящемся в постоянном электрическом поле, схемы для определения сопротивления диэлектриков постоянному напряжению и формулы для расчета удельного объемного и удельного поверхностного сопротивлений.

2. Практическая часть.

Раздел должен содержать результаты проведенных экспериментов в виде таблиц, выводы.

Контрольные вопросы к работе №1

1. Что происходит с диэлектриком в постоянном электрическом поле?
2. Из каких составляющих складывается суммарный ток, проходящий через диэлектрик, находящийся в постоянном электрическом поле?
3. Чем обусловлен ток утечки?
4. Чем обусловлены токи поляризации?
5. Через какой промежуток времени после включения образца под напряжение принято производить измерения на гальванометре и почему?
6. Как скажется на результатах вычисления ρ_v и ρ_s отсутствие охранного кольца на исследуемом образце?
7. Как и почему измеряется сопротивление диэлектрика при повышении приложенного к нему напряжения $\rho_v = f(U)$ и $\rho_s = f(U)$?
8. Как определить удельные потери мощности при постоянном напряжении $\rho_v = f(U)$?

Лабораторная работа №2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ, ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПРИ НИЗКИХ ЧАСТОТАХ

Цель работы:

1. Изучение явления диэлектрических потерь в диэлектриках и их зависимость от температуры и напряжения.
2. Экспериментальное определение емкости, относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь образцов диэлектриков при низких частотах.

Основные теоретические положения

2. 1. Диэлектрические потери в диэлектрике

В идеальной среде электрического поля, с электрической проводимостью равной нулю, при приложении переменной разности потенциалов к электродам при возникновении электрического поля через диэлектрик будет проходить только реактивный емкостной ток I_c , не вызывающий выделения тепла. Как известно, величина емкостного тока определяется формулой

$$I_c = \omega C U, \text{ А}, \quad (2.1)$$

где $\omega = 2\pi f$ - угловая частота, с^{-1} ; C - емкость конденсатора, Φ ; U - приложенное напряжение, В.

Энергия электрического поля, т.е. энергия заряженного конденсатора равна $C U^2 / 2$, Вт/с. Эта энергия обратима – она полностью выделяется при разрядке конденсатора. Это соответствует тому, что емкостной ток является реактивным, на 90° опережающим напряжение.

Через реальный диэлектрик, проводимость которого не равна нулю, помимо емкостного тока I_c , будет проходить и активный ток I_a , величина которого будет определяться по закону Ома

$$I_a = \frac{U}{R}, \text{ А}. \quad (2.2)$$

Когда диэлектрик находится в рабочем режиме под напряжением, кроме обратимого поглощения энергии электрическим полем, будет происходить и необратимое поглощение энергии, определяющееся переходом части электрической энергии в тепловую. Потери энергии в диэлектрике называются **диэлектрическими потерями**. **Мощность диэлектрических потерь** P в диэлектрике обусловливаются токами утечки (сквозными токами)

$$P = U I_a. \quad (2.3)$$

На рисунке 2.1 дана векторная диаграмма токов в диэлектрике при переменном напряжении. В большинстве диэлектриков, кроме емкостного

тока, опережающего напряжение на 90° , и тока утечки $I_{cкв.}$, совпадающего по фазе с напряжением, наблюдается абсорбционный ток $I_{абс.}$, связанный с замедленными видами поляризации.

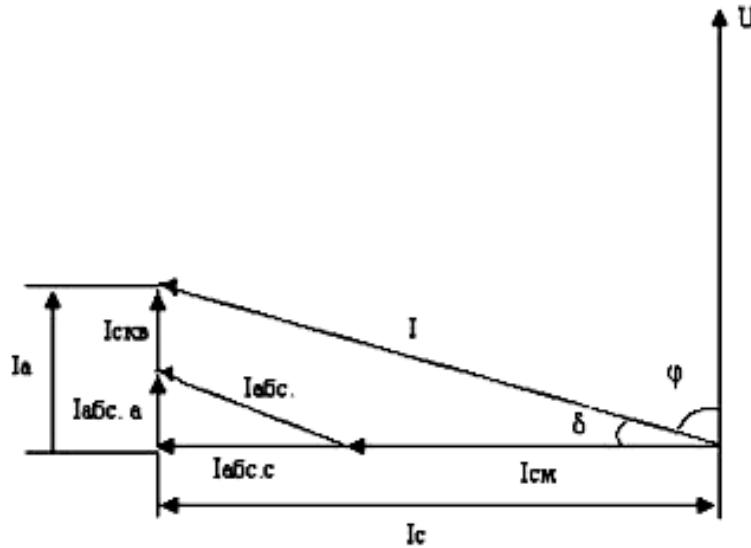


Рисунок 2.1 - Векторная диаграмма тока при переменном напряжении
Абсорбционный ток имеет емкостную реактивную составляющую $I_{абс.с}$

