МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ - ФИЛИАЛ
ФГБОУ ВО «ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
В Г. ЗЕРНОГРАДЕ

Энергетический факультет
Кафедра эксплуатации энергетического
оборудования и электрических машин

П.В. Гуляев,
Г.В. Степанчук,
М.М. Украинцев,
П.Т. Корчагин

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие для студентов, обучающихся по направлениям подготовки:
35.03.06 Агроинженерия
профиль подготовки «Электрооборудование и электротехнологии»,
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
профиль подготовки «Электроснабжение»
13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»
профиль подготовки «Энергообеспечение предприятий»
(очная и заочная формы обучения)

г. Зерноград - 2023

Об издании – 1 , 2
Содержание

УДК 621.315.61

Издается по решению методической комиссии по направлению подготовки 35.03.06 и 35.04.06 Агроинженерия энергетического факультета Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО «Донской ГАУ» в г. Зернограде

Рецензент:
канд. техн. наук., доцент каф ЭЭ и ТЭ Исупова А.М.

Гуляев П.В. Электротехнические материалы. Лабораторный практикум [Электронный ресурс]: учебное пособие для студентов по направлениям подготовки: 35.03.06 Агроинженерия; 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»;13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»/ П.В. Гуляев, Г.В. Степанчук, М.М. Украинцев, П.Т. Корчагин. – Электрон. дан. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО «Донской ГАУ» в г. Зернограде, 2023. – 183 с. – Режим доступа: Локальная сеть Библиотеки Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов обучающихся по направлениям подготовки: 35.03.06 Агроинженерия; 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»;13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

В учебном пособии представлены методические указания для выполнения лабораторных работ и программа практических занятий, в которых приведены теоретические сведения по изучаемым материалам, методики их испытания и определения характеристик, дано описание приборов, используемых при испытаниях, рассмотрены примеры решения задач и предложены варианты для самостоятельного решения.

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры эксплуатации энергетического оборудования и электрических машин Протокол № 2 от 21.09.2023г.

Рассмотрено и одобрено методической комиссией по направлению подготовки 35.03.06 и 35.04.06 «Агроинженерия» энергетического факультета Протокол №1 от 22.09.2023 г.

© Гуляев П.В., Степанчук Г.В.,
Украинцев М.М, Корчагин П.Т.
© АЧИИ ФБОУ ВО «Донской ГАУ»
в г. Зернограде, 2023.

СОДЕРЖАНИЕ

1	Введение	4
1	Лабораторная работа №1. Исследование диэлектрических характеристик твёрдых изоляционных материалов	5
2	Лабораторная работа №2. Изучение магнитных материалов	21
3	Лабораторная работа №3. Изучение механических характеристик электротехнических материалов и изделий	35
4	Лабораторная работа №4. Изучение проводниковых материалов и изделий	45
5	Лабораторная работа №5. Изучение электроизоляционных материалов	58
6	Лабораторная работа №6. Изучение вязкости жидких диэлектриков	80
7	Лабораторная работа №7. Изучение электрической прочности газообразных диэлектриков	89
8	Лабораторная работа №8. Исследование характеристик фотоэлектрических преобразователей	99
9	Лабораторная работа №9. Исследование диэлектрических характеристик жидких изоляционных материалов	110
10	Лабораторная работа №10. Определение основных характеристик ферромагнитных материалов	121
11	Лабораторная работа №11. Изучение полупроводниковых материалов и изделий	131
12	Лабораторная работа №12. Исследование влияния температуры на магнитные свойства ферромагнетиков	144
13	Примеры решения задач по дисциплине «Электротехническое материаловедение»	155
14	Задания для контрольной работы по дисциплине «Электротехническое материаловедение»	168

ВВЕДЕНИЕ

Электротехнические материалы представляют собой совокупность электроизоляционных, проводниковых, полупроводниковых и магнитных материалов, предназначенных для работы в электрических и магнитных полях.

Для создания надежного в эксплуатации электрооборудования, улучшения его энергетических и стоимостных показателей при оптимальных габаритах и массе необходим рациональный выбор электроизоляционных, магнитных, проводниковых и полупроводниковых материалов. Для реализации необходимы знания свойств весьма разнообразных современных электротехнических материалов.

В учебном пособии «Электротехнические материалы. Лабораторный практикум» изучаются основные физические явления, происходящие в материалах под действием электромагнитных полей, взаимосвязь между структурой, составом материала и физико-химическими свойствами, способ получения и условия эксплуатации.

В процессе выполнения лабораторных работ студенты должны изучить природу и особенности основных групп электротехнических материалов, узнать физический смысл параметров материалов, их зависимость от методов получения, свободно ориентироваться в материалах справочников и государственных стандартов, уметь сделать выбор наиболее рационального материала при создании или проектировании различных электротехнических устройств и изделий.

Лабораторная работа №1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЁРДЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы Изучение диэлектрических характеристик твёрдых электроизоляционных материалов и методов их измерения, а также приобретение навыков использования современного лабораторного оборудования.

1.1 Теоретические сведения

Термины "Диэлектрический материал" и "Электроизоляционный материал" и в инженерной практике часто применяются как равнозначные. Однако эти два понятия не могут быть полностью равнозначными. ГОСТ 21515-76 определяет диэлектрический материал как "материал, предназначенный для использования его диэлектрических свойств", а электроизоляционный материал – как "диэлектрический материал, предназначенный для электрической изоляции каких-либо токоведущих частей, находящихся под различными электрическими потенциалами".

Таким образом, объем понятия "диэлектрический материал" шире, чем объем понятия "электроизоляционный материал". При использовании диэлектрика в конденсаторах, когда необходимо иметь определенную электрическую емкость устройства, применять термин "электроизоляционный материал" нельзя. Частично или полностью не подходит этот термин для активных (управляемых) диэлектриков.

Основным свойством (отличительным признаком) диэлектриков является способность поляризоваться при помещении их в электрическое поле. Процесс поляризации количественно характеризует параметр «относительная диэлектрическая проницаемость» (ε_r), в инженерной практике часто слово "относительная" опускается. Диэлектрическая проницаемость ε_r также является параметром, характеризующим способность материала образовы-

вать емкость, т.е. емкость конденсатора любых размеров и формы пропорциональна диэлектрической проницаемости диэлектрика.

$$C = C_0 \cdot \varepsilon_r$$

где C_0 – емкость вакуумного конденсатора имеющего те же формы и размеры, что у конденсатора заполненного диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε_r.

Для вакуума $\varepsilon_r = 1$, а для всякого диэлектрического материала $\varepsilon_r > 1$.

Относительная диэлектрическая проницаемость ε_r входит в величину абсолютной диэлектрической проницаемости.

$$\varepsilon_a = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \text{, Ф/м}$$

где ε_0 – электрическая постоянная, которая равна $8{,}854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Электрическая емкость конденсатора (любого участка изоляции с электродами) зависит от его геометрических размеров и конфигурации, а также от вида материала Так для плоского участка изоляции (пазовая изоляция статора электродвигателя) емкость определится из выражения:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{h}$$

где S – площадь плоского конденсатора, м^2;

h – толщина диэлектрика или расстояние между электродами, м.

Емкость цилиндрического конденсатора (изоляция кабеля) может быть найдена по формуле

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \frac{2\pi l}{\ln \frac{d_2}{d_1}} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{2\pi l}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

где l – длина осевого цилиндрического конденсатора, м;

r_1 – радиус внутреннего электрода;

r_2 – радиус внешнего электрода.

Относительная диэлектрическая проницаемость не только характеризует процессы поляризации и способность материала образовывать емкость; она также входит в ряд уравнений, характеризующих физические процессы, протекающие в диэлектрике. Согласно закону Кулона сила взаимодействия F, двух точечных зарядов q_1 и q_2 расположенных в неорганической среде с диэлектрической проницаемостью ε_r на расстоянии друг от друга h, равна.

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 4\pi h^2}$$

Напряженность электрического поля, создаваемая точечным зарядом q на расстоянии h определится из выражения

$$E = \frac{q}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r 4\pi h^2}$$

Фазовая скорость распространения электромагнитной волны в веществе, согласно теории Максвелла, равна

$$\vartheta = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r} \cdot \mu_r},$$

где c – скорость света в вакууме;

μ_r – магнитная проницаемость.

Относительная диэлектрическая проницаемость любого вещества может быть определена также из следующего выражения

$$\varepsilon_r = 1 + K_r$$

где K_r – диэлектрическая восприимчивость диэлектрика.

Таблица 1.1 – Диэлектрическая проницаемость некоторых диэлектриков

Наименование	Агрегатное состояние	$\varepsilon_г$
	НЕПОЛЯРНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ	
Стеклотекстолит	Твёрдый	5…7
Гетинакс	Твердый	5…6
Текстолит	Твердый	6…7
Асботекстолит	Твердый	7…8
Полистирол	Твердый	2,60
Алмаз	Твердый	5,70
	ПОЛЯРНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ	
Хлористый натрий *NCl*	Твердый	6
Рутил TiO_2	Твердый	110

Диэлектрические потери

Диэлектрические потери - электрическая мощность, поглощаемая диэлектриком (участком изоляции) превращается в тепло под действием приложенного напряжения.

Если участок изоляции с сопротивлением $R_{из}$, Ом находится под постоянным напряжением U, В значение диэлектрических потерь P, Вт определяется как

$$P = I_y^2 \cdot R_{из} = \frac{U^2}{R_{из}} = I_y \cdot U \qquad (1.1)$$

где I_y - сквозной ток утечки через изоляцию, А.

Удельные электрические потери, т.е. отношение потерь к объему изоляции равны

$$P_{уд} = \frac{E^2}{\rho_V} = E^2 \cdot \gamma_V \qquad (1.2)$$

где E - напряженность поля, А/м;

ρ_V - удельное объемное сопротивление диэлектрика, Ом/м;

γ_V - удельное объемная проводимость, Ом/мм^2.

Если участок изоляции включен под переменное значение напряжение, мощности потерь P, Вт на участке изоляции емкостью C, Ф, при действующем значении приложенного напряжения U, В и частоте f = 50 Гц равно

$$P = U \cdot I_a \tag{1.3}$$

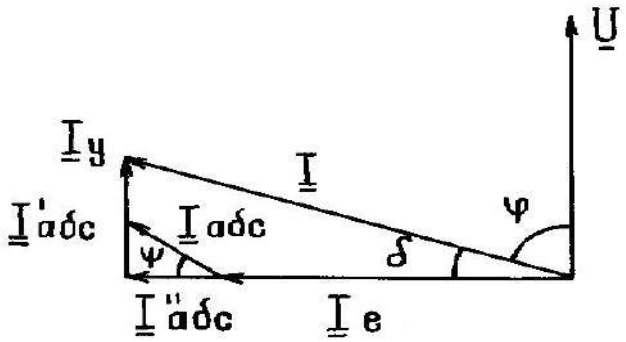
где I_a - активная составляющая тока, А.

Как видно из диаграммы (рисунок 1.1) через диэлектрики идут три синусоидальных тока:

I_e - емкостной ток

$I_{абс}$ - ток абсорбции (поляризации с активной и реактивной составляющими)

I_y - сквозной ток утечки, А .



$\underline{I}_e$ - емкостный ток электронной поляризации А;

$\underline{I}_y$ - сквозной ток утечки через изоляцию, А;

$\underline{I}''_{абс}$ - емкостной ток, вызванный процессами поляризации диэлектриков: дипольной, миграционной, ионно-релаксационной и других видов, А;

$\underline{I}'_{абс}$ - активный ток, вызванный процессами поляризации в диэлектрике, А;

$\underline{I}$ - суммарный ток диэлектрика.

Рисунок 1.1 – Векторная диаграмма токов диэлектрика с потерями.

$$I_y = \frac{U}{R_{из}}$$

Активная составляющая тока, протекающего через диэлектрик определяемая из диаграммы равна

$$I_a = I'_{абс} + I_y = I_c \cdot tg\delta,$$
$$I_c = I_e + I''_{абс} = U\,\omega C$$

Подставляя полученные значения I_a в формулу (1.2) получаем следующее выражение мощности потерь.

$$P = U \cdot I_c \cdot tg\delta \qquad P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot tg\delta$$

Тангенс угла диэлектрических потерь

$$tg\delta = \frac{I_a}{I_e}$$

Угол диэлектрических потерь важнейшая характеристика изоляционных материалов и чем он меньше, тем качественнее материал.

При изучении диэлектрика с потерями работающего на переменном напряжении часто оказывается целесообразным заменить рассматриваемый диэлектрик емкостью без потерь и активным сопротивлением, соединенными между собой параллельно "а" или последовательно "б" рисунок 1.2.

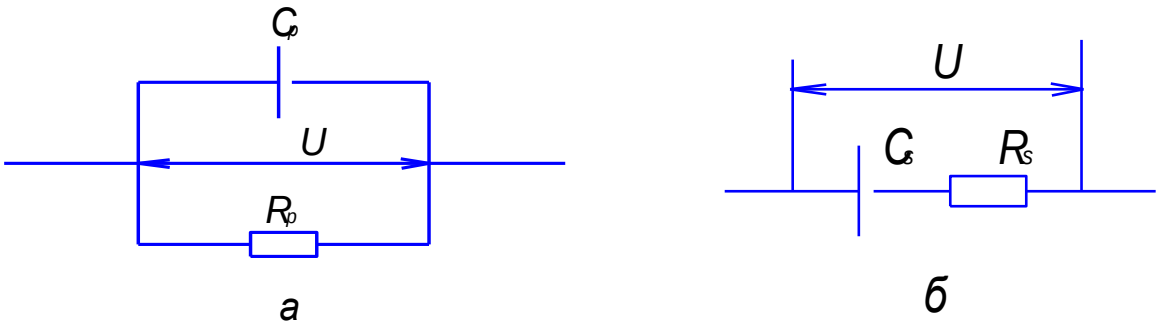


Рисунок 1.2 – Простейшая схема замещения диэлектрика с потерями: а – параллельная схема (композиционный диэлектрик); б – последовательная схема.

В первом случае

$$tg\delta = \frac{1}{\omega \cdot C_p \cdot R_p}; \qquad P = U^2 \cdot \omega \cdot C_p \cdot tg\delta .$$

Во втором случае

$$tg\delta = \omega \cdot C_S \cdot R_S ; \qquad P = U^2 \cdot \omega \cdot C_S \cdot \frac{tg\delta}{1 + tg\delta} .$$

Величина, обратная tgδ называется добротностью материала.

$$Q = \frac{1}{tg\delta}$$

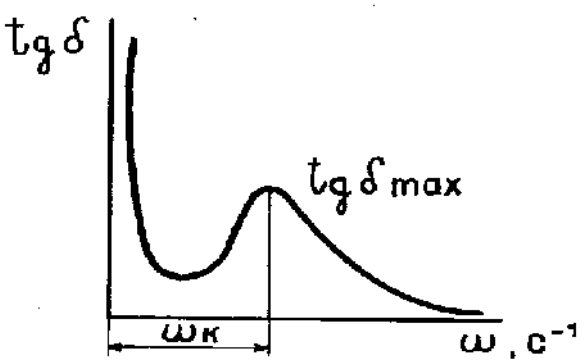


Рисунок 1.3 – Теоретическая зависимость $tg\delta$ от частоты приложенного напряжения

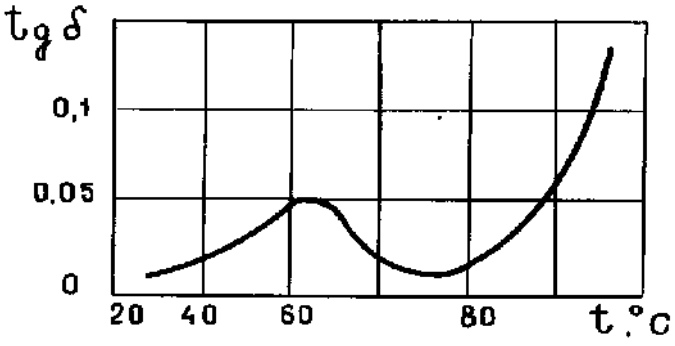


Рисунок 1.4 – Зависимость $tg\delta$ канифоли от температуры.

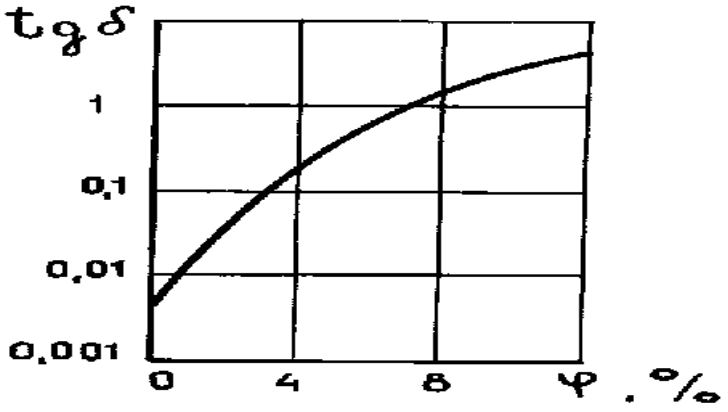


Рисунок 1.5 – Зависимость $tg\delta$ от влажности для бумаги

Угол диэлектрических потерь зависит не только от величины приложенного напряжения, но и от его частоты ω, температуры t, влажности φ. На рис 1.3, 1.4, 1.5 приводятся зависимости $tg\delta$ от температуры, влажности и частоты.,

1.2 Программа работы

1.2.1 Ознакомиться с инструкцией приборов Е7 – 15 и измерителя ЛСМ 1

1.2.2 Измерить «tgδ» и ёмкость «C» образцов твердых диэлектриков.

1.2.3 Расчётным путём определить диэлектрическую проницаемость исследуемых образцов изоляционных материалов.

1.2.4 Сравнить полученные значения параметров с каталожными данными.

1.2.5 Определить зависимость изменения «tgδ» и диэлектрической проницаемости «ε» исследуемых образцов изоляционных материалов при изменении температуры.

1.2.6 Сделать краткие выводы.

1.3 Техника безопасности при выполнении лабораторной работы

1.3.1 Не включать электрические установки без разрешения преподавателя.

1.3.2. После подачи напряжения не касаться проводов, даже если они изолированы.

1.3.3. Измерение параметров изоляционных материалов проводить звеном не менее 2х человек.

1.3.4. При замене образцов следует следить за правильностью подключения приборов.

1.3.5. По окончании испытания все установки должны быть обесточены.

1.4 Приборы и оборудование

Для измерения относительной диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь используется универсальный прибор "Измеритель имитанса" Е 7-15 и плоские (пластинчатые) образцы площадью S, см^2, позволяющих за одно измерение вычислить относительную диэлектрическую проницаемость образца изоляционного материала.

Для определения зависимости изменения диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь при изменении температуры используется универсальный измеритель ЛСМ1

1.5 Выполнение работы

1.5.1 Инструкция работы с прибором Е7 - 15.

Передняя панель прибора показана на рисунке 1.7

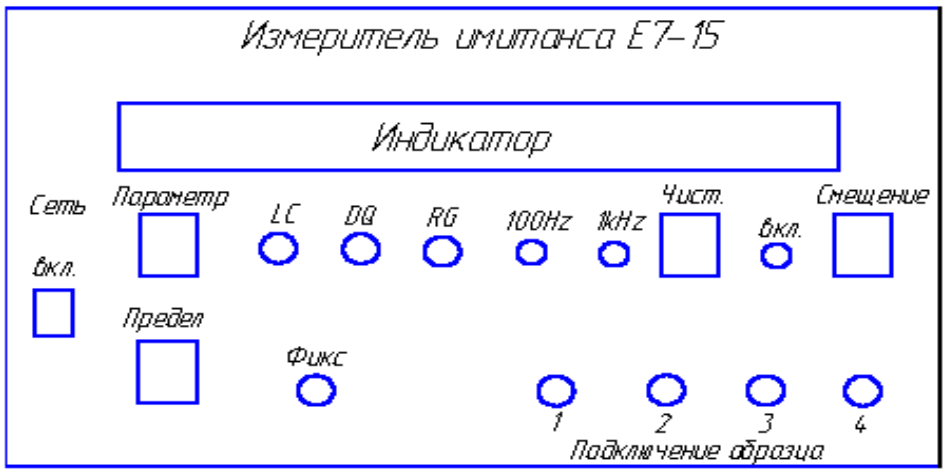


Рисунок 1.7 –Внешний вид панели прибора Е7-15

Измеритель иммитанса (параметра цепей) может измерять активные и реактивные параметры, измеряемых объектов по параллельной (1-4 пределах измерения) или последовательно (5-8 пределах измерения) эквивалентной схеме. Относительные параметры измеряются в форме фактора потерь Д или добротности Q.

Для проведения измерения достаточно подключить измеряемый объект к зажимам УП-2 и установить при помощи кнопок передней панели нужный режим измерения. Нажатием кнопки "Параметр" можно установить прибор в режим измерения реактивной составляющей иммитанса (L или C), активной (R или G) или в режим измерения относительного параметра (Д или Q). Конкретная форма компонента иммитанса выбирается прибором автоматически в соответствии с таблицей 1.2.

Таблица 1.2 – Конкретная форма компоненты

Пределы измерения	Составляющая иммитанса объекта измерения	Формула представления результата
1 - 4	C L > L пред. L < L пред. R > R пред. R < R пред.	C - C L G R
5 - 8	L C > C C < C R	L - L C R
1 - 8	Д > 2 Д < 2	Д G

1.Кнопкой "ЧАСТОТА" установить требуемую частоту измерения 100 Гц или 1 кГц.

2.При измерении емкости электрических конденсаторов нажатием кнопки "смещение" можно подать поляризующее напряжение плюс 4,8 В (со стороны выводов I, U). Ток утечки через измеряемый конденсатор не должен при этом превышать 0,2 мА.

При измерении емкости конденсаторов с подачей напряжения смещения следует учитывать , что постоянная времени заряда измеряемого конденсатора ориентировочно составляет $\tau = 3$ С, где С – емкость измеряемого объекта в миллифарадах, τ - в сек.

3.При нажатии кнопки "ПРЕДЕЛ" измеритель иммитанса производит автоматическое переключение пределов измерения с 1 по 8 и установку прибора в режим автоматического выбора предела измерения. Номер установленного предела и режим автоматического выбора индицируется при этом на дисплее прибора (1…8 А). Для установки требуемого предела измерения необходимо опустить кнопку "ПРЕДЕЛ" в тот момент времени, в который на дисплее высвечивается требуемый номер предела (или режим автоматического выбора предела).

При необходимости узнать номер установленного предела нужно нажать кнопку "ПРЕДЕЛ", считать номер предела и отпустить кнопку до момента изменения предела (около 1,5 с). Нахождение прибора в режиме ручной установки предела индуцируется зажиганием светодиодного указателя "ФИКС".

Если установленный вручную предел приводит к перегрузке измерительной цепи, на дисплее измерителя иммитанса появляется символ "ПРГР".

4.При измерении 3-зажимных объектов точку нулевого потенциала необходимо подключать к корпусному выводу УП-2.

При этом не рекомендуется проводить измерения объектов, шунтирующие импедансы (выводы) Z1 и Z2.

Полученные значения $\mathrm{tg}\delta$ и емкости образцов заносим в таблицу 1.3.

Относительную диэлектрическую проницаемость для трансформаторного масла и другой изоляции, при одном измерении емкости, определяем по формуле:

$$\varepsilon_r = \frac{C \cdot h}{\varepsilon_0 \cdot S},$$

где h - расстояние между электродами, м;

S - площадь электродов, м^2;

C - ёмкость, Ф.

ε_0 – электрическая постоянная, которая равна 8,854 · 10^{-12} Ф/м.

Для твердой плоской изоляции, представленной на рисунке 1.8 можно сделать два измерения емкости без изоляции и с изоляцией. Относительная диэлектрическая проницаемость изоляционного материала при двух измерениях рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0},$$

где Co - емкость воздушного конденсатора, пФ;

C - емкость конденсатора с диэлектриком, пФ.

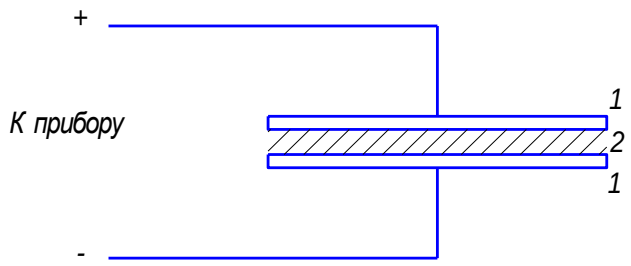


Рисунок 1.8 – Общий вид испытуемого плоского образца площадью S, м^2 1- обкладки конденсатора; 2 – испытуемый материал.

Таблица 1.3 - Данные испытаний изоляционных материалов

Материал	Добротность, Q	tgδ	Ёмкость C, пФ	Толщина образца, h см	Площадь электродов, S, см^2	Диэлектрическая проницаемость ε_r
1.Пленкосинтокартон						
2.Электрокартон						
3.Изофлекс						
4.Миканит						
5.Пленкоэлектрокартон						
6.Воздух						
7. Синтофлекс						

Для определения зависимости изменения tgδ и диэлектрической проницаемости исследуемых образцов изоляционных материалов при изменении температуры используется универсальный прибор "Измеритель LC" ЛСМ1.

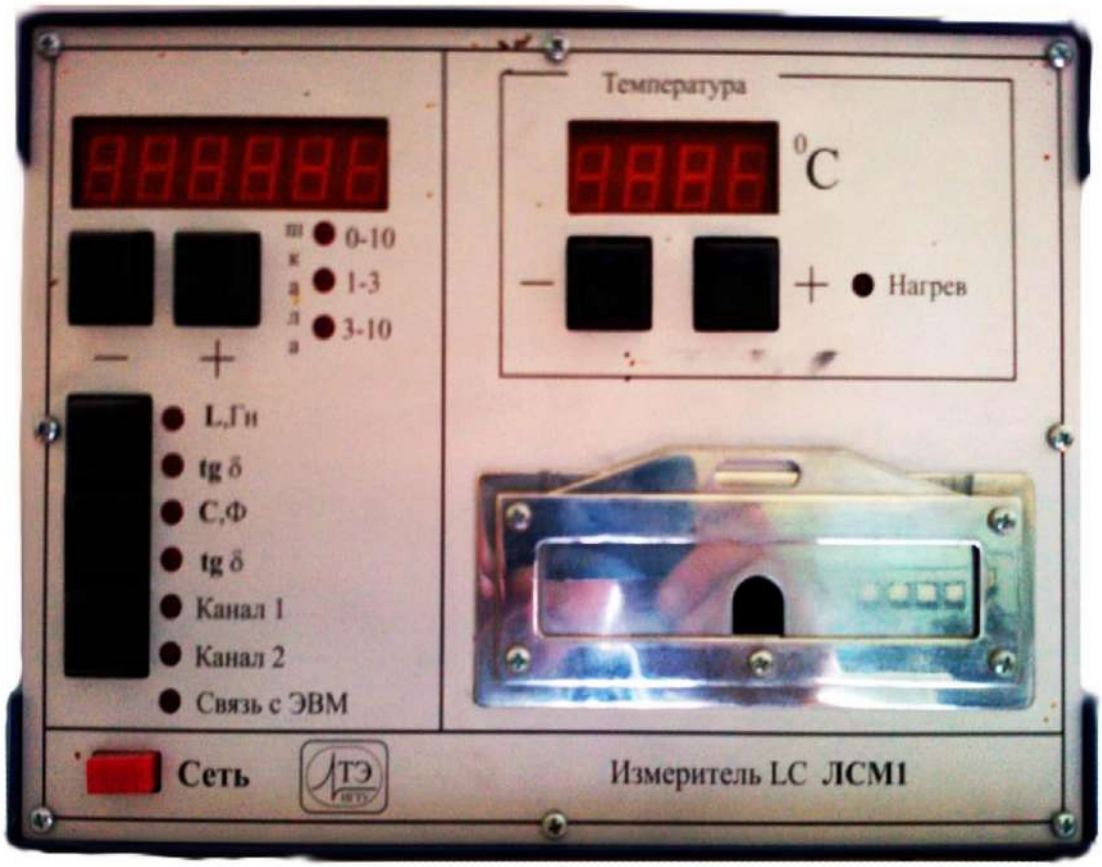


Рисунок 1.9 – Внешний вид измерителя LC ЛСМ 1

Образец диэлектрического материала помещается в измерительную камеру. Кнопкой «сеть» прибор включается в работу. Соответствующими кнопками на панели выбирается измеряемый параметр C или tgδ, при этом напротив измеряемого параметра загорится индикационный светодиод.

Измерение необходимо проводить по каналу 1. На индикаторе находящемся верхнем левом углу высветится измеренное значение параметра. Если измеренное значение меньше измеряемого диапазона, то на индикаторе высветится символ **L**, в этом случае необходимо нажать кнопку “ – “. Если

измеренное значение больше измеряемого диапазона, то на индикаторе высветится символ **Н**, в этом случае необходимо нажать кнопку “ + “.

Для снятия зависимости изменения параметра от температуры, необходимо выставить заданную температуру при помощи кнопок “ + “и “ – “ на панели температура. Однократное нажатие любой из этих кнопок показывает заданное значение температуры, двойное нажатие кнопок приводит к изменению заданного значения с шагом 5^0С. Индикатор температуры в правом верхнем углу показывает текущее значение температуры.

Полученные значения $\mathrm{tg}\delta$, емкости образцов и температуру заносятся в таблицу 1.4.

Относительную диэлектрическую проницаемость определяем расчётным путём

Таблица 1.4 - Данные испытаний параметров изоляционных материалов при изменении температуры

Температура / Материал	25	30	35	40	45	50	55	60	65	…	105
$\mathrm{tg}\delta$											
Ёмкость С, пФ											
Диэлектрическая проницаемость ε_r											

Содержание и форма отчёта

Отчет должен содержать:

1. Краткие теоретические сведения;
2. Схемы опытов;
3. Данные измерений и расчеты;
4. Графики зависимостей $\varepsilon_r = f(T)$, $\mathrm{tg}\delta = f(T)$;
5. Выводы по результатам проведенных лабораторных опытов и расчетов: анализ зависимостей $\varepsilon_r = f(T)$, $\mathrm{tg}\delta = f(T)$.

Контрольные вопросы

1. Назовите основной отличительный признак (свойство) диэлектрика.
2. В чем отличие терминов «диэлектрический материал», «изоляционный материал»?
3. Что называется относительной диэлектрической проницаемостью?
4. Поясните разницу в терминах: «абсолютная диэлектрическая проницаемость», «относительная диэлектрическая проницаемость», «диэлектрическая проницаемость».
5. Факторы, влияющие на относительную диэлектрическую проницаемость.
6. Диэлектрические потери - что это такое?
7. Физическая сущность диэлектрических потерь.
8. Каким образом в практической деятельности электротехнического персонала применяется угол диэлектрических потерь?
9. Формула определения электрической емкости конденсатора для плоского участка изоляции.
10. Что такое: "добротность изоляции" и о чём она свидетельствует?
11. Изобразите векторную диаграмму токов в диэлектрике с потерями и объясните сущность $\mathrm{tg}\delta$.
12. От каких основных факторов зависят потери энергии в электрической изоляции, и каким образом?

Литература

1.Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов – М.: Высшая школа, 2007. – 538с.

2.Степанчук Г.В. Электротехнические материалы: конспект лекций по дисциплине "Материаловедение"./Г.В. Степанчук, П.В. Гуляев – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2009. – 114 с.

3.Журавлева Л.В. Электроматериаловедение / Л.В. Журавлева. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. - 312с.

4.Электротехнические и конструкционные материалы / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюнин, и др.; под ред. В.А. Филикова. – М.: Издательский центр «Академия», 2007, - 280с.

5.Электротехнический справочник: В 4 т. Т.1 Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. В.Г. Герасимова, А.Ф.Дьякова, Н.Ф. Ильинского и др. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 440с.

6. ГОСТ 21515-76. Материалы диэлектрические. Термины и определения. М., 2005. – 14с.

(назад)

Лабораторная работа № 2.

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы Изучение свойств магнитных материалов. Определение потерь в стали.

2.1 Теоретические сведения

Любое вещество, помещенное в магнитное поле, приобретает магнитный момент. Намагничивание вещества характеризуется следующими параметрами: магнитная индукция B (Тл), напряженность магнитного поля H (А/м), намагниченность J (А/м), магнитная восприимчивость k_m, магнитная проницаемость μ, магнитный поток Ф (Вб).

В соответствии с магнитными свойствами все материалы делятся на диамагнитные (диамагнетики), парамагнитные (парамагнетики), ферромагнитные (ферромагнетики), антиферромагнитные (антиферромагнетики), ферримагнитные (ферримагнетики).

Диа-, пара- и антиферромагнитные вещества относятся к слабомагнитным материалам. Ферро- и ферримагнитные вещества являются сильномагнитными материалами, поэтому в электротехнике в качестве магнитных материалов применяют ферромагнитные и ферримагнитные вещества

Магнитные материалы – это материалы, которые могут усиливать магнитное поле, в которое их помещают.

Все магнитные материалы делятся на две основные группы: магнитомягкие и магнитотвердые.

Магнитомягкие материалы отличаются малыми потерями на гистерезис (узкий цикл гистерезиса). Они обладают относительно большими значениями магнитной проницаемости, малой коэрцитивной силой и относительно большой индукцией насыщения (см. Рис.2.1.). где B_s - индукция насыщения, при которой материал практически достигает полного намагничивания, Тл.; B_r - остаточная магнитная индукция, Тл; Нс – коэрцитивная сила, А/м.

Магнитомягкие материалы, в частности электротехнические стали, применяют для сердечников трансформаторов, электрических машин и аппаратов, магнитных экранов и др., т.е. где требуется быстрое намагничивание с малыми потерями энергии.

Улучшение энергетических показателей электрических машин (η и $\cos\varphi$), снижение их массы достигается в основном за счет повышения качества магнитомягких материалов, применяемых при изготовлении и ремонте машин.

Магнитотвёрдые материалы отличаются широкой петлёй гистерезиса, рисунок 2.2, они обладают большой коэрцитивной силой и большой остаточной индукцией. Эти материалы, будучи намагниченными, могут длительное время сохранять сообщённую им магнитную энергию, поэтому могут служить источниками постоянного магнитного поля, используются для изготовления постоянных магнитов.

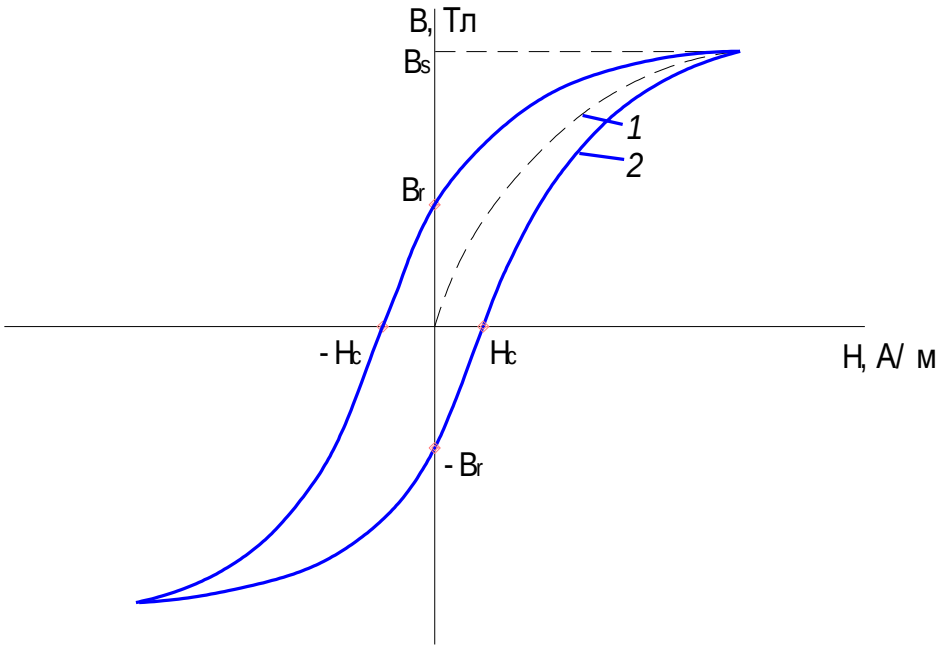


Рисунок 2.1 – Гистерезесный цикл магнитомягкого материала

1 – основная кривая намагничивания; 2 – статическая петля гистерезиса.

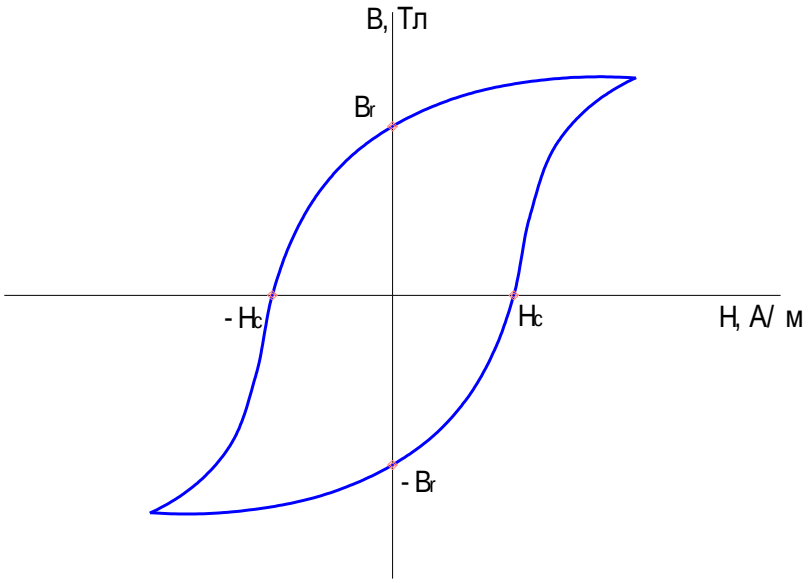


Рисунок 2.2 – Гистерезесный цикл магнитотвёрдого материала

Магнитные материалы, согласно их основе, делятся ещё на три группы: металлические, неметаллические, магнитодиэлектрики.

К металлическим магнитомягким материалам относятся: чистое (электролитическое) железо; листовая электротехническая сталь; железо - артко, пермалои (железо - никелевые сплавы) и др.

К металлическим магнитотвердым материалам относятся легированные стали (закаливаемые на мартенсит), специальные сплавы на основе железа, алюминия, никеля и легирующих компонентов (кобальт, кремний и другие).

К неметаллическим магнитным материалам относятся ферриты. Это материалы получаемые из порошкообразной смеси окислов некоторых магнитных металлов и окиси железа. Опресованные ферритовые изделия (сердечники, кольца микромашин и др. изделия) подвергают высокотемпературной обработке - отжигу при температуре 1300-1500°С. Различают ферриты магнитомягкие и магнитотвердые.

Наиболее широкое применение находят магнитомягкие ферриты - никелевоцинковые, марганцевоцинковые, литиевоцинковые.

Марганцевоцинковые ферриты выпускают с магнитной проницаемостью в пределах 5500-6000. Особенно хорошо зарекомендовали себя марганцевоцинковые ферриты в качестве сердечников импульсных трансформаторов, а также для аппаратуры дальней связи при частоте до несколько сотен килогерц.

Магнитотвердые ферриты - кобальтовые, бариевые. Кобальтовые ферриты получают при спекании магнетита $FeO \cdot Fe_2O_3$ и феррита кобальта $CoO \cdot Fe_2O_3$, они имеют коэрцетивную силу Нс = 72000 А/М, остаточную индукцию B_r = 0,15 Тл. Магнитотвёрдые ферриты применяют для магнитов в электродинамических громкоговорителях, в микродвигателях, для измерительных приборов.

Магнитодиэлектрики - композиционные материалы, состоящие из 70-80% порошкообразного магнитного материала и 30-20% органического высокополимерного диэлектрика.

Ферриты и магнитодиэлектрики отличаются от металлических магнитных материалов большими значениями удельного объемного сопротивления (ρ_v = 10...10^8 Ом·м), что резко снижает потери на вихревые токи и позволяет использовать эти материалы в технике высоких частот. Кроме этого, ферриты и магнитодиэлектрики обладают стабильностью своих магнитных характеристик в широком диапазоне частот.

Электротехническая сталь выпускается в виде листов, рулонов, резанной ленты.

Тонколистовая электротехническая сталь согласно ГОСТ 21427.0-75 по структурному состоянию и виду проката делится на 3 класса: горячекатаная изотропная, холоднокатаная изотропная и холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой. В последние годы созданы изотропные холоднокатаные стали с кубической структурой, имеющие высокие магнитные характеристики, как в направлении проката, так и в направлении перпендикулярном ему.

Магнитомягкие материалы с высокой проницаемостью в слабых и средних магнитных полях и низкой коэрцитивной силой (электротехнические стали, пермалой, викалой, термалой) используются для изготовления сердечников электрических машин и аппаратов, трансформаторов, реакторов, сердечников катушек магнитных пускателей, автоматических выключателей, масляных трансформаторов, дросселей, полюсных наконечников и др.

Обозначение марок стали состоит из 4-х цифр.

Первая цифра обозначает класс по структурному состоянию и виду прокатки, а именно:

1 - горячекатаная изотропная;

2 - холоднокатаная изотропная;

3 - холоднокатаная анизотропная с ребровой структурой;

5 - холоднокатаная анизотропная с плоской кубической структурой;

Вторая цифра обозначает группу сталей по степени легирования, таблица 2.1.

Таблица 2.1 – Степень легирования стали

Номер группы	Содержание кремния, %
0 - нелегированная	до 0,4
1 - легированная	0,4 ÷ 0,8
2 - слаболегированная	0,8 ÷ 1,8
3 - среднелегированная	1,8 ÷ 2,8
4 - повышенно легированная	2,8 ÷ 3,8
5 - высоко легированная	3,8 ÷ 4,8

Кремний, вводимый в сталь в количестве 0,8 - 4,8% образует с железом твердый сплав и резко повышает удельное электрическое сопротивление, благодаря чему снижаются потери на вихревые токи.

Наличие кремния сказывается благоприятно на других магнитных свойствах: снижаются потери на гистерезис, увеличивается магнитострикция.

Введение в малоуглеродистую сталь кремния увеличивает ее твердость, но придает хрупкость. В связи с этим ЭТС испытывают на хрупкость. О хрупкости судят по числу перегибов выдерживаемых пластинкой без излома. Число перегибов зависит от толщины листов (0,1 - 1 мм).