и активную составляющую $I_{абс.а}$. В результате через диэлектрик будет проходить суммарный ток I , имеющий емкостную составляющую $I_c = I_{cm} + I_{absc.c}$, где I_{cm} - ток смещения, обусловленный электронной поляризацией, и активную составляющую $I_a = I_{cкв.} + I_{absc.a}$.

Углом диэлектрических потерь называется угол δ , дополняющий до 90° угол сдвига фаз φ между векторами тока и напряжения в емкостной цепи. Угол диэлектрических потерь увеличивается с ростом потерь энергии в диэлектрике.

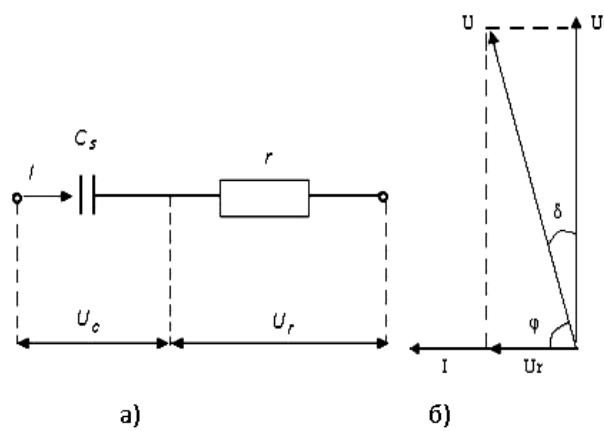


Рисунок 2.2 - Последовательная эквивалентная схема замещения диэлектрика с потерями а) и векторная диаграмма напряжений б)

Таким образом, природа диэлектрических потерь обуславливается токами абсорбции, являющимися следствием поляризационных процессов и током сквозной проводимости. Так как ток сквозной проводимости в

диэлектриках весьма незначителен, основное влияние на величину диэлектрических потерь оказывает активная составляющая тока абсорбции.

В общем случае мощность диэлектрических потерь определяется следующим образом:

$$P = \operatorname{tg}\delta \cdot \omega \cdot C \cdot U^2, \text{ Вт}, \quad (2.4)$$

где $\operatorname{tg}\delta$ - тангенс угла диэлектрических потерь, C - фактическая емкость диэлектрика, через который проходят токи I_{cm} и $I_{abs.c}$.

Так как напряжение, угловая частота, емкость практически являются неизменными, то о потерях энергии в изоляции судят по величине $\operatorname{tg}\delta$.

Диэлектрик с потерями можно представить в виде эквивалентных схем: последовательной (рисунок 2.2) или параллельной (рисунок 2.3).

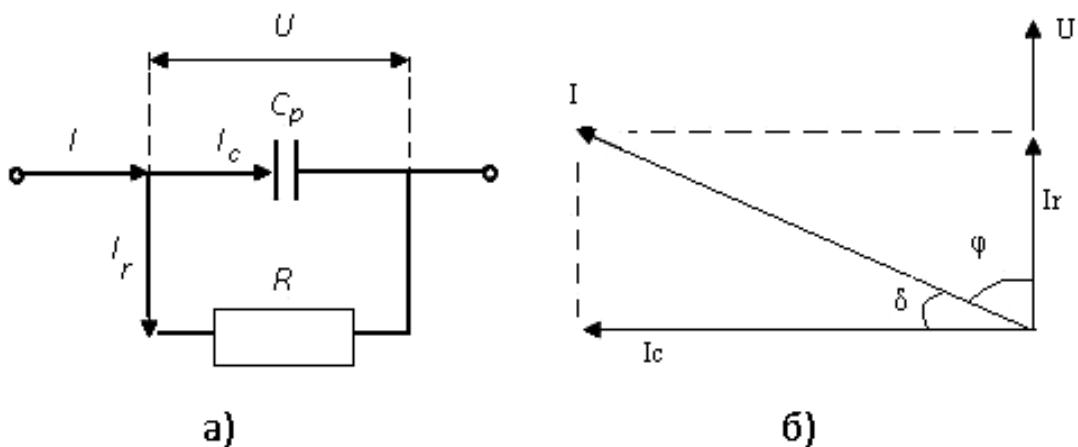


Рисунок 2.3 - Параллельная эквивалентная схема замещения диэлектрика с потерями а) и векторная диаграмма токов б)

2. 2. Зависимость ε и $\operatorname{tg}\delta$ от температуры

У материалов с неполярными молекулами зависимость диэлектрической проницаемости ε от температуры определяется, главным образом, изменением числа поляризуемых молекул в единице объема вещества вследствие его температурного расширения.

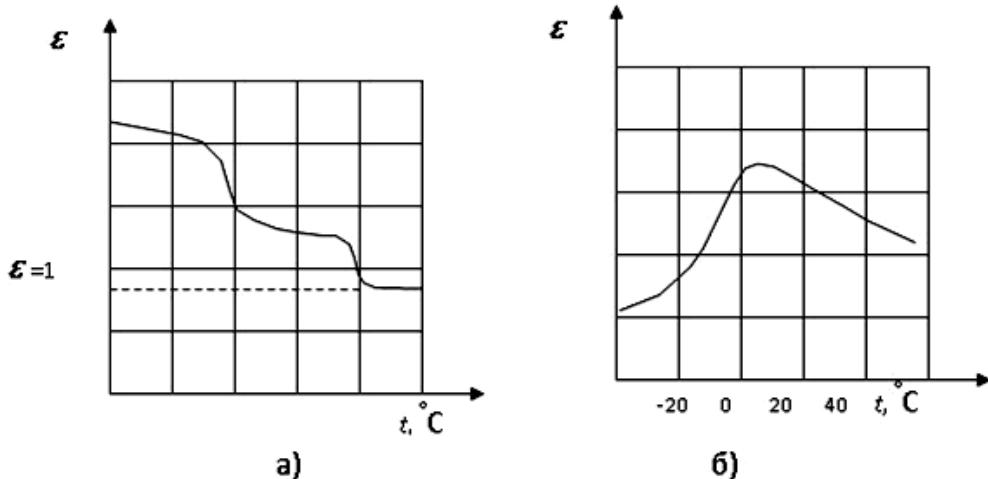
В случае перехода вещества под влиянием температуры в жидкое или газообразное состояние его диэлектрическая проницаемость уменьшается скачкообразно, что схематически показано на рисунок 2.4 (а).

У диэлектриков с дипольными молекулами зависимость от температуры проявляется значительно резче и характеризуется наличием максимума (рисунок 2.4 б).

Зависимость изменения $\operatorname{tg}\delta$ от температуры для дипольной жидкости приведена на рисунке 2.5.

Максимум объясняется таким состоянием вязкости вещества, при котором полярные молекулы приобретают возможность совершать поворот на 180° под действием приложенного переменного напряжения, и, следовательно, производить максимальную работу, преобразуя

затрачиваемую при этом мощность в тепло. Уменьшение $\operatorname{tg}\delta$ после перехода через максимум объясняется дальнейшим снижением вязкости жидкости, а следовательно, и уменьшением количества энергии, затрачиваемой на ориентацию диполей.



а) для неполярного диэлектрика б) для полярного диэлектрика
Рисунок 2.4 - Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры

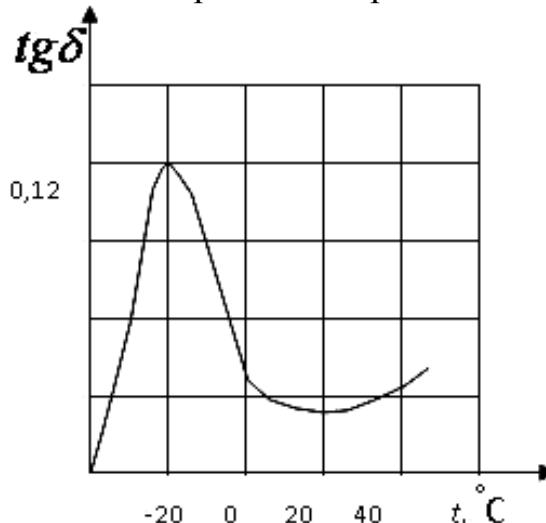


Рисунок 2.5 - Зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от температуры для полярной жидкости

Затем вновь наблюдается возрастание значения $\operatorname{tg}\delta$. Это можно объяснить возрастанием электропроводности жидкости вследствие повышения температуры.