Третья цифра обозначает группу сталей по основной нормируемой характеристике:

0 - удельные потери Вт/кг при В = 1,7 Тл и частоте 50 Гц;

1 - удельные потери Вт/кг при В = 1,5 Тл и частоте 50 Гц;

2 - удельные потери Вт/кг при В = 1 Тл и частоте 400 Гц;

4 – удельные потери Вт/кг при магнитной индукции В=0,5 Тл и частоте 3000Гц;

6 - магнитная индукция в в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м ($B_{0,4}$);

7 – магнитная индукция в средних магнитных полях при напряженности поля 10 А/м (B_{10})

Таблица 2.2 – Магнитные свойства холоднокатаной анизотропной тонколистовой стали

марка стали	толщина	Удельные потери, Вт/кг, не более			Магнитная индукция, Тл, не менее, при напряжении магнитного поля, А/м		
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	$P_{1,7/50}$	100	250	2500
3411	0,5	1,1	2,45	3,2	-	-	1,76
	0,35	0,8	1,75	2,5	-	-	1,75
3412	0,5	0,95	2,1	2,8	-	-	3,85
	0,35	0,7	1,5	2,2	-	-	1,8
3413	0,5	0,8	1,75	2,5	-	-	1,85
	0,35	0,6	1,3	1,9	-	-	1,85
	0,3	-	1,19	1,75	-	-	1,85
3414	0,5	0,7	1,5	2,2	1,6	1,7	1,68
	0,35	0,5	1,1	1,6	1,6	1,7	1,88
	0,3	-	1,03	1,5	1,6	1,7	1,88
	0,28	-	1,05	1,55	-	-	1,85
3415	0,35	0,46	1,03	1,5	1,61	1,71	1,9
	0,3	-	0,97	1,4	1,61	1,71	1,9
	0,28	-	0,95	1,38	1,61	1,71	1,9
3416	0,28	-	0,89	1,3	1,61	1,7	1,9

Четвертая цифра обозначает порядковый номер сталей.

Например: сталь 3413 расшифровывается следующим образом - холоднокатаная анизотропная сталь с содержанием кремния от 2,8 до 3,8% с удельными потерями при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц, номер три.

Горячекатаная изотропная сталь изготовляется в виде тонких листов по ГОСТ 21427.3-75 следующих марок: 1211, 1212, 1213, 1311, 1312, 1313, 1411, 1412, 1413, 1511, 1512 , 1513, 1521, 1561.

Холоднокатанная изотропная ГОСТ 21427.2 – 83: 2011…..2014, 2111, 2112, 2311,2312,2411…2413

Холоднокатаная анизотропная, соответствующая стандарту СЭВ

СТ-102-74 по ГОСТ 21427.1-75 следующих марок: 3411, 3412, 3413, 3414, 3415, 3416, 3421 , 3422, 3423 , 3424, 3425, 3441, 5421 (с плоской кубической структурой).

Подразделение стали по виду покрытия:

а) с изолированным термостойким покрытием (ЭТ);

б) с покрытием не ухудшающем штампуемость (М) - мягкое;

в) без электроизоляционного покрытия (БП) - для изготовления короткозамкнутых роторов асинхронных двигателей.

Для магнитопроводов работающих в постоянных магнитных полях применяется техническое железо, углеродистые стали.

2.2 Программа работы

2.2.1 Изучить электротехнические стали используемые при ремонте и изготовлении электрических машин и аппаратов.

2.2.2 Определить электрическую прочность изоляции листов электротехнической стали.

2.2.3. Определить сопротивление изоляции пакета активной стали.

2.2.4. Определить удельные потери в стали и марку электротехнической стали.

2.3 Техника безопасности

2.3.1 Не включать электрические установки без разрешения преподавателя.

2.3.2. После подачи напряжения не касаться проводов, даже если они изолированы.

2.3.3. Проведение испытаний выполнять звеном не менее 2-х человек.

2.3.4. Все переключения (изменения) в схемах выполнять только в обесточенном их состоянии.

2.3.5. По окончании испытания все установки должны быть обесточены.

2.4 Приборы и оборудование

Для определения удельных потерь в электротехнической стали используется статор асинхронного двигателя 4А132S4 с намотанной намагничивающей обмоткой.

Установка питается от однофазного трансформатора типа ЛАТР при изменении напряжением 0…220 В. Намагничивающий ток измеряется амперметром электродинамической системы. Потребляемая мощность измеряется однофазным ваттметром Д 522.

Для измерения сопротивления изоляции пакета стали используется терраомметр Е6-13А.

2.5 Выполнение работы

2.5.1 Определение сопротивления изоляции

Для определения сопротивления изоляции пакета стали опыт следует проводить в следующем порядке:

- собрать пакет из 20 листов стали (трансформаторной стали или сегментов сердечника статора асинхронного двигателя);

- на пакет стали положить 2 электрода площадью больше площади пакета стали, как показано на рисунке 2.3;

- весь пакет сжать прессом до давления 0,6 МПа;

- подать постоянное напряжение на электроды – 3 ÷ 5 В;

- определить сопротивление изоляции пакета листов стали.

Данные опытов заносят в таблицу произвольной формы.

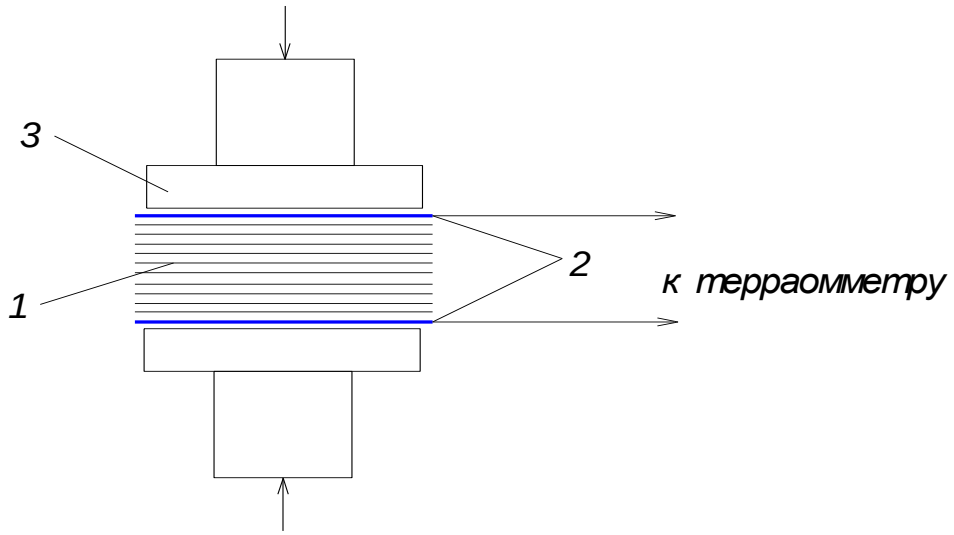


Рисунок 2. 3 - Схема определения сопротивления изоляция листов пакета стали 1 - пакет изолированных листов; 2 - электрод; 3 - изоляция (электрокартон); Р – токоограничивающее сопротивление, R= 200 Ом P_1 – усилие 0,6 МПа

2.6 Определение удельных потерь в стали

Для определения удельных потерь в стали статора без обмотки должна быть намотана намагничивающая обмотка, число витков которой определяется по формуле:

$$W_н = \frac{U}{4{,}44 \cdot f \cdot B_a \cdot h_a \cdot l_1 \cdot K_c}$$

где $W_н$ – число витков намагничивающей обмотки;

U и f - напряжение и частота источника тока, В, Гц;

B_a - магнитная индукция в спинке статора, Ва=1 Тл, как типовое при

испытаниях активной стали;

h_a - высота спинки статора, м;

$К_с$ - коэффициент заполнения пакета сталью, равный 0,95 для лакированной стали, м;

l_1 - длина пакета стали, м.

При помощи МДС намагничивающей обмотки создаётся заданная магнитная индукция.

Для измерения удельных потерь в стали необходимо собрать схему, показанную на рисунке 2.4.

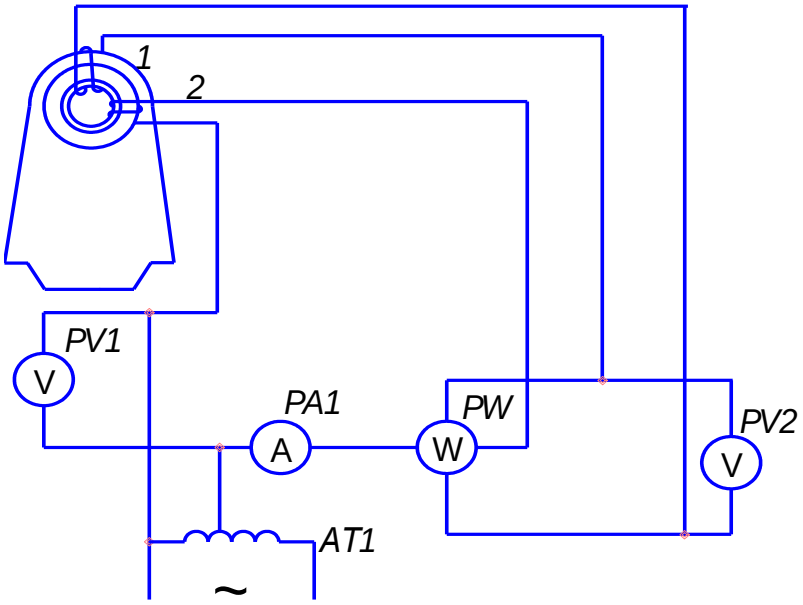


Рисунок 2.4 - Схема испытания сердечника машины

Измерение потерь в стали без учета полного падения напряжения в намагничивающей обмотке дает неверный результат. Чтобы устранить ошибку, обмотку напряжения ваттметра нужно присоединить к зажимам контрольной обмотки 2, число витков которой равно числу витков намагничивающей обмотки 1.

При испытании по определению удельных потерь в стали задаемся следующими значениями намагничивающего тока 1, 2, 3, 4, 5 А.

Данные испытаний занести в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 - Данные испытаний по определению потерь в стали

№ п/п	Тип двигателя	U, В	I_μ, А	P_1, Вт	$P_{уд}$, Вт/кг	В, Тл

Величина индукции в стали определяется по формуле:

$$B_a = \frac{U}{4{,}44 \cdot f \cdot W_н \cdot h_a \cdot l_1 \cdot K_c}$$

где $W_н$ – число витков намагничивающей обмотки, $W_н$ =70;

U и f - напряжение и частота источника тока, В, Гц;

h_a - высота спинки статора, м;

K_c - коэффициент заполнения пакета сталью, равный 0,95 для стали изолированной лаком, м;

l_1 - длина пакета стали, м.

Значение удельных потерь в стали определяется по формуле:

$$P_{уд} = \frac{P_1}{G}, \text{ Вт/кг},$$

где G - масса активной стали, определяемая по размерам сердечника, по формуле в кг:

$$G = \gamma_c \cdot h_a \cdot l_1 \cdot L$$

где γ_c - плотность стали - $7{,}8 \cdot 10^3$ кг/м^3;

h_a - высота спинки статора, м;

l_1 - длина пакета стали, м;

L - длина силовой линии в спинке статора, м.

По данным таблицы 2.3 в одних координатах строится зависимость $P_{уд} = f_1(U)$, $B = f_2(U)$ (рисунок 2.5).

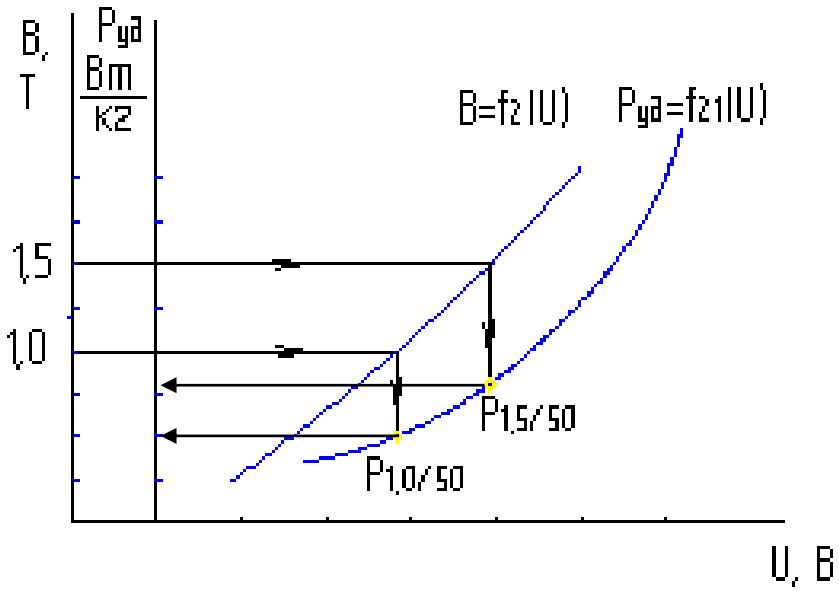


Рисунок 2.5 – Графическое определение удельных потерь.

Затем по графикам определяются удельные потери в стали при индукции 1 Тл и 1,5 Тл и сравнивают полученные значения с нормируемыми.

2.7 Определение пробивного напряжения

Для определения пробивного напряжения необходимо собрать схему представленную на рисунке 2.6.

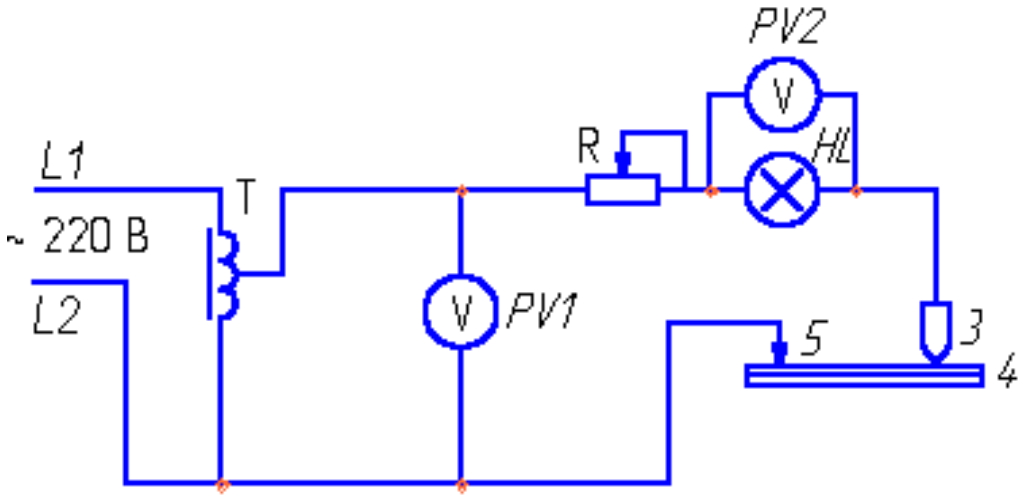


Рисунок 2.6 – Схема определения пробивного напряжения листов активной стали Т – автотрансформатор; HL – сигнальная лампа; 3 – электрод; 4 – испытываемый образец; 5 – зажим; R – токоограничивающее сопротивление.

Затем, на выходе автотрансформатора (1) необходимо установить минимальное напряжение. При помощи зажима (5) подсоединить электрод (3) к испытываемому образцу в месте очищенном от изоляции. Переносной электрод (3) установить на поверхность изолированного листа в любой точке. При помощи автотрансформатора плавно повышать приложенное к схеме напряжение до пробоя изоляции. Значение напряжения пробоя фиксируют по вольтметру в момент зажигания сигнальной лампы.

Напряжение пробоя:

$$U_{пр.} = U_1 - U_2$$

Данные опыта заносят в таблицу произвольной формы.

Содержание и форма отчёта

Отчет должен содержать:

1. Краткие теоретические сведения о магнитных материалах;
2. Схемы испытаний;
3. Результаты проведенных экспериментов и выполненные расчеты;
4. Выводы по результатам проведенных лабораторных опытов и расчетов.

Контрольные вопросы

1. Как классифицируются материалы по магнитным свойствам?
2. Какими параметрами характеризуются магнитные материалы?
3. Что такое коэрцитивная сила?
4. Какие материалы относятся к магнитомягким?
5. В чем заключается процесс легирования ЭТС?
6. Цель легирования ЭТС?
7. Что означают цифры в маркировке сталей?
8. Какие существуют виды изоляции листов электротехнических сталей?
9. С какой целью сердечники электрических машин, трансформаторов и аппаратов делают из листовой стали?

10. Цель изолирования листов активной стали при изготовлении сердечников электрических машин, трансформаторов, аппаратов?

11. Из каких составляющих состоят потери в стали сердечников электрических машин и трансформаторов?

12. Какие материалы для постоянных магнитов используются в электротехнике?

Литература

1.Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов – М.: Высшая школа, 2007. – 538с.

2.Степанчук Г.В. Электротехнические материалы: конспект лекций по дисциплине "Материаловедение"./Г.В. Степанчук, П.В. Гуляев – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2009. – 114 с.

3.Журавлева Л.В. Электроматериаловедение / Л.В. Журавлева. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. - 312с.

4.Электротехнические и конструкционные материалы / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюнин, и др.; под ред. В.А. Филикова. – М.: Издательский центр «Академия», 2007, - 280с.

5.Электротехнический справочник: В 4 т. Т.1 Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. В.Г. Герасимова, А.Ф.Дьякова, Н.Ф. Ильинского и др. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 440с.

(назад)

Лабораторная работа № 3.

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Цель работы Определение прочностных свойств электротехнических материалов, изучение методов определения разрушающих нагрузок (напряжений).

3.1 Теоретические сведения

К металлам высокой проводимости относятся медь, алюминий, сплавы меди и алюминия.

Чистые металлы обладают малым удельным сопротивлением

$\rho = 0{,}015...0{,}105 \ \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$, сплавы имеют более высокие значения удельного сопротивления $\rho = 0{,}30... \ 1{,}8 \ \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

Основные характеристики некоторых проводниковых материалов приводятся в таблице 3.1.

Наряду с малым удельным сопротивлением чистые металлы обладают хорошей пластичностью, т.е. могут вытягиваться в тонкую проволоку (до диаметра 0,01 мм) и ленты (до толщины 0,01 мм) и прокатываться в фольгу толщиной менее 0,01 мм.

Сплавы металлов обладают меньшей пластичностью по сравнению с чистыми металлами, они более упруги и имеют большую механическую прочность.

Удельное сопротивление всех металлических проводников увеличивается с ростом температуры, что объясняется увеличением скорости хаотического движения электронов и узлов кристаллической решетки металла. К увеличению удельного сопротивления металлов приводит так же их механическая обработка, вызывающая остаточную деформацию в металле. К хо-

лодной обработке (прокатке, волочению) приходится прибегать для получения проводниковых изделий с повышенным пределом прочности при растяжении, например, при изготовлении проводов воздушных линий, троллейных проводов и т. д. Чтобы вернуть деформируемым металлическим проводам прежнюю величину удельного сопротивления, их подвергают термической обработке, обжигу.

Анализ таблицы 3.1 показывает, что металлы высокой электрической проводимости имеют и повышенную теплопроводность.

Для полного представления о свойствах проводниковых материалов необходимо знать не только их электрические, но и механические характеристики.

К механическим характеристикам проводниковых материалов относятся разрушающее напряжение при растяжении $\sigma_р$, при сжатии $\sigma_с$, при статическом изгибе $\sigma_{из}$, твердость материалов $Н_в$.

Например, разрушающее напряжение при статическом изгибе рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{из} = 1{,}5 \cdot \frac{F_{из} \cdot l}{b \cdot h^2}$$

где $F_{из}$ - разрушающая нагрузка при статическом изгибе Н, определяемая по показаниям приборов при испытаниях;

l - пролет между опорами, м;

b - ширина образца, м;.

h - толщина образца, м.

Испытание на изгиб проводят на стандартных образцах длиной 120 мм и поперечным сечением 15×10.

Для механических испытаний материала на растяжение и сжатие используются различные машины и прессы - пресс гидравлический ПГПР, прибор ПИМ, разрывные машины с ручным приводом и др.

Твердость - сопротивление материала местной пластической деформации, возникающей при внедрении в него более твёрдого тела. Оценку

степени твердости производят: при выборе "твердых" и "мягких" проводниковых материалов; при раскатке кабельных барабанов и прокладке кабельных изделий с герметическими свинцовыми или алюминиевыми оболочками; при болтовых и других механических креплениях пластических масс, изолированных проводниковых материалов; когда необходимо знать глубину продавливания, степень их твердости; при исправлении коробления пластин в свинцовых аккумуляторах; при изготовлении и ремонте контактных систем.

Определение твердости может производится различными приборами (Роквелла, Шора, Польди, Герберта, Мартинса, Кузнецова, по шкале Мооса) и способами:

1. вдавливанием стального шарика;
2. вдавливанием стального или алмазного конуса;
3. падением ударника на поверхность испытуемого материала;
4. царапанием коническим алмазом;
5. по затуханию колебаний маятника Кузнецова;
6. относительной твердости царапанием и сравнением по шкале Мооса.

Таблица 3.1 - Основные характеристики проводниковых материалов

Материал	Плотность, кг/м^3	Температура плавления, °С	Предел прочности при растяжении, мПа	Удельное электрическое сопротивление, при = 20°С, $\frac{Ом \cdot мм^2}{м}$	Температурный коэффициент сопротивления при 20°С	Удельная теплопроводимость, Вт/м·°С	Удельная теплоёмкость, Дж/кг·°С	Температурный коэффициент линейного расширения (20-100°С), 1/°С	Область применения
Алюминий	2690-2703	657-660	75-180	0,0262-0,0295	0,004-0,00432	209-210	922	$24 \cdot 10^{-6}$	Для изготовления проводов и шин
Бронза	8230-8900	955-1050	520-1350	0,095-0,10	0,0049-0,0018	92-105	398-833	$(1,6\text{-}1,8) \cdot 10^{-5}$	Для изготовления проводов, пружин, контактов
Вольфрам	18000-19300	3370-3400	2000-4000	0,053-0,055	0,0041-0,005	92-108	141	$43 \cdot 10^{-7}$	Для изготовления контактов и электродов
Латунь	8500-8600	880-1070	230-850	0,430-0,108	0,0010-0,0027	84-245	-	$(1,7\text{-}2) \cdot 10^{-5}$	Для изготовления контактов, электродов, зажимов
Медь	8890-8940	1083	256-409	0,01724-0,0180	0,0041-0,0043	394-400	385,5	$1,7 \cdot 10^{-6}$	Для изготовления проводов, шин, контактов
Константан	8900	1260-1270	400-700	0,45-0,52	$(2\text{-}5) \cdot 10^{-5}$	$(1,2x1,4) \cdot \cdot 10^{-5}$	480-500	39-42	Для изготовления приборов, реостатов, термопар
Копель	8990	1250-1260	600-750	0,48-0,55	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,56 \cdot 10^{-5}$	500-600	45-47	Для термопар в паре с хромелевой или медной проволокой
Алюминий	8400	1448-1452	550-640	0,23-0,35	$4 \cdot 10^{-2}$	$(2,3\text{-}2,9) \cdot 10^{-5}$	900-1000	-	Для термопар в паре с хромелевой проволокой

Наиболее распространённым является способ вдавливания шарика - способ Бринелля (рисунок 3.1).

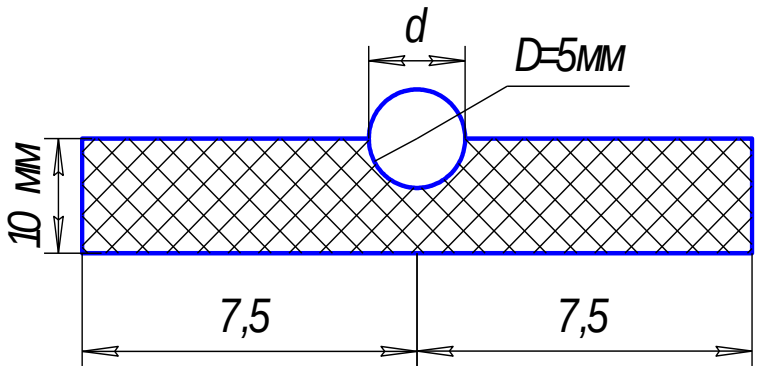


Рисунок 3.1 - Схема определения твердости по способу вдавливания шарика

Усилие вдавливания повышают до наибольшего значения в течение 30 с. Наибольшее усилие выдерживают в течение 1 мин, затем его плавно уменьшают.

Твердость по Бринеллю (НВ) (Н/см^2) определяют делением вдавливающего усилия Р (Н) на площадь F (см^2) сферического отпечатка (лунки) в образце: НВ=P/F.

Для определения площади F измеряют диаметр лунки d или её глубину h в миллиметрах (рисунок 3.1) и подсчитывают по формуле:

$$F = \frac{\pi \cdot D}{2} \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2}) \quad \text{или}$$

$$F = \pi \cdot D \cdot h, \text{ см}^2,$$

где D – диаметр вдавливаемого шара, см;

d – диаметр сферического отпечатка (лунки), см.

Твердость по Бринеллю определяют на специальном прокатном прессе ПИМ. Испытуемый образец устанавливают на столике и создают нужное давление (для изоляционных материалов оно должно быть 250…750 Н).

Для учебных целей достаточная степень точности твердости материалов достигается использованием гидравлического пресса завода "Прибор" (рисунок 3.2).

Для точного измерения диаметра лунки используют микроскоп. Если его нет, диаметр отпечатка можно измерить с помощью специальной лупы с мерной сеткой (прибор МПБ-2, цена одного деления 0,05 мм).

3.2 Программа работы

3.2.1 Изучить проводниковые материалы.

3.2.2 Изучить механические характеристики проводниковых материалов.

3.2.3 Определить твердость изоляции кабеля.

3.2.4 Определить разрушающее напряжение медной и алюминиевой проволоки.

3.2.5 Сделать выводы.

3.3 Приборы и оборудование

Для механических испытаний на твердость материала используется прибор ПИМ и образцы материалов: дерево, текстолит, гетинакс, стеклотекстолит, латунь, бронза. Лупа с 24 ^{x} кратным увеличением для определения диаметра оттиска. Для определения глубины вдавливания используется индикатор Н4 ГОСТ 577-68.

Для определения разрушающего напряжения при изгибе используется прибор ПГПР и стандартные образцы материала длиной 120 мм и поперечным сечением 15×10

3.4 Порядок выполнения работы

3.4.1. Подготовка прибора ПИМ к работе

Перед началом опыта прибор необходимо зажать в слесарных тисках за специальный прилив, расположенный в нижней части корпуса прибора. В за-

висимости от проводимого опыта и материала испытуемого образца, подобрать и установить наконечник с диаметром D, мм . На наконечник надеть кронштейн 13 (рисунок 3.2) и закрепить винтом. В другое отверстие кронштейна вставить индикатор. При испытании толщина образца должна быть не более 30 мм, при рекомендуемой длине и ширине не более 200х80 мм.

Образец расположить посередине опорного столика под наконечник 11, который подвести к образцу до прикосновения его с поверхностью. Затем измерительный наконечник индикатора подвести к образцу до касания его поверхности и закрепить винтом индикатор в кронштейне, после чего стрелки индикатора необходимо установить в нулевое положение.

3.4.2 Определение твердости проводниковых материалов (свинцовая и алюминиевая оболочка кабеля)

а) установить образец материала на столик пресса (рисунок 3.2);

б) ввести в соприкосновение образец материала и шарик;

в) увеличить механическую нагрузку в течении 30 секунд от 50 до 1400 Н таким образом, чтобы глубина вдавливания шарика равнялась 0,15-0,35 мм. Выдержать максимальную нагрузку соответствующую твердости материала в течении 60 секунд, а затем плавно снять нагрузку. Измерить диаметр лунки d или её глубину h и подсчитать твердость материала согласно формулам:

$$H_B = \frac{10 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot h} = \frac{20 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

где $H_в$ - твердость по Бринеллю, МПа;

P - нагрузка на шарик, Н;

D - диаметр шарика, мм;

h - глубина внедрения образца, мм.

3.4.3 Определение разрушающего напряжения

Разрушающее напряжение медного и алюминиевого материала определяется на гидравлическом прессе ПГПР (рисунок 3.3). Для определения разрушающей нагрузки испытываемый образец закладываем в приспособление, которое устанавливается на рабочую плиту пресса. При подъёме поршня на колонки приспособления давит верхняя плита, и платформа начинает опускаться, а закрепленный образец вытягиваться. Манометр показывает возрастающее давление. В дальнейшем рост давления прекращается, на образце появляется шейка. Это указывает на свойство материала пластически деформироваться при не изменяющейся нагрузке. Перед разрывом образца показание манометра падает.

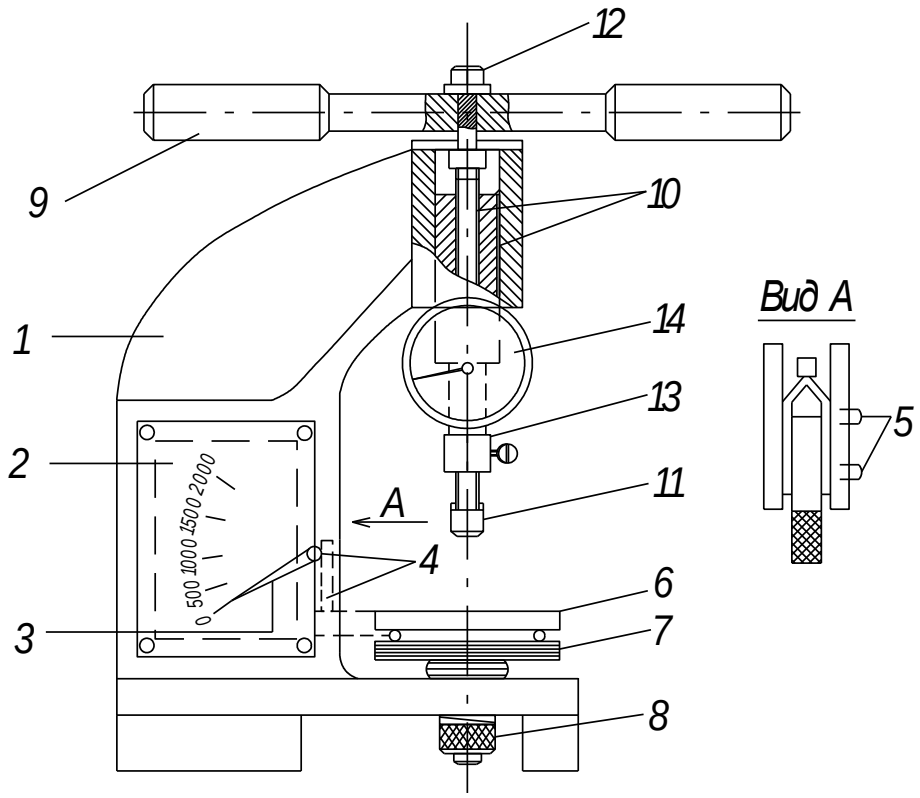


Рисунок 3.2 - Прибор для определения механических свойств материалов ПИМ: 1 – корпус; 2 – шкала; 3 – стрелка; 4 - реечная передача;
5 - винт для регулировки стрелки; 6 – стол; 7 - опорные пружины; 8 - гайка с накаткой; 9 – рукоятка; 10 - винтовая пара; 11- наконечник; 12 - соединительный винт; 13 – кронштейн; 14 - индикатор часового типа.

На рисунке 3.3 приведен общий вид гидравлического пресса.



Рисунок 3.3 – Общий вид гидравлического пресса

Разрушающее напряжение материала определяется отношением разрушающей нагрузки Р (Н) к площади первоначального поперечного сечения образца материала F_0 ($м^2$).

Разрушающее напряжение при растяжении, мПа, вычисляют по формуле:

$$\sigma_p = \frac{P}{F_0}, \text{ мПа.}$$

3.4.4 Испытание древесины на твердость

Определение твердости древесины производится на приборе ПИМ (рисунок 3.2) с помощью наконечника. Диаметр полусферы подобран так, что площадь отпечатка равна 1 $см^2$. По шкале прибора определяют величину нагрузки Р (Н) при получении площади отпечатка 1 $см^2$ Р. Твердость древесины вычисляют по формуле:

$$\text{Н}_\text{В} = \frac{\text{P}}{\text{F}}, \text{ мПа.}$$

Таблицы для записи опытных данных составляются студентами самостоятельно.

Содержание отчета

1) Краткое описание прочностных характеристик проводниковых материалов и методы их определения.

2) Расчетные данные твердости алюминиевой и свинцовой оболочки кабелей.

3) Расчетные данные разрушающего напряжения проводниковых материалов меди и алюминия.

4) Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Чем характеризуется механическая прочность при разрыве, растяжении, сжатии, статическом изгибе?

2. В чем отличие терминов: «разрушающая нагрузка», «разрушающее напряжение»?

3. Приведите примеры работы изделий из электротехнических материалов на растяжение, сжатие, статический изгиб.

4. Приведите формулы расчета разрушающего напряжения при испытании на растяжение, сжатие, статический изгиб.

Литература

1. Степанчук Г.В. Электротехнические материалы: конспект лекций по дисциплине "Материаловедение"./Г.В. Степанчук, П.В. Гуляев – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2009. – 114 с.
2. Материаловедение и технология металлов: Учебник / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др.; Под ред. Г.П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2005, – 862с. – 77 шт. (Механические испытания)

(назад)

Лабораторная работа №4.

ИЗУЧЕНИЕ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Цель работы Изучение проводниковых материалов и изделий. Исследование зависимости изменения сопротивления проводниковых материалов от температуры.

4.1 Теоретические сведения

Согласно /3/в настоящее время металлические проводящие материалы классифицируются по разным признакам:

1) По составу: чистые металлы и сплавы.

2) По значению проводимости: с большой проводимостью хорошо проводящие ток, пластичны, с малой проводимостью, материалы этой группы хрупкие по строению к ним относятся элементы V группы периодической системы Менделеева, часто эти материалы показывают полуметаллами.

3) По положению в периодической системе элементов Д.И. Менделеева

- щелочные (Na и другие);
- благородные (медь, серебро, золото);
- щелочноземельные (Ca, Ba, Ra);
- переходные и редкоземельные.

4) По особенностям строения электронных оболочек – нормальные и переходные.

Металлические проводники можно разделить на две группы: материалы с высокой проводимостью и материалы с высоким удельным сопротивлением.

В большинстве случаев зависимость удельного сопротивления металлов от температуры может быть определена по формуле

$$\rho_{t_2} = \rho_{t_1}(1 + d \cdot \Delta t)$$

где ρ_{t_2} - удельное сопротивление зри температуре t_2, Ом·м;

ρ_{t_1} - удельное сопротивление при температуре t_1, Ом·м;

α (T_{Kp}) - температурный коэффициент сопротивления;

Δt - повышение температуры $\Delta t = (t_2 - t_1)$.

Эти изменения объясняются передачей энергии направленно движущихся электронов узлам кристаллической решетки, т.к. при нагревании увеличивается скорость хаотического теплового движения электронов и узлов кристаллической решетки, затрудняющих направленное движение электронов.

Наименьшим удельным сопротивлением обладают чистые металлы. Любые примеси, металлические и неметаллические, повышают удельное сопротивление. Даже примесь металла, имеющего меньшее удельное сопротивление, чем основной, повышает его сопротивление. Это объясняется искажением кристаллической решетки основного металла даже небольшим количеством примеси.

Известно, что кристаллическая решетка металлов искажается не только от введения примесей. Искажают кристаллическую решетку и пластические, деформации металла при растяжении, сжатии и прочих механических воздействиях. В частности это имеет место при прокатке, волочении в процессе изготовлении провода. Для снятия искажения кристаллической решетки проводится соответствующая термическая обработка (отжиг).

Электрическая проводимость металлических проводников будет тем больше, чем больше плотность и скорость движения потока свободных электронов. В таблице 4.1 приводятся некоторые параметры чистых металлов.

Таблица 4.1 - Параметры чистых металлов

Параметры	Медь	Алюминий
Плотность при 20°С, кг/м^3	8940	2703
Температура плавления, °С	1083	657
Удельное сопротивление, 10^{-6}, Ом·м	0,01682	0,02828
Температурный коэффициент сопротивления, $\alpha\ (T_{кр})$ °С$^{-1}$	0,00411	0,00403

Металлы с малым удельным сопротивлением используются для изготовления обмоток электрических машин, аппаратов и приборов, проводов линий электропередач и других устройствах.

К таким материалам предъявляются следующие требования: возможно меньшее удельное сопротивление; возможно меньший температурный коэффициент сопротивления α. Например, для большинства обмоток электрических машин и аппаратов выгодно иметь возможно меньшее удельное сопротивление, даже если за счет его снижения несколько снизится и предел прочности при растяжении.

Наиболее широко применяемыми проводниковыми материалами с высокой проводимостью являются медь и алюминий.

Медь в нормальных атмосферных условиях довольно стойка против окисления, т.к. образующийся тонкий поверхностный слой окиси меди предохраняет медь от дальнейшего окисления в глубь. Значительную коррозию меди вызывает наличие в атмосфере аммиака, хлористых соединений. Медь хорошо сваривается и паяется

Изделия из электролитической меди могут быть твердыми, не отожженными после прокатки и волочения - марки МТ и мягкими, отожжёнными - марки ММ.

Мягкая медь применяется для всевозможных обмоточных проводов, фольги, кабельных изделий, шин распределительных устройств, токоведущих деталей приборов и аппаратов и т.д.

Из твердой меди изготавливают различные контактные соединения, провода, коллекторные пластины в электрических машинах постоянного тока, микромашинах.

Значения удельных сопротивлений мягкой и твердой меди зависит от размера сечений, которые приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Значения удельных сопротивлений медной проволоки различного диаметра при 20°С

Диаметр, мм	Удельное сопротивление, 10^{-6} Ом·м	
	Твёрдой меди	Мягкой меди
до 0,99	0,0180	0,01724
1,0…2,49	0,01778	0,01734
2,5 и более	0,0177	0,01724

Вторым по важности проводниковым материалом является алюминий.

По твердости различают две марки: алюминий твердый не отожжённый (АТ), алюминий мягкий отожженный (АМ).

При замене медных проводов на алюминиевые следует учитывать разницу в удельном сопротивлении, удельной массе.

В нормальных атмосферных условиях алюминий очень быстро окисляется, покрываясь тонким слоем окисла алюминия $A1_2O_3$, который хорошо предохраняет алюминий от дальнейшего окисления.

Благодаря высокой температуре плавления окисла алюминия (2000°С) и быстрому окислению свежей поверхности, пайка алюминиевых проводов обычными способами затруднена. Для пайки алюминиевых проводов в настоящее время применяются специальные ультразвуковые паяльники. Алюминий хорошо сваривается. Оксидная пленка вызывает известные трудности при соединении алюминиевых проводов с хорошим электрическим контактом.

Алюминий не отожженный применяется при изготовлении шин. Для воздушных линий электропередач чисто алюминиевые провода не применяются из-за малой механической прочности. Для проводов линий электропередач применяются специальные алюминиевые сплавы, обладающие повышенной механической прочностью при сравнительно большой проводимости, а также сталеалюминевые провода со стальным сердечником и алюминиевыми боковыми жилами.

К материалам с высоким удельным сопротивлением относятся:

- материалы для электронных приборов, для резисторов, для нагревательных элементов.

Материалы для резисторов кроме большого удельного сопротивления должны обладать высокой стабильностью, коррозийной стойкостью малым температурным коэффициентом удельного сопротивления и малой термо – ЭДС относительно меди. К материалам этой группы относятся кремневые резисторные сплавы марки РС содержащие такие компоненты как кремний, хром, никель, железо, медно-никелевые сплавы типа манганин, константан.

К материалам для нагревательных приборов предъявляются такие требования как постоянство параметров при высоких температурах. К ним относятся сплавы на основе железа никеля, хрома и алюминия.

К материалам для электронных приборов относятся вольфрам (для вакуумных и газонаполненных приборов); молибден (для деталей приборов работающих при повышенной температуре); сплавы вольфрам – молибден (для деталей с рабочей температурой не более 1500^0С) и др.

4.2 Проводниковые изделия

Проводниковые изделия весьма многообразны. Большую группу проводниковых изделий составляют обмоточные провода.

По виду изоляции обмоточные провода можно разделить на следующие группы: с эмалевой, эмалево-волокнистой, с волокнистой, с пленочной и оксидной изоляцией.

Общий диапазон диаметров проводов с эмалевой изоляцией 0,02...2,5 мм, размеров проводов прямоугольного сечения 1,05×15,46 мм^2, 5,4×38 мм^2. В таблице 4.3 приведены основные характеристики проводниковых материалов с эмалевой изоляцией.

Таблица 4.3 – Характеристика обмоточных проводов с эмалевой изоляцией

Марка	Диаметр жилы без изоляции, мм	Нагревостойкость, °С	Общая характеристика
1	2	3	4
ПЭЛ	0,02-1,5	105	Провод медный, основа эмали лак на тунговом или льняном масле.
ПЭВ-1	0,02-2,5	105	Провод медный изолированный эмалью на основе лака ВЛ-931 (Винифлекс).
ПЭМ-1	0,02-2,12	105	Провод медный изолированный эмалью на основе лака ВЛ-941 (Метальвин).
ПЭВАт	0,08-2,44	105	Провод алюминиевый изолированный эмалью на основе высокопрочного лака ВЛ-93I (Винифлекс). Провод выполнен из не отожженного алюминия.
ПЭВА	0,08-2,44	105	Тоже, но провод выполнен из отожженной проволоки.
ПЭВТЛ-1	0,02-1,6	120	Провод медный, эмаль на основе полиуретанового лака, лудящийся.
ПЭТВ		130	Провод медный изолированный эмалью на основе полиэтилентерефталата
ПЭТ-155	0,06-2,5	155	Провод медный изолированный эмалью на основе полиэфирамидного лака
ПЭТ-200	0,05-2,5	200	Провод медный изолированный эмалью на полиамидной основе.
ПЭКМ	0,1-1,0	105	Провод из мягкой костантановой проволоки. Эмаль на масляной основе.

Провода марки ПЭЛ, ПЭЛУ (утолщенной изоляция) дешевле других, но имеют ограниченное применение из-за недостатков свойств эмали, которая имеет сравнительно низкую механическую прочность. Для механической защиты их изоляции поверх эмали накладывают защитный слой пряжи из органических волокон, что приводит к нежелательному увеличению изоляции.