2. 3. Зависимость ϵ и $\operatorname{tg}\delta$ от напряжения

Диэлектрическая проницаемость большинства диэлектриков слабо зависит от величины приложенного напряжения.

Зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от величины приложенного напряжения представляет весьма большой интерес, так как дает возможность контроля качества изоляционных материалов и конструкций.

В диэлектриках однородного строения в области напряжений, при которых $\operatorname{tg}\delta$ остается неизменным, потери пропорциональны квадрату приложенного напряжения. В тех же случаях, когда с изменением

напряжения значение $\operatorname{tg}\delta$ увеличиваться, потери будут пропорциональны произведению $U^2 \operatorname{tg}\delta$, т.е. могут определяться значительно большим числом.

Порядок и методика выполнения работы

Определение $\operatorname{tg}\delta$ и диэлектрической проницаемости при частоте 50 Гц производят обычно по стандартной методике на мосте высокого напряжения. В плечи моста включают: 1) испытываемый образец с электродами; 2) постоянный конденсатор высокого напряжения без диэлектрических потерь; 3) безиндуктивный магазин сопротивлений; 4) конденсатор переменной емкости, шунтированный постоянным сопротивлением. В диагональ моста включают индикатор равновесия – отсутствие разности потенциалов между соответствующими точками. Схема моста переменного тока представлена на рисунке 2.6. Мост уравновешивается подбором параметров плеч γ_3 и γ_4 , при этом в первое плечо включен исследуемый образец диэлектрика, а во второе плечо – образцовый конденсатор без потерь.

Плечи имеют следующие параметры:

$\gamma_1 = \omega \cdot C_x \operatorname{tg}\delta_x + j\omega \cdot C_x$ - полная проводимость исследуемого образца;

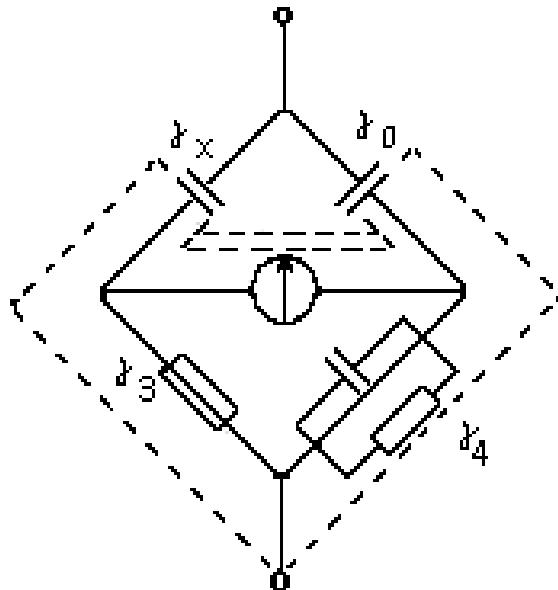


Рисунок 2. 6 - Схема моста переменного тока.

$\gamma_2 = j\omega \cdot C_0$ - емкостная проводимость постоянного образцового конденсатора; $C_0 = 95,6 \text{ пФ}$;

$\gamma_3 = \frac{1}{R_3}$ - активная проводимость декадного магазина сопротивления;

$\gamma_4 = \frac{1}{R_4} + j\omega \cdot C_4$ - полная проводимость параллельно соединенных постоянного сопротивления и регулируемой емкости; $R_4 = 3183 \text{ Ом}$.

Уравнения равновесия моста

$$\frac{\gamma_1}{\gamma_2} = \frac{\gamma_3}{\gamma_4} \quad (2.5)$$

$$\text{или} \quad \frac{\omega \cdot C_x \operatorname{tg} \delta_x + j\omega \cdot C_x}{j\omega \cdot C_x} = \frac{1}{R_3} \cdot \frac{R_4}{1 + j\omega R_4 C_4} \quad (2.6)$$

позволяют получить комплексную проводимость:

$$\gamma_1 = \gamma_x = \omega \cdot C_x \operatorname{tg} \delta_x + j\omega \cdot C_x = \omega \cdot C_0 \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{1}{\omega^2 R_4^2 C_4^2} \cdot \omega R_4 C_4 + \\ + j\omega \cdot C_0 \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{1}{1 + \omega^2 R_4^2 C_4^2}.$$