Провода марки ПЭВ, ПЭМ имеют высокопрочную эмаль, но при использовании этих проводов для обмоток электрических машин и аппаратов

следует иметь в виду, что винифлекс и метальвин термопластичны. Поэтому при большой частоте вращения и высокой температуре, благодаря центробежным усилиям, возможно продавливание изоляции, приводящее к межвитковым коротким замыканиям.

Полиуретановая эмаль проводов парки ПЭВТЛ чувствительна к тепловому удару - она склонна к растрескиванию, если в растянутом состоянии её подвергать резким изменениям температуры.

Эмаль проводов марки ПЭТВ чувствительна к тепловому удару, поэтому при их применении следует избегать резких изгибов, сильных натяжений при намотке. Однако благодаря хорошим электрическим и механическим свойствами эмали провода марки ПЭТВ наши широкое применение.

В таблицах 4.4, 4.5, 4.6 приводятся данные некоторых проводниковых изделий с различными видами изоляции.

Таблица 4.4 - Обмоточные провода с эмалево-волокнистой изоляцией

Марка	Диаметр провода без изоляции, мм	Нагревостойкость, ^{0}C	Общая характеристка
ПЭЛБО	0,38 – 2,1	105	Провод медный изолированный эмалью на масляно-смольной основе с одним слоем из хлопчатобумажной пряжи.
ПЭВБД	0,69 – 2,1	105	Провод медный изолированный эмалью на основе поливинилцеталей (винифлекс) и двумя слоями х/б пряжи.
ПЭТ-КСОТ	0,33 – 1,56	180	Провод медный изолированный слоем кремнийорганической эмали с однослойной обмоткой из утонченного стекловолокна с пропиткой органическим лаком.

Таблица 4.5 - Обмоточные провода с пленочной изоляцией

Марка	Диаметр провода без изоляции, мм	Нагревостойкость, ^{0}C	Общая характеристика
ПЭТВПДЛ	1,74 - 2,83	120	Провод, изолированный теплостойкой высокопрочной эмалью на основе полиэтиле-нтерефталата и тремя лентами лавсановой пленки и двумя слоями обмотки из лавсановых нитей с подклейкой лаком.
ППФИ	1,68 - 3,05	180	Провод изолированный лентами из фторопласта -4 и полимидноторопластовой пленки с запечкой токами высокой частоты.

Таблица 4.6- Провод с волокнистой изоляцией

Марка	Диаметр провода без изоляции, мм	Нагревостойкость, ^{0}C	Общая характеристика
ПБО (АПБО) ПБД, ПШД, ПКД, ПЛД	1,2 - 5,2	105	Провод медный (алюминиевый) изолированный одним или двумя слоями из хлопчатобумажной (шелковой, капроновой или лавсановой) пряжей. Выпускаются прямоугольного и круглого сечения.
ПСД	0,31 - 5,2	155	Провод изолированный двухслойной обмоткой из стекловолокна с пропиткой и подклейкой каждого слоя нагревостойким лаком.
ПСДЛ	0,31 - 5,2	155	Тоже, но с дополнительной лакировкой поверхности провода нагревостойким лаком.
ПСДКТ	0,31 - 2,1	180	Провод изолированный двухслойной обмоткой из уточненного стекловолокна с пропиткой и клейкой каждого слоя кремнийорганическим лаком.

4.3 Программа работы

4.3.1 Изучить проводниковые материалы.

4.3.2 Изучить проводниковые изделия.

4.3.3.Снять зависимость изменения сопротивления проводниковых материалов (меди, константана, нихрома) от температуры.

4.3.4 Рассчитать удельное сопротивление.

4.3.5 Построить зависимость удельного сопротивления материалов от температуры.

4.3.6 Рассчитать температурный коэффициент сопротивления.

4.4 Техника безопасности

4.3.1 Не включать электрические установки без разрешения преподавателя.

4.3.2 Замену испытуемых образцов в измерительных камерах выполнять только в обесточенном состоянии прибора.

4.3.3. При выемки испытуемых образцов из измерительных камер следует учитывать высокую температуру их нагрева.

4.3.4. Проведение испытаний выполнять звеном не менее 2-х человек.

4.3.5. По окончании испытания все установки должны быть обесточены.

.

4.5 Приборы и оборудование

Для исследования зависимости сопротивления металлического проводника с изменением температуры используются образцы медной, нихромовой и константановой круглой проволоки различного диаметра. Прибор – измеритель электропроводности ИЭП-1 (рисунок 4.1) для изменения омического сопротивления и температуры.

4.6 Порядок выполнения работы

4.6.1 Образец с проводниковыми материалами помещается в измерительную камеру. Кнопкой «сеть» прибор включается в работу.

Измерение необходимо проводить: по каналу 1 для левого образца и по каналу 2 для правого образца. На индикаторе находящемся верхнем левом углу высветится измеренное значение параметра (сопротивления). Если измеренное значение меньше измеряемого диапазона, то на индикаторе высветится символ **L**, в этом случае необходимо нажать кнопку " – ". Если измеренное значение больше измеряемого диапазона, то на индикаторе высветится символ **H**, в этом случае необходимо нажать кнопку " + ".

Для снятия зависимости изменения параметра от температуры, необходимо выставить заданную температуру при помощи кнопок " + "и " – " на панели температура. Однократное нажатие любой из этих кнопок показывает заданное значение температуры, двойное нажатие кнопок приводит к изменению заданного значения с шагом 5^0C. Индикатор температуры в правом верхнем углу показывает текущее значение температуры.

4.6.2 Измерение сопротивлений первого и второго образцов проводить через 10÷15°C до температуры 90°C, результаты измерений занести в таблицу 4.7.

4.6.3 Построить графики зависимости.

4.6.4. Определить сопротивление материалов при 0°C, графически.

4.6.5 Сравнить полученные значения удельных сопротивлений с табличными.

Таблица 4.7 – Сводные данные расчета удельного сопротивления

№№ п/п	Материал	Сечение образца	Длина образца	t	$R_{изм}$	Удельное сопротивление	Температурный коэффициент сопротивления
1	медь	$мм^2$	м	°C	Ом	Ом·м	α_ρ
				20			
				30			
				40			
				50			
				…			
				90			



Рисунок 4.1 – Внешний вид измерителя электропроводности ИЭП-1

Температурный коэффициент сопротивления рассчитывается по формуле:

$$\alpha(TK_{\rho}) = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta t},$$

где ΔR - разность сопротивлений, $\Delta R = R_2 - R_1$;

R_2 - сопротивление проводника, Ом при температуре t_2, °С;

R_1 - сопротивление проводника при начальной температуре t_1, Ом;

Δt - разность температур t_1, t_2.

Удельное сопротивление проводника определяется по формуле:

$$\rho_{t_2} = \rho_{t_1} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t),$$

где Δt - повышение температуры;

ρ_t - удельное сопротивление при температуре t_2, Ом·м;

ρ_{t_1} - удельное сопротивление при температуре t_1, Ом·м.

Содержание отчета

В отчете должны быть приведены:

1) Краткое содержание теоретических сведений по проводниковым материалам и изделиям.

2) Данные измерений и расчетов параметров.

3) Графики зависимостей $\rho = f_1(t)$, $R_2 = f_2(t)$.

4) Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1. Классификация проводниковых материалов по удельной проводимости.
2. От каких факторов зависит удельная электрическая проводимость металлических проводников?
3. Как влияет повышение температуры на электрическое соротивление проводников 1-го рода?
4. Назвать 4-е металла с наименьшим удельным электрическим сопротивлением в порядке его возрастания.
5. Как влияют примеси на удельную электрическую проводимость металлических проводников?
6. Чем обусловлен и каким образом происходит перенос электрических зарядов в проводниках первого и второго рода?
7. Какой металл является электротехническим стандартом?
8. Где используются материалы высокого сопротивления?
9. Что характеризует температурный коэффициент удельного электрического сопротивления?
10. Как рассчитывается температурный коэффициент удельного электрического сопротивления?
11. Какие особые требования и по какой причине предъявляются для реостатов и резисторов?
12. Перечислите особенности соединения и присоединения алюминиевых проводов и поясните причины их определяющие?

Литература

1.Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов – М.: Высшая школа, 2007. – 538с.

2.Степанчук Г.В. Электротехнические материалы: конспект лекций по дисциплине "Материаловедение"./Г.В. Степанчук, П.В. Гуляев – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2009. – 114 с.

3.Журавлева Л.В. Электроматериаловедение / Л.В. Журавлева. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. - 312с.

4.Электротехнические и конструкционные материалы / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюнин, и др.; под ред. В.А. Филикова. – М.: Издательский центр «Академия», 2007, - 280с.

5.Электротехнический справочник: В 4 т. Т.1 Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. В.Г. Герасимова, А.Ф.Дьякова, Н.Ф. Ильинского и др. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 440с.

(назад)

Лабораторная работа № 5.

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: Изучение электрических характеристик - электропроводимости, сопротивление изоляции электроизоляционных материалов.

5.1 Теоретические сведения

Изоляционные материалы предназначены для изоляции двух токоведущих частей друг от друга находящихся под различным напряжением, т.е. по своему назначению электроизоляционные материалы не должны пропускать электрический ток. Однако "идеальных" изоляторов не существует, и все практически применяемые электроизоляционные материалы при приложении напряжения все же пропускают некоторый, обычно весьма незначительный ток.

Ток, проходящий через участок изоляции при установившемся процессе электропроводности, называется сквозным током утечки. Таким образом, проводимость любого участка изоляции не равна нулю, а имеет конечное значение, и сопротивление изоляции не бесконечно велико, а конечно.

Проводимость изоляции $G_{из}$ (См), как и проводимость любого проводящего тела, определяется отношением сквозного тока утечки через изоляцию $I_у$ (А) к приложенному к изоляции постоянному напряжению U, (В):

$$G_{из} = \frac{I_у}{U}.$$

Сопротивление изоляции $R_{из}$ - величина обратная величине проводимости:

$$R_{из} = \frac{1}{G_{из}} = \frac{U}{I_у}.$$

Для твердых электроизоляционных материалов различают объемную и поверхностную проводимости. Объемная проводимость G_v, численно характеризует проводимость через толщину изоляции, поверхностная прово-

димость изоляции G_s, характеризует наличие слоя повышенной электропроводности на поверхности раздела твердой изоляции с газообразной или жидкой средой, который создается вследствие неизбежных загрязнений, увлажнении и т.п. Соответственно вводится понятия объемного (I_v) и поверхностного (I_s) токов утечки, а так же объемного (R_v) и поверхностного (R_s) сопротивления изоляции. На рисунке 5.1 показаны токи через участок изоляции.

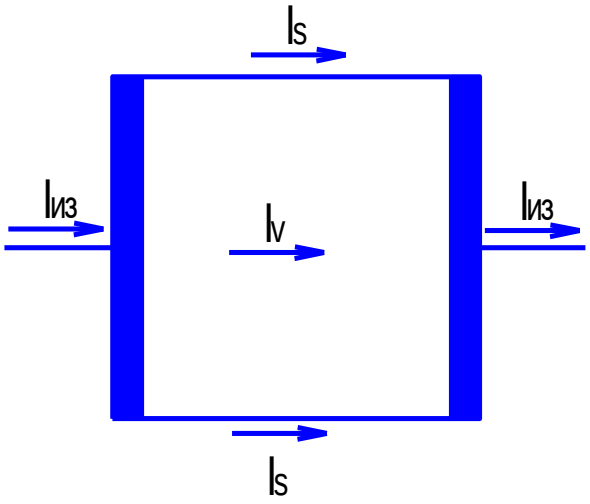


Рисунок 5.1 - Объёмный и поверхностный токи утечки через участок изоляции

Сопротивления R_v и R_s включены параллельно друг другу между электродами, через которые подается напряжение на изоляцию. Таким образом, получаем:

$$I_v = \frac{U}{R_v} = U \cdot G_V ,$$

$$I_s = \frac{U}{R_s} = U \cdot G_S ,$$

$$I_{из} = I_v + I_s ,$$

$$G_{из} = \frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_s} .$$

На практике пользуются понятием удельных, объемных и поверхностных сопротивлений ρ_v и ρ_s.

Объемное сопротивление R_v, Ом для простейшей конфигурации участка изоляции с постоянным поперечным сечением S ($м^2$) и толщиной h (м) рассчитывается по формуле

$$R_v = \rho_v \cdot \frac{h}{S}, \text{ Ом.}$$

Отсюда удельное объемное сопротивление ρ_v, Ом равно

$$\rho_v = R_v \cdot \frac{S}{h}, \text{ Ом·м.}$$

Удельное поверхностное сопротивление определяется методом двух электродов рисунок 5.2, прибором Е6-13А или прибором ИЭП-1. При измерении методом двух электродов ρ_s, равно:

$$\rho_s = R_s \cdot \frac{b}{a}, \text{ Ом,}$$

где R_s - поверхностное сопротивление между двумя электродами с параллельными прямыми кромками длиной b (м), находящийся на расстоянии a (м) друг от друга (рисунок 5.2).

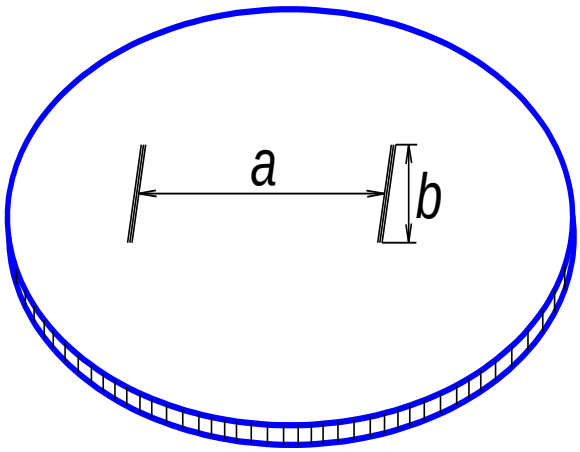


Рисунок 5.2 – К определению поверхностного сопротивления слоя между двумя электродами

Удельные сопротивления ρ_v и ρ_s зависят от температуры и влажности изоляции. На рисунках 5.3 и 5.4 показаны зависимости ρ_v от температуры и ρ_s от влажности для некоторых материалов.

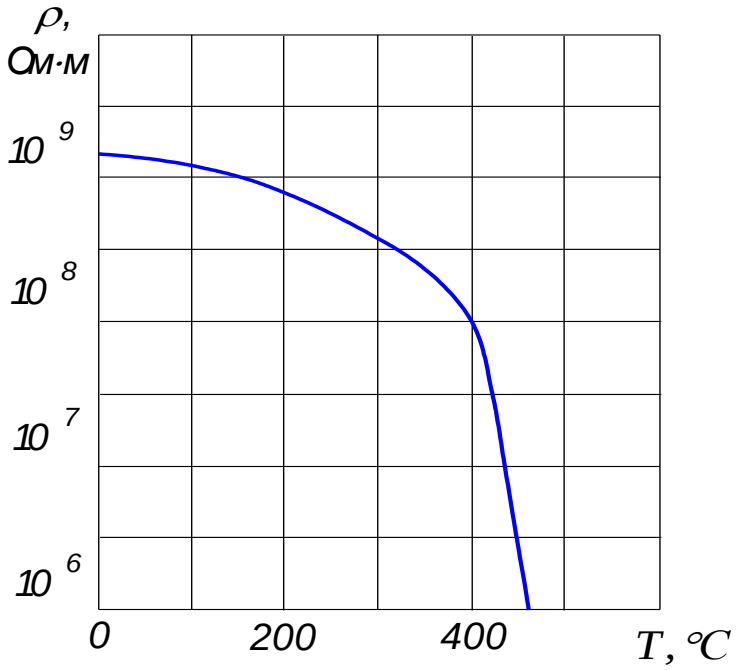


Рисунок 5.3 - Зависимость ρ_v от температуры для стеклоэмали

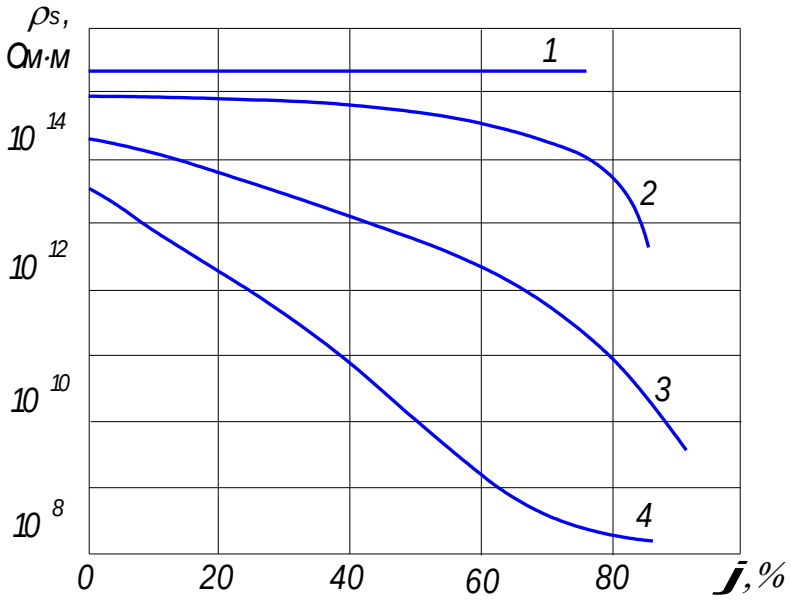


Рисунок 5.4 – Зависимость ρ_s от относительной влажности воздуха

1- парафин; 2 – янтарь; 3 – шеллак; 4 – глазурованный фарфор.

Значения ρ_v для твердых и жидких электроизоляционных материалов лежат в пределах 10^6...10^8 Ом·м для низкокачественных материалов (древесина, мрамор, асбест). 10^{14}...10^{17} Ом·м (полистирол, полиэтилен, фторопласт-4), 10^{22}...10^{23} Ом·м для неионизированных газов.

Плотность тока проводимости **J** (А/м^2) для электрической изоляции равна:

$$J = \frac{E}{\rho_v},$$

где E - напряженность электрического поля, В/м.

Удельное объемное сопротивление слоя изоляции $\rho_\perp$ постоянной толщины h (м) и площадью S (м^2) определяется из формулы:

$$\rho_\perp = R_\perp \cdot S,$$

где $R_\perp$ - поперечное сопротивление слоя изоляции постоянной толщины, которое в свою очередь определяется из выражения:

$$R_\perp = \rho_v \cdot \frac{h}{S}.$$

Удельное объемное сопротивление изоляции кабеля ρ_{vk}, Ом·м длиной *l*, м определяется по формуле:

$$\rho_{vk} = R_{kv} \cdot l,$$

где R_{kv} - объемное сопротивление изоляции кабеля R_{kv}, Ом длиной *l*, м определяется по формуле:

$$R_к = \frac{\rho_v}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \cdot \frac{r_2}{r_1},$$

где r_1 - радиус внутреннего электрода или радиус токопроводящей жилы;

r_2 - радиус внешнего электрода;

ρ_v - удельное объемное сопротивление изоляции кабеля, Ом·м

В приложении 5.А приведены характеристики твердой изоляции с указанием удельного объёмного сопротивления изоляции.

В приложении 5.Б приведена классификация материалов по нагревостойкости.

5.2 Программа работы

5.2.1 Ознакомиться с изоляционными материалами представленными на стенде.

5.2.2 Измерить объёмные и поверхностные сопротивления некоторых изоляционных материалов.

5.2.3 Рассчитать удельные сопротивления изоляций.

5.2.4 Сделать выводы.

5.3 Техника безопасности

5.3.1 Не включать электрические установки без разрешения преподавателя.

5.3.2 Замену испытуемых образцов в измерительных камерах выполнять только в обесточенном состоянии прибора.

5.3.3. При выемки испытуемых образцов из измерительных камер следует учитывать высокую температуру их нагрева.

5.3.4. Проведение испытаний выполнять звеном не менее 2-х человек.

5.3.5. По окончании испытания все установки должны быть обесточены.

.

5.4 Приборы и оборудование

Для определения удельного объемного и удельного поверхностного сопротивлений образцов изоляционного материала используется измеритель электропроводности ИЭП - 1. Образцы материала должны быть больше диаметра измеряемого электрода. Согласно ГОСТ6433.2-71 предусматриваются стандартные размеры электродов в зависимости от размеров образца испытуемого материала составляет: диаметр электрода высокого потенциала 7,5 см, ширина охранного электрода не менее 1 см.

5.5 Порядок выполнения работы

5.5.1 Образец с диэлектрическим материалом помещается в измерительную камеру. Кнопкой «сеть» прибор включается в работу (рисунок 5.5).

Измерение необходимо проводить: по каналу 1 для определения поверхностного сопротивления изоляции и по каналу 2 для определения объёмного сопротивления изоляции. На индикаторе находящемся верхнем левом углу высветится измеренное значение параметра (сопротивления изоляции). Если измеренное значение меньше измеряемого диапазона, то на индикаторе высветится символ **L**, в этом случае необходимо нажать кнопку “ – “. Если измеренное значение больше измеряемого диапазона, то на индикаторе высветится символ **H**, в этом случае необходимо нажать кнопку “ + “.