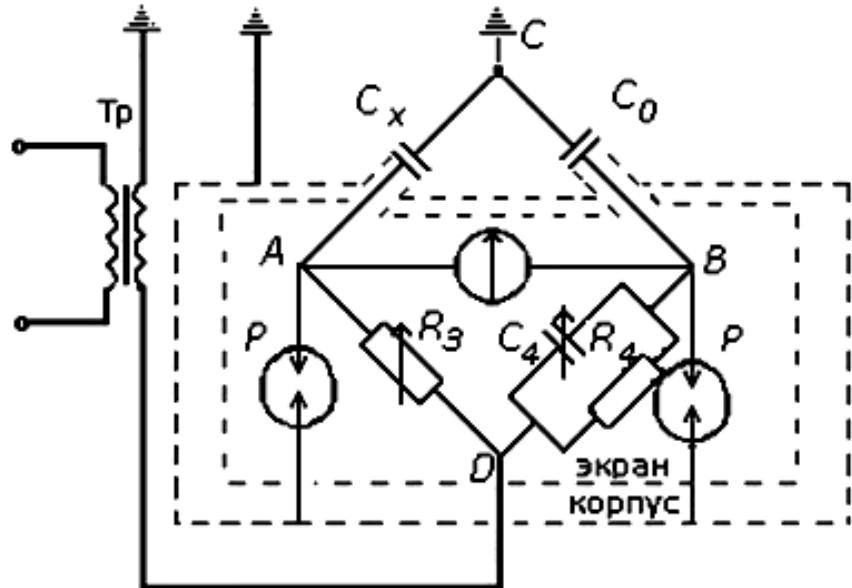
Из сравнения вещественной и мнимой частей уравнения можно определить численное значение емкости C и $\operatorname{tg} \delta$ испытуемого образца, выразив их через показания моста при его равновесии:

$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega R_4 C_4 = 314 \cdot 3183 \cdot C_4 = 10^6 \cdot C_4, \quad (2.7)$$

$$C_x = C_0 \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{1}{1 + \omega^2 R_4^2 C_4^2} = C_0 \cdot \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} = C_0 \frac{R_4}{R_3}. \quad (2.8)$$

Описание лабораторной установки

В настоящей работе рассматривается метод измерения $\operatorname{tg} \delta$ и емкости C_x на высоковольтном мосте переменного тока марки Р-595, предназначенного для работы на частоте 50 Гц. Мост включен по перевернутой схеме, т.е. один из электродов образца заземлен. Принципиальная схема моста приведена на рисунке 2.7.



Tr – трансформатор; C_0 – образцовий конденсатор без потерь; C_4 – магазин емкостей; R_3 – переменное сопротивление; R_4 – постоянное сопротивление; Р – разрядники.

Рисунок 2.7 - Принципиальная схема моста для определения $\operatorname{tg} \delta$ и диэлектрической проницаемости $\operatorname{tg} \delta$.

При равновесии выполняются равенства (2.5) и (2.6). Значения тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg}\delta$ снимаются непосредственно с лицевой панели моста. Емкость вычисляют по приведенным выше формулам.

Относительная диэлектрическая проницаемость рассчитывают по формуле:

$$\varepsilon = \frac{C_x \cdot d}{S} \cdot \frac{1}{\varepsilon_0} = 11,3 \frac{C_x \cdot d}{S}, \quad (2.9)$$

где S – площадь электрода, см^2 ; d – толщина диэлектрика между электродами, см; C_x – емкость конденсатора, пФ; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, $\Phi/\text{м}$.

Удельные потери мощности рассчитывают по формуле:

$$\rho \approx \frac{E^2 \cdot \operatorname{tg}\delta \cdot \varepsilon \cdot f}{1,8 \cdot 10^{10}} \text{ Вт/м}^3. \quad (2.10)$$

Проведение эксперимента

2.1 Определение $\operatorname{tg}\delta$, емкости C_x и ε твердого диэлектрика.

Эксперимент производится в следующей последовательности.