Для снятия зависимости изменения параметра от температуры, необходимо выставить заданную температуру при помощи кнопок “ + “и “ – “ на панели температура. Однократное нажатие любой из этих кнопок показывает заданное значение температуры, двойное нажатие кнопок приводит к изменению заданного значения с шагом 5^0C. Индикатор температуры в правом верхнем углу показывает текущее значение температуры.

5.5.2 Измерение сопротивлений первого и второго каналов проводить через 10÷15°C до температуры 90°C, результаты измерений занести в таблицу 5.1.

5.5.3 По измеренному значению R_v рассчитать удельное объемное сопротивление изоляции по формуле:

$$\rho_v = R_v \cdot \frac{S}{h}, \text{ Ом·м},$$

где S - площадь электрода, $см^2$;

h - толщина испытываемого образца, см.

По измеренному значению R_s для электродов с круглыми кромками рассчитать удельное поверхностное сопротивление изоляции по формуле:

$$\rho_s = R_s \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\ln \cdot \frac{d_2}{d_1}},$$

где d_1 - диаметр измерительного электрода, см;

d_2 - диаметр охранного кольца, см.

Результаты опытов и расчётов занести в таблицу 5.1.



Рисунок 5.5 – Внешний вид измерителя электропроводности ИЭП -1

Таблица 5.1 - Данные испытаний изоляции материалов

Испытывае-мый материал	d_1	d_2	h	S	R_v	R_s	t	ρ_v	ρ_s
	см	см	см	$см^2$	Ом	Ом	^0C	$\frac{Ом \cdot мм^2}{м}$	$\frac{Ом \cdot мм^2}{м}$
							20		
							30		
							40		
							…		
							90		

Содержание отчёта

1) Краткие теоретические сведения.

2) Классифицировать изоляционные материалы, представленные на стенде по классам нагревостойкости.

3) Привести примеры изоляционных конструкций пазовой изоляции асинхронных двигателей серии 4А мощностью до 100 кВт (класс нагревостойкости задается преподавателем).

4) Привести данные испытаний и расчетов.

5) Построить графики зависимостей $\rho_V=f(t)$ и $\rho_S=f(t)$.

6) Сделать краткие выводы.

Контрольные вопросы

1) Классификация электротехнических материалов.

2) Как и по какому признаку подразделяются электротехнические материалы?

3) Назовите группы изоляционных материалов.

4) Какими электрическими характеристиками оцениваются электроизоляционные материалы?

5) Как подразделяются электроизоляционные материалы по нагревостойкости?

Литература

1. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов – М.: Высшая школа, 2007. – 538с.

2. Степанчук Г.В. Электротехнические материалы: конспект лекций по дисциплине "Материаловедение"./Г.В. Степанчук, П.В. Гуляев – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2009. – 114 с.

3. Журавлева Л.В. Электроматериаловедение / Л.В. Журавлева. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. - 312с.

4. Электротехнические и конструкционные материалы / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюнин, и др.; под ред. В.А. Филикова. – М.: Издательский центр «Академия», 2007, - 280с.

5. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т.1 / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986, – 368 с.

6. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т.2/ Под ред. Ю.В. Корицкого и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987, – 464 с.

7. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.1 Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. В.Г. Герасимова, А.Ф.Дьякова, Н.Ф. Ильинского и др. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 440с.

8. Материалы электроизоляционные. Технический справочник: В 5 т. Т.1 Лакоткани электроизоляционные, трубки электроизоляционные гибкие / В.Д. Григорьева, Г.П. Корнеева. – М.: АО «Стандартэлектро», 1992, – 121с.

9. Материалы электроизоляционные. Технический справочник: В 5 т. Т.2 Материалы электроизоляционные слюдосодержащие, пленкосодержащие и бумаги слюдяные / В.Д. Григорьева, Л.П. Исаева. – М.: АО «Стандартэлектро», 1992, – 128с.

10. Материалы электроизоляционные. Технический справочник: В 5 т. Т.3 Материалы электроизоляционные слоистые листовые и намотанные, фольгированные и стеклопластики профильные электроизоляционные / Л.П. Исаева, И.И. Котова, Е.В. Раскатова. – М.: АО «Стандартэлектро», 1992, – 294с.

11. Материалы электроизоляционные. Лаки, эмали, компаунды, смолы. Технический справочник: В 5 т. Т.4 / В.Д. Григорьева, Г.П. Корнеева, Л.П. Исаева.– М.: АО «Стандартэлектро», 1992, – 118с.

12. Материалы и изделия электроизоляционные. Технический справочник: В 5 т. Т.5 – М.: АО «Стандартэлектро», 1992, – 104с.

13. Технический справочник. Перспективные электроизоляционные материалы для техники новых поколений / Е.Б. Щедрина, И.Д. Вайсфельд – М.: АО «Стандартэлектро», 1992, – 50с.

14. Казарновский Д.М. Испытание электроизоляционных материалов и изделий. Учебник / Д.М. Казарновский, Б.М. Тареев – Л.: Энергия, 1980. – 216с.

15. Практикум по технологии монтажа и ремонта электрооборудования / П.Д. Ирха, В.А. Буторин, В.Д. Девяткин и др.; Под ред. А.А. Пястолова. – М.: Агропромиздат, 1990, - 160с.

16. Тареев Б.М. Оксидная изоляция / Б.М Тареев, М.М. Лернер – М.: Энергия, 1975, – 208с.

17. Яманов С.А. Старение, стойкость и надежность электрической изоляции / С.А. Яманов, Л.В. Яманова – М.: Энергоатомиздат, 1990, - 176с.

1) ЛАКОТКАНЬ БИТУМНО - МАСЛЯННАЯ ХЛОПЧАТО - БУМАЖНАЯ, толщина 0,2 мм, тип ЛХБ-105, влагостойкая $\rho_v = 10^{12}$ Ом·м, tgδ = 0,035 при t = 20°С, f = 50 Гц.



2) СТЕКЛОЛАКОТКАНЬ ЛКС-7 на КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКОМ ЛАКЕ толщина 0,11÷0,15; $\rho_v = 10^{15}…10^{17}$ Ом·м; $U_{пр}$ = 23...58 кВ/мм.



3) ЛАКОТКАНЬ МАСЛОСТОЙКАЯ ХЛОПЧАТОБУМАЖНАЯ толщина 0,24 мм, марка ЛХМ-105, $\rho_v = 3 \cdot 10^{12}$ Ом·м, tgδ = 0,I68, ε_r =4,1, применяется в качестве пазовой изоляции.



4) СТЕКЛОЛАКОТКАНЬ БИТУМНО - МАСЛЯННАЯ АЛКИДНАЯ

толщина 0,23 мм, тип ЛСБ - 105, $\rho_v = 2 \cdot 10^{12}$ Ом·м, $tg\delta = 0,019$, $\varepsilon_r = 3,2$ применяется в качестве пазовой изоляции.

5) СТЕКЛОТЕКСТОЛИТ - стекло, лак на полиэфирных основах применяется при температурах до I80°C, $\rho_s = 10^{13} \ldots 10^{14}$ Ом·м, $\rho_v = 10^{6} \ldots 10^{8}$ Ом·м, $\varepsilon_r = 1,5 \ldots 3,0$, $U_{пр} = 8...10$ кВ, $tg\delta = 0,001 \ldots 0,047$.



6) РЕЗИНА МАСЛОСТОЙКАЯ

Толщина 2 мм, применяется для изготовления прокладок под крышки масляных трансформаторов.



7) КАРТОН ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЙ

Толщина 0,17 мм, марки ЭВП.

Толщиной 0,1…0,5 мм рулонный, проклеенный канифольным клеем.

Применяется в качестве пазовой изоляции, $U_{пр} = 12...11$ кВ.

Состав: тряпичное волокно 25%, целлюлозы сульфат 75%.



8) ПЛЁНКОЭЛЕКТРОКАРТОН

0,32 мм, электрокартон типа ЭВП - 0,2 мм, пленка ПТФЭ- 0,1 мм, $\varepsilon_r = 2…2.1$, $tg\delta = 1,3$, $\rho_v = 10^{17}$ Ом·м, для пазовой изоляции.



9) СТЕКЛОЛАКОТКАНЬ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКАЯ ПИГМЕНТИРОВАННАЯ

Марки ЛСК - 0,15 мм, (0,12÷0,2) мм, $\rho_v = 10^{12}$ Ом·м, $tg\delta = 0,015$, $\varepsilon_r = 3,2$ при 20°С, f = 50 Гц, $t_{раб.} = I80°C$.



10) СТЕКЛОЛАКОТКАНЬ ПОЛИЭФИРЭПОКСИДНАЯ марки ЛСП-130/155

Толщиной 0,15 мм (0,12...0,24) мм, $\rho_v = 10^{10}$ Ом·м, $tg\delta = 0,44$, $\varepsilon_r = 4$ применяется в масляных трансформаторах.

11) ЛАКОТКАНЬ-2, на батистовой основе,

(светлые маслянные лаки, тип ЛХП-105), $\rho_v = 1,2 \cdot 10^{13}$ Ом·м, $tg\delta = 0,175…0,192$, $\varepsilon_r = 4,1…4,5$.

12) ЛАКОТКАНЬ НА. ШЕЛКОВОЙ ОСНОВЕ марки ЛШМ-105.

Толщина - 0,06 мм, $\rho_v = 4 \cdot 10^{11}…4 \cdot 10^{13}$ Ом·м, $tg\delta = 0,05…0,082$, $\varepsilon_r = 4,1…4,5$.

13) БУМАГА ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ

Толщина – 0,01...0,095 мм, $E_{пр.}$ = (16÷39) кВ/мм.

14) БУМАГА КОНДЕНСАТОРНАЯ

Толщина - 0,013 мм, выпускается 0,04...0,13 мм; применяется 0,15 мм для силовых конденсаторов; 0,022...0,03 мм для малогабаритных трансформаторов.

15) ТОНКИЙ ЭЛЕКТРОКАРТОН

Применяется для пазовой изоляции электрических машин, межслоевой изоляции обмоток трансформаторов, толщиной 0,05÷0,07 мм, $E_{пр.}$ = 8 кВ/мм.

16) ЭЛЕКТРОКАРТОН

Толщина - 1 мм, $E_{пр.}$ = 11÷13 кВ/мм, предел прочности при растяжении в продольном направлении 12 кг/мм^2, в поперечном направлении - 3,5 кг/мм^2. Применение - каркасы катушек в электрических машинах низкого напряжения с последующей пропиткой.



17) ТКАНЬ БАКЕЛИЗИРОВАННАЯ ХЛОПЧАТОБУМАЖНАЯ

Толщина - 0,5 мм, применяется в электромашино-аппаратостроении; основа - бязь марок Т-1 и Т-2. и бакелизированная смола марок ОФ и ОФДК - содержание 51-57%.



18) ИЗОЛЕНТА

Выпускается в роликах по 30; 50; 60; 75 мм и толщиной 0,6 - 0,8 - 1 мм. Предел прочности 10 Н на I мм ширины ленты. Нагревостойкость смоляной ленты 40°С. Средняя электрическая прочность 1,5 мВ/м, 2,5 мВ/м и 0,6 мВ/м.



19) МИКАНИТ 2 СЛЮДА ПРОПИТАННАЯ ШЕЛЛАКОМ

Твердый гибкий листовой электроизоляционный материал используется для каркасов катушек обмоток возбуждения машин постоянного тока, коллекторные манжеты и др. изоляционные изделия $\rho_v = 10^{12}…10^{14}$ Ом·м, $E_{пр.}$ =15÷24 кВ/мм. Гибкая изоляция обмоток электрических машин.



21) ЛАКОТКАНЬ КРЕМНИЙОРГАНИЧЕСКАЯ ПИГМЕНТИРОВАННАЯ

Марки ЛКК-0,15 мм.

22) АСБЕСТОВОЕ ПОЛОТНО

Толщина 2 мм, $\rho_v = 10^{10}…10^{11}$ Ом·м, $E_{пр.} = (3…4)$ кВ/мм.



23) ТЕКСТОЛИТ

Наполнитель - ткань хлопчатобумажная. Применяется на низкое напряжение промышленной и высокой частоты, а также для работ на воздухе и в трансформаторном масле имеет повышенные электрические характеристики, механическая прочность. $\rho_v = 10^{10}…10^{12}$ Ом·м, $\rho_s = 10^{8}…10^{10}$ Ом·м, $\varepsilon_r = 4$, $tg\delta = 0,07$.



24) ЭБОНИТ

Применяется для изоляции материалов в приборах. Удельный вес 1,15...1,25 г/см^3, растяжение 300 - 500 кГ/см, $\rho_v = 10^{14}…10^{16}$ $\frac{Ом \cdot м^2}{м}$, $\varepsilon_r = 3…3,5$, $tg\delta = 0,005…0,016$, $E_{пр.}$ =15...20 кВ/мм.



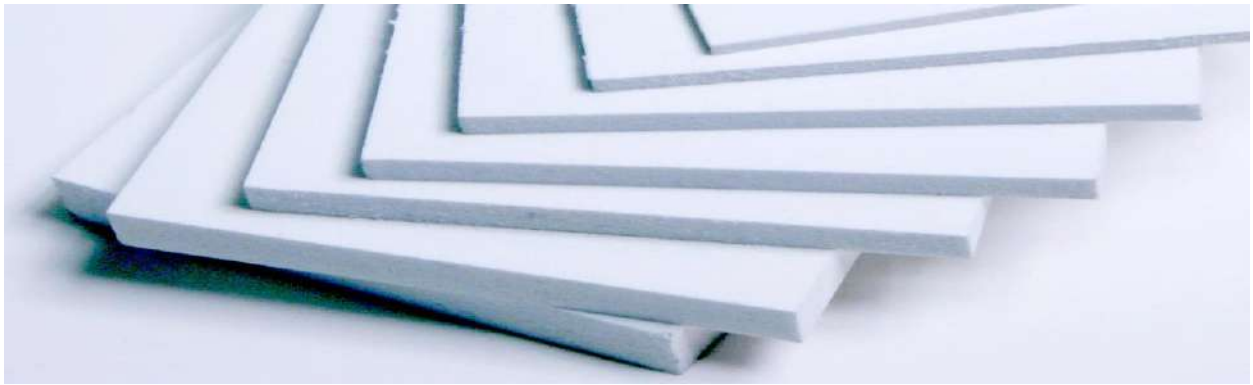
25) ГЕТИНАКС

Повышенная механическая прочность. Применяется в электрических машинах, аппаратах, распределительных устройствах, для работы на воздухе, в трансформаторной масле.



26) ПОЛИХЛОРВИНИЛ

Марки ПХВ, при ударном изгибе не ломается, удельный вес γ = 1,2...1,36 г/см^3, $\rho_v = 10^{15}…10^{17}$ Ом·м, ε_r = 3,6…4,0, tgδ = 0,01…0,05, $E_{пр.}$ =15...20 кВ/мм. Применяется для изоляции, а также для защитных оболочек, изолирующих штанг, трубок.



27) ПОЛИЭТИЛЕНОВАЯ ТРУБКА

Температура размягчения - 150...I70°C, $\rho_v = 10^{18}…10^{19}$ Ом·м, ε_r = 2…2,2, tg$\delta = (3…5)\cdot10^{-4}$, $E_{пр.}$ = 50...70 кВ/мм. Изоляция защитных оболочек проводов, обладает гибкостью, стойкостью к воде и к растворителям.



28) ТРУБКА - ЛАКОТКАНЕВАЯ ОСНОВА, ПРОПИТАННАЯ НЕОРГАНИЧЕСКИМ ЛАКОМ

$\rho_v = 10^{16}…10^{17}$ Ом·м, $E_{пр.} = 50...60$ кВ/мм.



29) ТРУБКА С ПРОПИТКОЙ БАКЕЛИТОВЫМ ЛАКОМ БТ-99

$\rho_v = 10^{16}…10^{17}$ Ом·м, $E_{пр.} = 50...60$ кВ/мм.



30) ЭЛЕКТРОНИТ.

Гибкий листовой материал изготовляемый из синтетического каучука и асбестового волокна. Применяется в качестве подбандажной изоляции, пазовой изоляции в машинах до 500 В нормального и морского исполнения.

$\rho_v = 10^{11}…10^{13}$ Ом·м, $E_{пр.}$ = (7…8) кВ/мм.



31) ЛИПКАЯ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННАЯ ЛЕНТА

Выпускается в роликах шириной 10, 15, 20, 25 мм. Применяется для. изоляции проводов и обмоток длительно работающих при температуре 180°С, tgδ = 0,02…0,06.



Приложение 5Б

Классификация нагревостойкости электроизоляционных материалов (по ГОСТ 8865-93)

Класс нагревостойкости	Температура	Характеристика основных групп электроизоляционных материалов соответствующих данному классу нагревостойкости
1	2	3
Y	90	Не пропитанные и не погруженные в жидкий диэлектрик материалы, волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка, шелка, а также соответствующие данному классу другие сочетания материалов. (Смотри приложение 5А).
A	105	Пропитанные и погруженные в жидкий электроизоляционный материал из целлюлозы, хлопка, шелка, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов. (Смотри приложение 5А).
E	120	Некоторые синтетические органические плёнки, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов. (Смотри приложение 5А).
B	130	Материалы на основе слюды (в том числе на органической подложке), асбест, стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов. (Смотри приложение 5А).
F	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетиче-

		скими связующими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов. (Смотри приложение 5А).
Н	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими составами, кремнийорганическими пропитывающими составами, кремнийорганические эластомера, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов. (Смотри приложение 5А).
С	Более 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими или элементоорганическими связующими составами, а также соответствующие данному классу другие материалы и другие сочетания материалов. (Смотри приложение 5А).
Температура выше 250°С должна повышаться на интервал в 25°С с присвоением соответствующих классов.		

(назад)

Лабораторная работа №6.
ИЗУЧЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: Изучение вязкости жидких диэлектриков и методов её определения. Исследование зависимости вязкости жидких диэлектриков от температуры.

6.1 Теоретические сведения

К жидким диэлектрикам относятся: нефтяные электроизоляционные масла, растительные (касторовое, тунговое) масла, синтетические жидкости.

К нефтяным маслам относятся: трансформаторное, конденсаторное, кабельное и отличающиеся друг от друга степенью очистки.

Синтетические жидкие диэлектрики делятся на хлордифениловые жидкости: совол, совтол, октор и другие, кремнийорганические (органосилоксановые) жидкости.

В трансформаторах, масляных выключателях и конденсаторах масло является средой, пропитывающей волокнистую изоляцию и заполняющую пространство между отдельными конструктивными элементами (сердечник - обмотки и т.д.), создающими масляные промежутки, разделенные слоями твердого материала (масляно - барьерная изоляция).

В кабелях масло играет в основном роль пропитывающего материала (бумажно-масляная изоляция) или только заливочного (вводы с сердечниками из твердой бумажно-смоляной изоляции).

В трансформаторах по сравнению с другими областями применения особенно велика охлаждающая роль масла.

В масляных выключателях масло является средой, в которой при разрыве цепи происходит гашение электрической дуги. Вследствие теплового воздействия дуги происходит интенсивное разложение масла с образованием большего количества газообразных продуктов. Фактически дуга создается в газовом пузыре окруженном маслом. Температура в середине дуги около 2000°С, вблизи электродов около 3000°С. Такая высокая температура вызы-

вает обугливание масла, ионизацию и увеличение давления как следствие сильного газообразования. На разложение и ионизацию масла расходуется до 90% всей энергии выделяемой дугой.

В силовых кабелях на напряжение до 35 кВ нефтяные масла применяют для пропитки бумажной или плёночной изоляции в количестве от 10 до 35% в зависимости от марки кабеля. Кабели на рабочее напряжение 110 кВ и выше делаются маслонаполненными. Вдоль всей длины кабеля или внутри жилы (в одножильном кабеле), или между жилами (в трехжильном кабеле) проходят каналы, заполненные маловязким маслом, находящимся все время под избыточным давлением.

Таким образом, при возникновении опасности образования внутри изоляции пустот, например, вследствие изменения температуры происходит подпитка изоляции из масляного канала. Основной изоляцией маслонаполненных кабелей является бумажная или пленочная изоляция, пропитанная маслом, заполняющим канал. Без пропитки кабели напряжением 110 кВ и выше надежно работать не могут, так как рабочие напряженности электрического поля таковы, что вызывают в пустотах ионизацию, постепенно разрушающую основную изоляцию.

Характеристики и область применения жидких диэлектриков во многом зависят от их вязкости. Так вязкость трансформаторного масла тесно связана с его охлаждающей способностью. Вязкость масел, лаков, компаундов применяемых для пропитки твердой изоляции в производстве лакотканей, для эмалировки проводов для покрывной изоляции листовой стали, имеет весьма существенное значение для проведения соответствующих технологических процессов.

Существует несколько различных видов вязкости: динамическая, кинематическая и условная, определяемая в технике упрощенными, условными способами.

Динамическая вязкость измеряется в Паскаль-секундах (Па·с). Паскаль-секунда - это динамическая вязкость среды, при ламинарном течении

которой в слоях, находящихся на расстоянии 1 м, в направлении перпендикулярном течению, возникает разность скоростей течения 1 м/с под действием давления сдвига 1 Па.

В практике испытаний все ещё применяется единица вязкости - пауз 1П = 0,1 Па·с.

Определение динамической вязкости производится на основе закона Стокса или закона Пуазейля.