В начале необходимо измерить толщину испытуемого материала и диаметр меньшего электрода. Затем испытуемый образец поместить в высоковольтную камеру, которая снабжена блокировкой, исключающей подачу высокого напряжения при открытой дверце. Дальнейшие действия выполнять в следующей последовательности:

1. Подключить входные зажимы моста к испытуемому образцу.
2. Привести все переключатели и регуляторы в исходное положение:
 - 1) ручку «Чувствительность» - в положении «Выкл.»;
 - 2) сопротивление R_3 – в положении 50 Ом;
 - 3) ручки $\operatorname{tg}\delta$ – в положение 5 %;
 - 4) ручку A – в положение – «+ $\operatorname{tg}\delta$ »;
 - 5) переключатель B – в положение, соответствующее предполагаемому значению емкости. Если порядок величины емкости неизвестен, то переключатель B поставить в положение измерения наибольших значений емкости и при уравновешивании установить напряжение 3 кВ, сопротивление – не менее 15 Ом.
3. Включить питание моста.
4. Плавно поднять напряжение до требуемого значения, при этом в элементах схемы не должно наблюдаться появление разрядов.
5. Включить тумблер «сеть». При этом должна загореться лампочка освещения шкалы микроамперметра.
6. Установить ручку «Чувствительность» в такое положение, при котором стрелка микроамперметра отклонится на 30-35 делений.

7. Вращением ручек R_3 и $\operatorname{tg}\delta$ добиться положения, при котором отклонение стрелки микроамперметра будет минимальным (при максимальной чувствительности указателя равновесия).

8. Записать величины R_3 и $\operatorname{tg}\delta$, а также формулу, указанную у ручки переключателя B .

9. Переключатель «Чувствительность» установить в положение «выкл.», уменьшить испытательное напряжение до нуля, выключить питание моста.

2.2 Определение зависимостей $\operatorname{tg}\delta$ и ε от температуры.

Образец поместить в вакуумный сушильный шкаф и подключить к нему зажимы моста. Произвести определение $\operatorname{tg}\delta$ и C_x при различных температурах, начиная с комнатной. Результаты эксперимента представить в виде графиков зависимостей $C_x = f(t)$ и $\operatorname{tg}\delta = f(t)$.

2.3 Определение зависимостей $\operatorname{tg}\delta$ и от напряжения.

Подключить зажимы моста к исследуемому образцу диэлектрического материала. Произвести определение емкости C_x и $\operatorname{tg}\delta$, постепенно увеличивая напряжение с интервалом 500 В.

Таблица № 2.1

Наименование материала	U , В	R_3 , Ом	C_x	$\operatorname{tg}\delta$	Толщина образца, см	Диаметр электрода, см	ε	$\rho \sim$ Вт/м ³

Содержание отчета по работе

Отчет по работе должен содержать следующие разделы:

1. Цель работы.
2. Теоретические положения.

В разделе должна быть отражена сущность явлений поляризации диэлектриков, диэлектрических потерь, векторная диаграмма токов в диэлектрике, эквивалентные схемы замещения диэлектрика с потерями.

3. Практическая часть.

Раздел должен содержать схему установки для определения емкости и $\operatorname{tg}\delta$, результаты расчетов в виде таблиц и графиков, выводы.

Контрольные вопросы к работе №2

1. Что такое диэлектрические потери?
2. Какой величиной характеризуют диэлектрические потери?
3. Какие эквивалентные схемы используются для изоляции с потерями электрической энергии и чему равен $\operatorname{tg}\delta$?

4. Как зависят диэлектрическая проницаемость и $tg\delta$ диэлектриков от температуры ?
3. Каково назначение разрядников, включенных в диагональ высоковольтного моста?
4. Чем обусловлена мощность диэлектрических потерь в диэлектрике?

Библиографический список

Основная литература

1. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учеб. для вузов – М.: Высш. Шк., 2004.519 с.
2. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. – 3-е изд., испр. и доп. - М.: Энергоиздат, 2012.
3. Ушаков В.Я. Изоляция установок высокого напряжения.- М.: Энергоатомиздат, 1994.-496 с.: ил.
4. Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М., Электротехнические материалы. М.: Энергия, 2007.

Дополнительная литература

5. Справочник по электротехническим материалам. 3-е изд., испр. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1987. Т.2, стр. 355-367.
6. Мороз Н.К. Электротехническое материаловедение. Изд. Инфо-инженерия. 2020. -148с. ISBN 978-5-9729-0390-0.
7. Черепахин А.А., Бальнова Т.И., Смолькин А.А. Электротехническое и конструкционное материаловедение. Изд.Феникс. 2017- 350с. ISBN 978-S-222-27669-3.