Согласно закона Стокса, скорость υ движения твердого шарика радиусом r (м) в неограниченной среде с динамической вязкостью η (Па·с) под действием непрерывно воздействующей на шарик небольшой силы F(Н) будет равен:

$$\upsilon = \frac{F}{6 \cdot \pi \cdot r \cdot \eta}, \text{ м/с,}$$

Согласно закона Пуазейля, количество жидкости Q (кг), обладающей динамической вязкостью η (Па·с) и протекающей под действием небольшого давления Р (Н) за время t (с) сквозь капилляр длиной l (м) и радиусом r (м) при $l \gg r$ определяется формулой:

$$Q = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{P \cdot r^4}{l \cdot \eta} \cdot t .$$

Кинематическая вязкость ν (м/с) равна отношению динамической вязкости жидкости η (Па·с) к её плотности ρ (кг/м),

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \text{ м}^2/\text{с.}$$

Иными словами квадратный метр на секунду есть кинематическая вязкость жидкой среды плотностью в 1 (кг/м^3), динамическая вязкость которой равна 1 (Па·с).

Условная вязкость - характеристика, получаемая при определенной методике испытания. Эта величина связана с динамической и кинематической вязкостью приближенными эмпирическими формулами.

Вязкость жидкости, при увеличении или уменьшении температуры жидкого диэлектрика изменяется, при увеличении температуры - уменьшается, а при уменьшении - увеличивается.

Вязкость определяется с помощью вискозиметра. По своему устройству вискозиметры делятся на капиллярные, универсальные, ротационные и ультразвуковые.

С помощью капиллярных вискозиметров определяется кинематическая вязкость по времени истечения заданного объёма испытуемой жидкости через капилляр заданного диаметра. Для этих целей выпускается ряд типов стеклянных капиллярных вискозиметров типа ВПЖТ-1; ВПЖТ-2; ВПЖТ-4.

Для определения вязкости жидкости с небольшим временем истечения пользуются вискозиметрами типа ВЗ (лаки, эмали).

6.2 Программа работы

6.2.1 Ознакомиться с вискозиметром ВПЖТ-2 для определения кинематической вязкости.

6.2.2 Измерить вязкость трансформаторного масла при комнатной температуре.

6.2.3 Снять зависимость изменения вязкости трансформаторного масла от температуры.

6.2.4 Построить зависимость кинематической вязкости трансформаторного масла от температуры.

6.3 Техника безопасности при выполнении работы

6.3.1 Измерение вязкости проводятся бригадой в составе не менее 2-х человек.

6.3.2 Избегать попадания масла на лицо, руки, одежду.

6.3.3 При эксплуатации электронагревательной печки следует учитывать следующие виды опасности: электрический ток напряжением 220 В; температура нагревательной поверхности ≈ 150°С.

6.4 Приборы и оборудование

Для определения кинематической вязкости трансформаторного масла используется вискозиметр ВПЖТ-2. Изменение температуры при определении вязкости обеспечивается баней с термостатирующей жидкостью (дистиллированная вода).

6.5 Порядок выполнения работы

6.5.1 Определение кинематической вязкости трансформаторного масла.

Опыт по определению кинематической вязкости проводится при помощи вискозиметра ВПЖТ-2. Он должен быть тщательно промыт и высушен.

Испытываемую жидкость профильтровывают через бумажный или стеклянный фильтр.

При работе с вискозиметром ВПЖТ-2 (рисунок 1), который рекомендуется применять для измерения вязкости нефтепродуктов, на отводную трубку 3 надевают резиновую трубку, далее, зажав пальцем колено 2 и перевернув вискозиметр, опускают колено 1 в сосуд и засасывают с помощью резиновой груши или иным способом жидкость до метки М2, следя за тем, чтобы в жидкости не образовывались пузырьки. В тот момент, когда уровень жидкости достигнет метки М2, вискозиметр вынимают из сосуда и быстро переворачивают в нормальное положение. Затем, сняв избыток жидкости с внешней стороны колена 1, надевают на его конец резиновую трубку, вискозиметр устанавливают в термостат, заполненный термостатирующей жидкостью (дистиллированной водой, этиловым спиртом, глицерином и т.п.) так, чтобы расширение 4 было ниже уровня жидкости. Через 15 минут испытываемую жидкость засасывают в колено 1 до 1/3 высоты расширения 4. Соединяют колено 1 с атмосферой и определяют по секундомеру время опускания жидкости от метки М1 до метки М2.

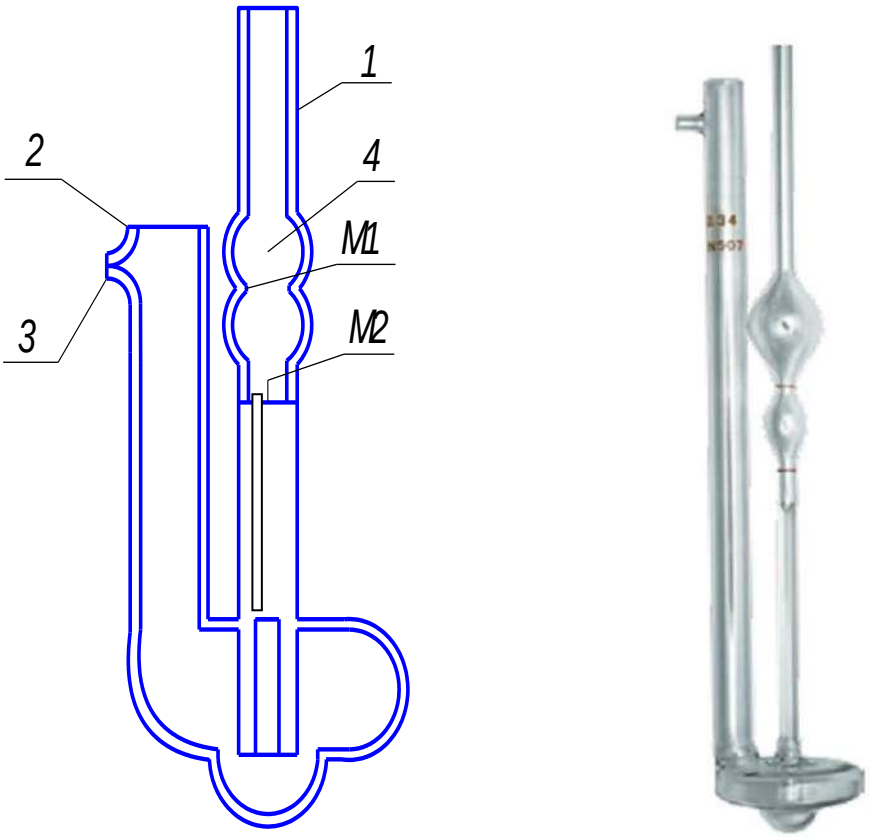


Рисунок 1 - Капиллярный вискозиметр ВПЖТ-2

Время истечения жидкости определяют несколько раз. Наименьшее число измерений в зависимости от времени опыта при:

τ = 200...300 с - пять измерений;

τ = 300...600 с - четыре измерения;

τ = 600 и более - три измерения.

Кинематическая вязкость ν, м^2/с, испытуемого жидкого диэлектрика вычисляется с точностью до четвертой значащей цифры по формуле

$$\nu = 1{,}019 \cdot 10^{-6} \cdot q \cdot \tau \cdot C \cdot K,$$

где C - постоянная вискозиметра, с;

τ - среднее арифметическое время истечения жидкости, с;

q - ускорение силы тяжести в месте измерения вязкости,

$$q = 980{,}0 \text{ см/с}^2;$$

K - коэффициент учитывающий изменение гидростатического напора жидкости в результате её расширения при нагревании.

Если вязкость определяется при помощи вискозиметра ВПЖТ, то

$$K = 1 + 0{,}0000\,\Delta t,$$

где Δt - разность температур жидкости при заполнении вискозиметра и при измерении вязкости. Если эта разность больше или равна 10°С, то К=1.

Постоянной вискозиметра называется время истечения дистиллированной воды из прибора при 20°С. В лабораторной работе постоянная вискозиметра определяется по среднеарифметическому времени пяти измерений. Данные измерений заносятся в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 - Данные опыта по определению постоянной вискозиметра

Наименование жидкости	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4	Опыт 5	Среднеарифметическое время истечения
	с	с	с	с	с	с
Дистиллированная вода						

Кинематическая вязкость трансформаторного масла определяется при температурах 20, 40, 60, 85°С, данные измерений заносятся в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 - Данные испытаний трансформаторного масла

Температура	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3	Опыт 4	Опыт 5	Среднеарифмет. время	ν	η	ВУ
°С	с	с	с	с	с	с	$м^2/с$	Па·с	ВУ
20									
40									
60									
85									

Динамическая вязкость рассчитывается по формуле

$$\eta = \nu \cdot \rho \text{ , Па·с,}$$

где ν - кинематическая вязкость, $м^2/с$;

ρ - плотность трансформаторного масла при 20°С, $\rho = 891{,}5$ $кг/м^3$.

Кинематическую вязкость трансформаторного масла ν можно выразить в единицах условной вязкости (ВУ или градусах). При значениях кинематической вязкости от 0,000001 до 0,0083 м/с перевод в ВУ или градусы делается при помощи таблицы 29.38 литературы /2/, а при вязкости более 0,0083 - по формуле:

$$ВУ = 0{,}135 \cdot \nu.$$

Содержание отчета

1) Информация о вязкости жидких электроизоляционных материалов;

2) Схема прибора;

3) Зависимость вязкости ν от температуры;

4) Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1) Каким образом вязкость трансформаторного масла влияет на работу трансформатора?

2) Какова зависимость степени вязкости жидких диэлектриков и его способности пропитывать пористые диэлектрики?

3) Что такое Паскаль-секунда Па·с?

4) Что такое кинематическая вязкость? Единицы измерения вязкости?

5) Область применения жидких диэлектриков?

6) Классификация жидких диэлектриков.

Литература

1. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов – М.: Высшая школа, 2007. – 538с.

2. Степанчук Г.В. Электротехнические материалы: конспект лекций по дисциплине "Материаловедение"./Г.В. Степанчук, П.В. Гуляев – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2009. – 114 с.

3. Журавлева Л.В. Электроматериаловедение / Л.В. Журавлева. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. - 312с.

4. Электротехнические и конструкционные материалы / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюнин, и др.; под ред. В.А. Филикова. – М.: Издательский центр «Академия», 2007, - 280с.

5. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.1 Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. В.Г. Герасимова, А.Ф.Дьякова, Н.Ф. Ильинского и др. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 440с.

6. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т.1 / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986, – 368 с.

7. Материалы электроизоляционные. Лаки, эмали, компаунды, смолы. Технический справочник: В 5 т. Т.4 / В.Д. Григорьева, Г.П. Корнеева, Л.П. Исаева.– М.: АО «Стандартэлектро», 1992, – 118с.

8. Практикум по технологии монтажа и ремонта электрооборудования / П.Д. Ирха, В.А. Буторин, В.Д. Девяткин и др.; Под ред. А.А. Пястолова. – М.: Агропромиздат, 1990, - 160с.

9. Богородицкий Н.П. Электротехнические материалы / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев – Л.: Энергоатомиздат, 1985, - 304с.

10.Казарновский Д.М. Испытание электроизоляционных материалов и изделий. Учебник / Д.М. Казарновский, Б.М. Тареев – Л.: Энергия, 1980. – 216с.

11.Корицкий Ю.В. Электротехнические материалы / Ю.В. Корицкий. – М.: Энергия, 1976, - 320с.

(назад)

Лабораторная работа № 7.
ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ГАЗООБРАЗНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: Изучение электрической прочности газообразных диэлектриков и методов её определения.

7.1 Теоретические сведения

Газообразными диэлектриками являются все газы, в том числе и воздух. В состав воздуха входят пары воды и газы: азот (78%), кислород (20,99%), углекислый газ (0,03%), аргон (0,9324%), водород (0,01%), неон (0,0018%), гелий, криптон и ксенон. Электропроводность газообразных диэлектриков обусловлена наличием в них свободных электрически заряженных частиц - электронов и ионов.

При подключении к слою газа электрического напряжения в нем возникает ток проводимости. При дальнейшем повышении напряжения наступает пробой газа, который в однородном электрическом поле происходит в виде искрового разряда. Это явление описывается законом Пашена

$$U_{пр} = \frac{A \cdot P \cdot h}{\ln \cdot \frac{B \cdot P \cdot h}{\ln \cdot (1 + \frac{1}{\gamma})}},$$

где A и B - коэффициенты зависящие от состава газа;

γ - коэффициент ударной ионизации иона катод;

P - давление газа, мм рт. ст.;

h - толщина слоя газа, см.

Анализ зависимости показывает, что пробивное напряжение газообразных диэлектриков есть функция произведения давления газа на толщину слоя:

$$U_{пр} = f \cdot (P \cdot h),$$

т.е. пробивное напряжение возрастает с увеличением давления и толщины слоя газа. С уменьшением давления и расстояния между электродами (толщине слоя) пробивное напряжение уменьшается, но, пройдя минимальное значение, снова возрастает (отклонение от закона Пашена), рисунок 7.1.

Поэтому величина электрической прочности $E_{пр}$ для любого газа возрастает с уменьшением расстояния между электродами. Такой же характер зависимости $E_{пр}$ от расстояния между электродами сохраняется и для твердых диэлектриков.

На рисунке 7.2 приводится зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами при нормальном атмосферном давлении в однородном электрическом поле. Начиная с расстояния 2 см и выше значение электрической прочности стремится к постоянной величине. Так при расстояниях от 1 до 3 см электрическая прочность $E_{пр}$ воздуха принимается 30 кВмак/см (21,3 кВдейст/см).

При использовании электродов со сферической поверхностью поле получается близко к однородному.

В однородном поле электрическая прочность определяется по формуле:

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h},$$

где $U_{пр}$ - пробивное напряжение, кВ;

h - толщина слоя диэлектрика, см.

При использовании электродов шар - остриё, остриё - плоскость, остриё - остриё поле получается неоднородным.

Пробой газообразных диэлектриков в неоднородных полях проходит ряд промежуточных стадий неполного пробоя газа (электрическая корона, кистевой разряд). Наибольшая неоднородность электрического поля создается между электродами остриё - плоскость. На рисунке 7.3. приводится зависимость пробивного напряжения воздуха от расстояния между электродами остриё - остриё при нормальных атмосферных условиях (Р = 101300 Па,

t = 20°C, влажность φ = 65%, и расстоянии между электродами менее 0,3 мм).

Для ориентировочных подсчетов пробивного напряжения воздуха можно воспользоваться следующими эмпирическими формулами: для электродов острие - острие и переменного напряжения частотой 50 Гц при P = 101300 Па (760 мм рт.ст), t = 20°C, и влажности 65% и h > 30 см для электродов изолированных от земли

$$U_{пр} = 15 \div 3{,}8 \cdot h \text{, кВ,}$$

и для тех же электродов, но один из которых заземлен

$$U_{пр} = 15 \div 3{,}6 \cdot h \text{, кВ,}$$

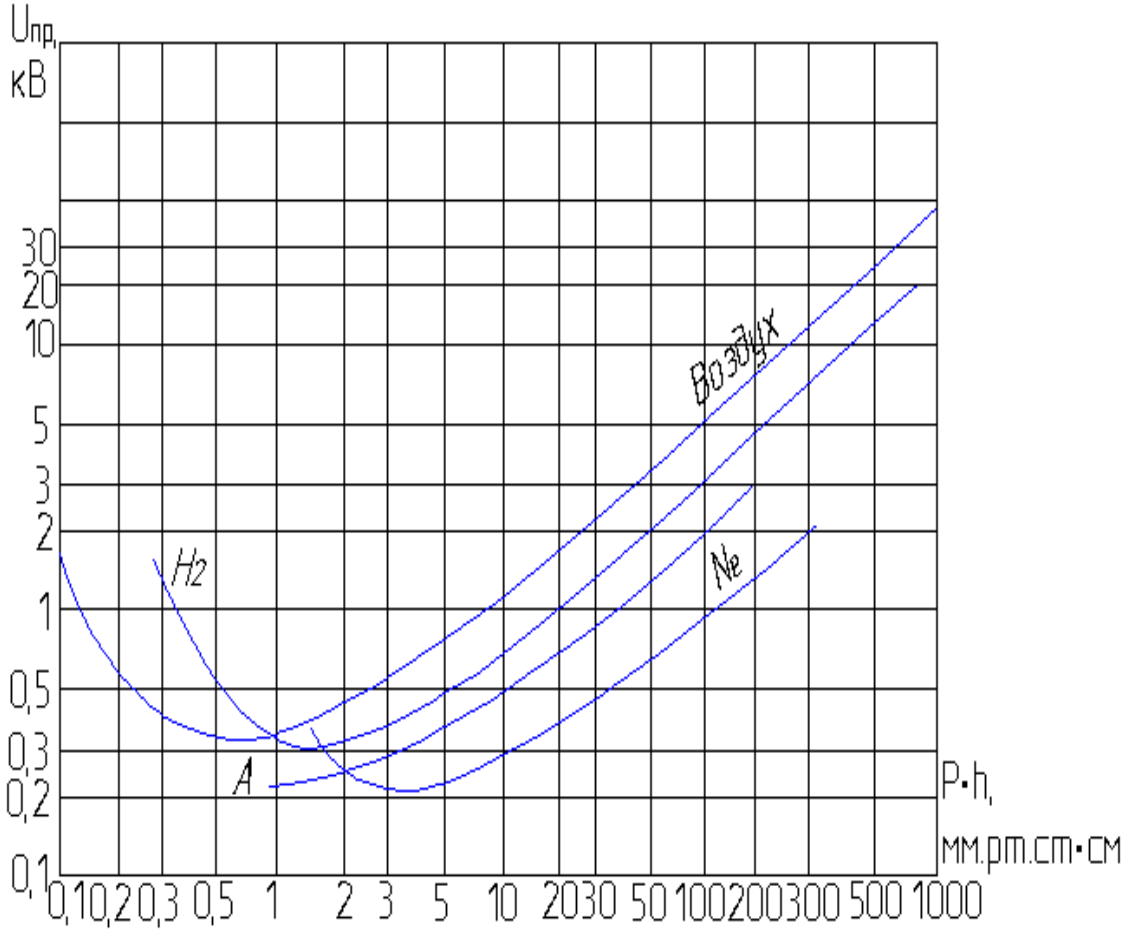


Рисунок 7.1 - Зависимость пробивного напряжения между электродами в однородном поле от произведения P·h (давления газа на толщину слоя)

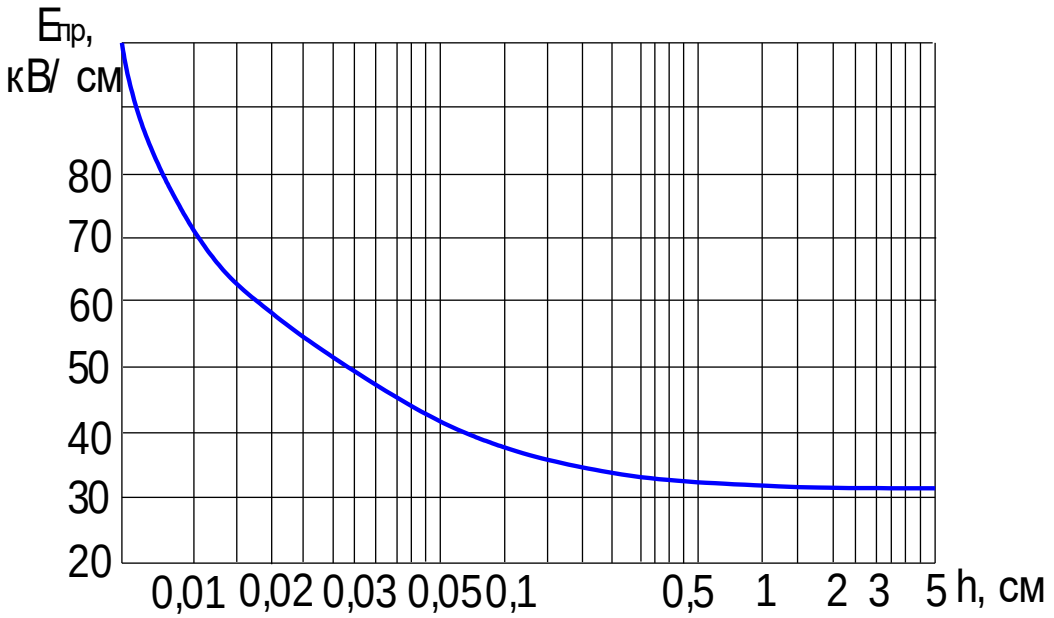


Рисунок 7.2 - Зависимость электрической прочности воздуха между электродами в однородном поле при нормальных атмосферных условиях

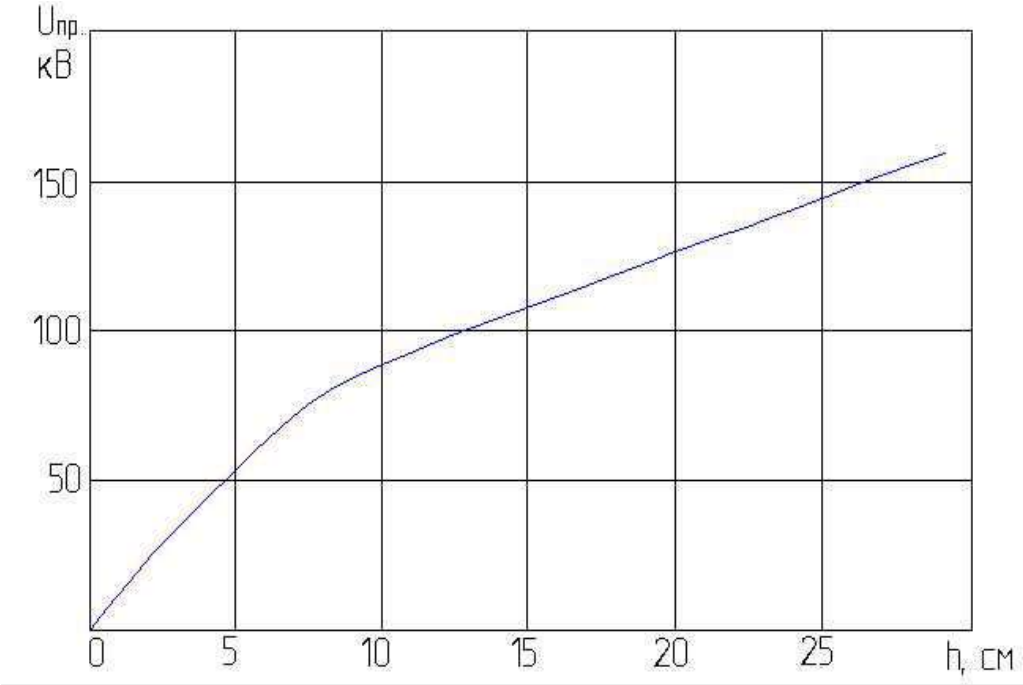


Рисунок 7.3 - Зависимость пробивного напряжения воздуха от расстояния между электродами острие - острие

Пробивное напряжение газообразных диэлектриков возрастает с ростом плотности, зависящей от давления и температуры. Пробивное напряжение в условиях испытания $U_{пр.н}$ равно:

$$U_{пр.н} = U_{пр} \cdot \delta,$$

где $\delta = \dfrac{\rho_н \cdot (273 + 20)}{101300 \cdot (273 + t_н)}$ - относительная плотность воздуха,

здесь $\rho_н$ - плотность воздуха при температуре 20°С;

$t_н$ - температура окружающей среды в условиях испытания, °С.

Влажность газообразных диэлектриков также оказывает влияние на величину пробивного напряжения. Пробивное напряжение возрастает с увеличением влажности газа, но только до наступления полного насыщения воздуха влагой (точка росы). Образование капелек влаги на поверхности электродов в газе вызывает понижение пробивного напряжения. Испытание электрической прочности газообразных диэлектриков можно проводить по схеме (рисунок 7.4) или с помощью прибора «Генератор напряжения высоковольтный ГНВ-1» (рисунок 7.5).

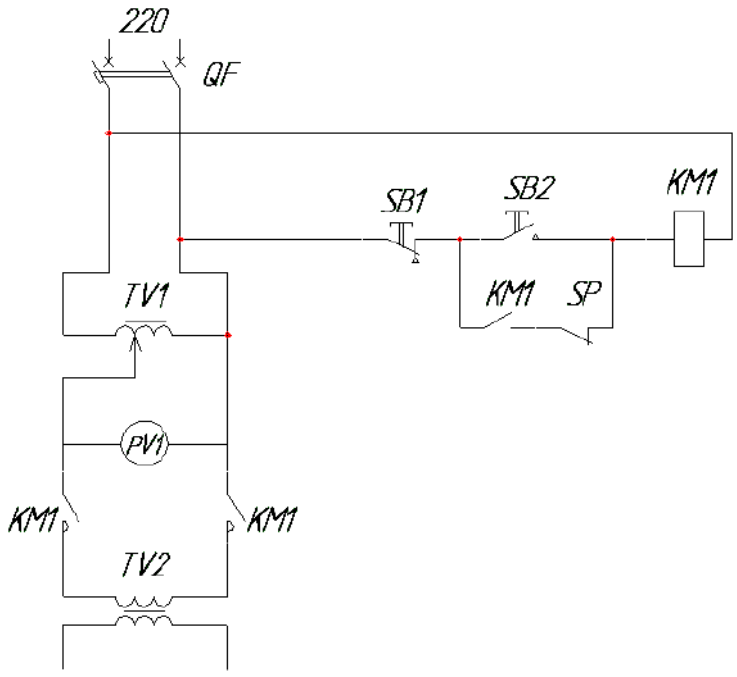


Рисунок 7.4 - Схема испытания электрической прочности воздуха

У воздуха заметное влияние влажности на величину пробивного напряжения наблюдается главным образом в неоднородных полях.



Рисунок 7.5 – Генератор напряжения высоковольтный ГНВ-1

В качестве изоляции, кроме воздуха, используются другие газовые диэлектрики, такие как азот N_2, водород H_2, углекислый газ CO_2, элегаз $SF_в$ (гексафторид серы), фреон CCl_2F_2.

В таблице 7.1 приводятся основные характеристики газовых диэлектриков.

Таблица 7.1 - Основные характеристики газовых диэлектриков

Наименование	Плотность при 101300 Па, $\rho_н$	Диэлектрическая проницаемость, $\varepsilon_г$	Электрическая прочность при 20°С кВ/см, $E_{пр}$	Коэффициент теплопроводности при 20°С, Вт/м	Температура кипения при t °С
Воздух	1,2928	1,00058	30,0	0,025537	-198
Азот	1,2507	1,00058	30,0	0,04426	-195,8
Водород	0,0898	1,00027	18,0	0,17445	-252,8
Углекислый газ	1,9768	1,00096	27,0	0,02826	-78,5

Продолжение таблицы 7.1

Элегаз	6,4851	1,00191	72,0	0,03198	-68,8
Фреон	0,54306	-	78,0	0,01046	29,8

7.2 Программа работы

7.2.1 Измерить пробивное напряжение воздуха в однородном электрическом поле при различном расстоянии между электродами.

7.2.2 Рассчитать электрическую прочность воздуха в однородном электрическом поле при различных значениях толщины слоя.

7.2.3 Измерить пробивное напряжение слоя воздуха различной толщины в неоднородном электрическом поле.

7.2.4 Рассчитать электрическую прочность слоя воздуха различной толщены в неоднородном поле.

7.2.5 Построив зависимость $E_{пр} = f(h)$ в однородном и неоднородном электрических полях.

7.2.6. Сделать краткие выводы.

7.3 Техника безопасности

7.3.1 Измерение пробивного напряжения воздуха проводить бригадой в составе не менее 2-х человек.

7.3.2 Не включать электрические установки под напряжение без разрешения преподавателя.

7.3.3 После подачи высокого напряжения не касаться проводов, даже если они изолированы.

7.3.4 При окончании испытания все регулирующие устройства должны быть приведены в исходное (нулевое) положение.

7.3.5 Все изменения в схеме производить только с разрешения преподавателя.

7.3.6 При изменении расстояния между электродами необходимо установить регулирующее устройство в нулевое положение, затем выключить напряжение, изменить расстояние между электродами.

7.4 Приборы и оборудование

7.4.1 При определении электрической прочности воздуха используют следующие виды электродов: шаровые радиусом R; остриё длиной *l*, плоскость.

7.4.2 Генератор напряжения высоковольтный ГНВ-1

7.5 Порядок выполнения работы

7.5.1 Установить электроды в испытательную камеру ГНВ-1, рисунок 7.5.

7.5.2 Закрыть крышку испытательной камеры, куда подается повышенное напряжение.

7.5.3 Вращая рукоятку микрометра, установить расстояние между электродами.

7.5.4 Нажать кнопку сеть, через тридцать секунд прибор будет готов к работе.

7.5.5 Выбрать автоматический режим набора напряжения нажатием на кнопку «режим».

7.5.6 Нажать кнопку «пуск». На индикаторе появится значение подаваемого напряжения, повышающегося на 0,1 КВ через каждые пять секунд.

7.5.7 При пробое (когда загорится сигнальная лампа) зафиксировать величину подводимого пробивного напряжения, результаты измерений и вычислений записать в таблицу.

7.5.8 Открыть испытательную камеру и проветрить.

7.5.9 Установить новое расстояние между электродами и повторить эксперимент.

Таблица 7.2 - Результаты испытаний электрической прочности воздуха

Однородное поле			Неоднородное поле		
$U_{пр}$	h	$E_{пр}$	$U_{пр}$	h	$E_{пр}$
кВ	см	кВ/см	кВ	см	кВ/см
	0,05			0,05	
	0,1			0,1	
	0,15			0,15	
	0,2			0,2	
	0,25			0,25	
	0,3			0,3	

Содержание отчета

В отчете должно быть отражено:

1) Краткое описание электрической прочности газовых диэлектриков.

2) Методика определения электрической прочности воздуха с графическим выполнением электрической схемы испытания.

3) Результаты испытаний.

4) Графики зависимостей пробивного напряжения и электрической прочности от расстояния между электродами.

Контрольные вопросы

1) Какие вы знаете газообразные диэлектрики?

2) Чем обусловлена проводимость газообразных диэлектриков?

3) Что такое электрическая прочность и как она определяется?

4) От каких параметров зависит электрическая прочность газообразных диэлектриков?

5) При одном и том же расстоянии между электродами и составе газа, в каком поле электрическая прочность выше, в однородном или в неоднородном?

Литература

1. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов – М.: Высшая школа, 2007. – 538с.

2. Степанчук Г.В. Электротехнические материалы: конспект лекций по дисциплине "Материаловедение"./Г.В. Степанчук, П.В. Гуляев – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2009. – 114 с.

3. Журавлева Л.В. Электроматериаловедение / Л.В. Журавлева. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. - 312с.

4. Электротехнические и конструкционные материалы / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюнин, и др.; под ред. В.А. Филикова. – М.: Издательский центр «Академия», 2007, - 280с.

5. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.1 Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. В.Г. Герасимова, А.Ф.Дьякова, Н.Ф. Ильинского и др. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 440с.

6. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т.1 / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. – М.: Энергоатомиздат, 1986, – 368 с.

7. Богородицкий Н.П. Электротехнические материалы / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев – Л.: Энергоатомиздат, 1985, - 304с.

8. Казарновский Д.М. Испытание электроизоляционных материалов и изделий. Учебник / Д.М. Казарновский, Б.М. Тареев – Л.: Энергия, 1980. – 216с.

9. Корицкий Ю.В. Электротехнические материалы / Ю.В. Корицкий. – М.: Энергия, 1976, - 320с.

(назад)

Лабораторная работа №8.
ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Цель работы: Исследование основных параметров фотоэлектрических преобразователей и методов их определения.

8.1 Теоретические сведения

К полупроводникам относят большую группу веществ. По своему удельному электрическому сопротивлению они занимают промежуточное положение между проводниками и диэлектриками таблица 8.1. Отличительным свойством полупроводников является сильная зависимость их удельного электрического сопротивления от концентрации примесей. У большинства полупроводников удельное электрическое сопротивление зависит также от температуры и других внешних энергетических воздействий (свет, электрическое и магнитное поле, ионизирующее излучение и т.д.).

Таблица 8.1 – Ориентировочная характеристика удельных электрических сопротивлений разных классов электротехнических материалов

Класс материалов	**Удельное электрическое сопротивление Ом*м**
Проводники	$10^{-8} – 10^{-5}$
Полупроводники	$10^{-6} – 10^{+8}$
Диэлектрики	$10^{+7} – 10^{+16}$

Применяемые в практике полупроводниковые материалы могут быть подразделены на простые полупроводники (элементы), полупроводниковые химические соединения и полупроводниковые комплексы. Кроме вышеназванных полупроводников используются стеклообразные и жидкие полупроводники.

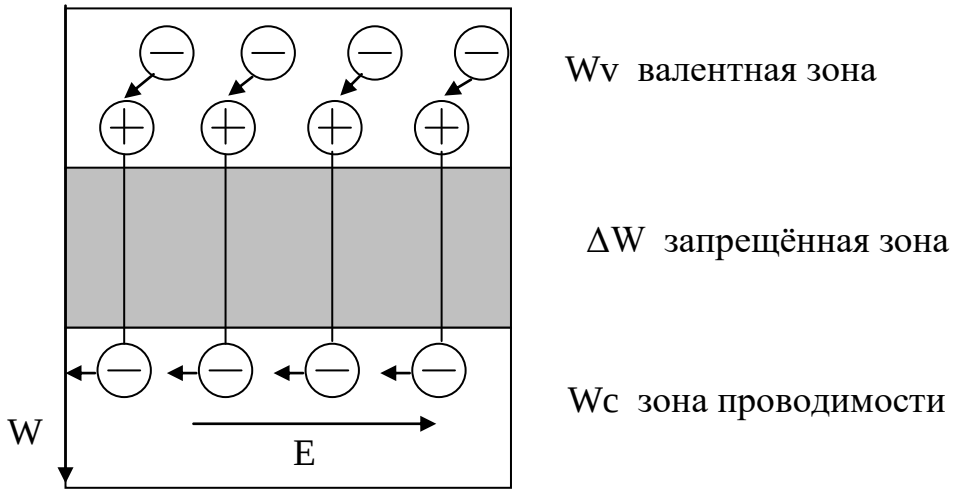


Рисунок 8.1 –Диаграмма зонной структуры полупроводника.

Из элементарных полупроводников наибольшее применение в технике получили ГЕРМАНИЙ, КРЕМНИЙ и СЕЛЕН. К наиболее известным полупроводниковым химическим соединениям относятся следующие виды

1. Окислы $Cu\ O_2$, $Ti\ O_2$, $Zn\ O$, $Fe_3\ O_4$, $Al_2\ O_3$.
2. Сульфиды *PbS* , ZnS, *CdS*.
3. Селениды ZnSe, *Hg Se*, *Pb Se*.
4. Теллуриды *PbTe*, *Hg Te*, *Cd Te* .
5. Карбид кремния *Si C* и другие виды.

Наиболее распространёнными полупроводниковыми изделиями в электротехнике являются транзисторы, диоды, тиристоры, фоторезисторы и фотодиоды и т.д.

В лабораторной работе необходимо исследовать работу фотодиода в двух режимах: фотопреобразователя и фотогенератора.

Фотоэлектрический преобразователь – полупроводниковый прибор, используемый для получения электрической энергии из оптического излучения (света).

Фотоэлектрический преобразователь представляет собой фотодиод с большой площадью поверхности p-n перехода. Простейший фотодиод пред-

ставляет собой обычный полупроводниковый диод, в котором обеспечивается возможность воздействия оптического излучения на p-n переход.

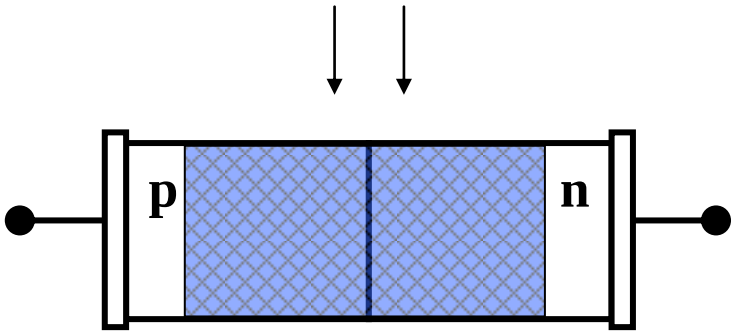
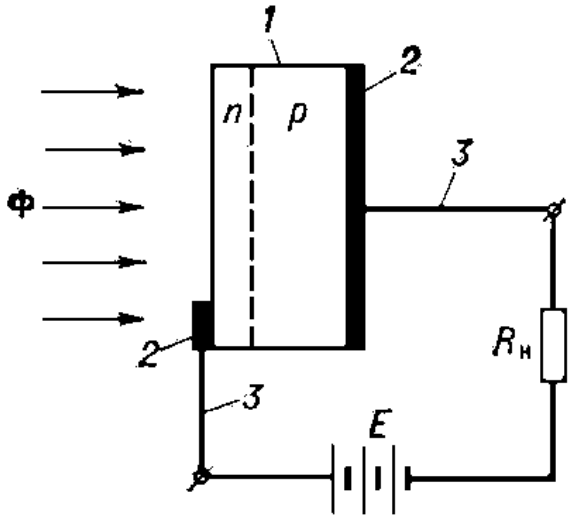


Рисунок 8.2 – Упрощённая схема простейшего полупроводника.

Фотодиод **-** полупроводниковый диод, обладающий свойством односторонней фотопроводимости при воздействии на него оптического излучения. Фотодиод представляет собой полупроводниковый кристалл обычно с электронно-дырочным переходом (p–n-переходом), снабженный двумя металлическими выводами (один от p-, другой от n-области) и вмонтированный в металлический или пластмассовый защитный корпус. Материалами, из которых выполняют фотодиоды, служат Ge, Si, GaAs, HgCdTe и др.

Различают 2 режима работы фотоэлемента: фотодиодный, когда во внешней цепи фотодиода содержится источник постоянного тока, создающий на p–n-переходе обратное смещение, и вентильный, когда такой источник отсутствует. В фотодиодном режиме фотодиод, как и Фоторезистор, используют для управления электрическим током в цепи фотодиода, в соответствии с изменением интенсивности падающего излучения. Возникающие под действием излучения неосновные носители диффундируют через p–n-переход и ослабляют электрическое поле последнего. Фототок в фотодиоде в широких пределах линейно зависит от интенсивности падающего излучения и практически не зависит от напряжения смещения. В вентильном режиме фотодиод, как и полупроводниковый фотоэлемент, используют в качестве генератора фотоЭДС.

Фотодиоды. находят применение в устройствах автоматики, лазерной техники, вычислительной техники, измерительной техники и т.п.



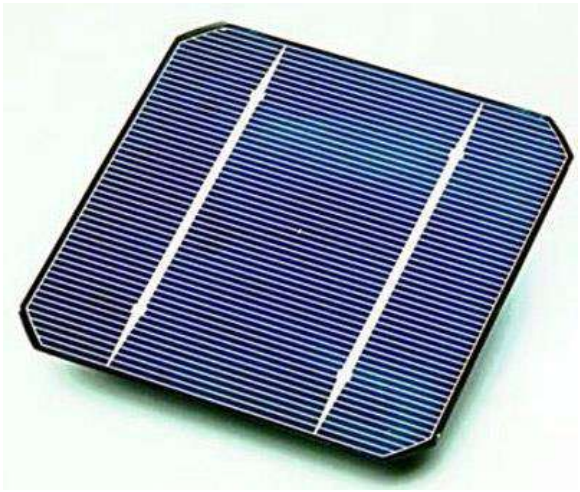


Рисунок 8.3 - Структурная схема фотодиода и схема его включения при работе в фотодиодном режиме: 1 — кристалл полупроводника; 2 — контакты; 3 — выводы; Ф — поток электромагнитного излучения; n и p — области полупроводника соответственно с донорной и акцепторной примесями; E — источник постоянного тока; Rн — нагрузка.

Работа фотоэлемента основана на внутреннем фотоэлектрическом эффекте в полупроводниках. Внешние радиационные (световые, тепловые) воздействия обуславливают появление в слоях фотоэлемента неосновных носителей зарядов, знаки которых противоположны знакам основных носителей ***p***- и ***n***-областях. Под влиянием электростатического притяжения разноименные свободные основные носители диффундируют через границу соприкосновения областей и образуют вблизи нее ***p-n*** гетеропереход с напряженностью электрического поля $\boldsymbol{E_K}$, контактной разностью потенциалов $\boldsymbol{U_K = S*E_K}$ и потенциальным энергетическим барьером $\boldsymbol{W_K=e*U_K}$ для основных носителей, имеющих заряд ***e***. Напряженность поля $\boldsymbol{E_K}$ препятствует их диффузии за пределы пограничного слоя шириной ***S***. Напряжение зависит от температуры ***T***, концентраций дырок или электронов в ***p***- и ***n***-областях заряда электрона ***e*** и постоянной Больцмана ***k***. для неосновных носителей $\boldsymbol{E_K}$ - дви-

жущее поле. Оно обусловливает перемещение дрейфующих электронов из области ***p*** в область ***n***, а дырок - из области ***n*** в область ***p***. Область ***n*** приобретает отрицательный заряд, а область ***p***- положительный, что эквивалентно приложению к ***p-n*** переходу внешнего электрического поля с напряженностью $\boldsymbol{E_{ВШ}}$, встречного с $\boldsymbol{E_K}$. Поле с напряженностью $\boldsymbol{E_{ВШ}}$ - запирающее для неосновных и движущее для основных носителей. Динамическое равновесие потока носителей через ***p-n*** переход переводит к установлению на электродах разности потенциалов $\boldsymbol{U_0}$ - ЭДС холостого хода ФЭ. Эти явления могут происходить даже при отсутствии освещения ***p-n*** перехода. Когда ФЭ облучается потоком световых квантов (фотонов), которые сталкиваются со связанными (валентными) электронами кристалла с энергетическими уровнями ***W***. Если энергия фотона $\boldsymbol{W\phi=hv}$ (***v*** -частота волны света, ***h*** - постоянная Планка) больше ***W***, электрон покидает уровень и порождает дырку; р-п переход разделяет пары электрон - дырка, и ЭДС U_0 увеличивается. Если подключить сопротивление нагрузки RH, по цепи пойдет ток I, направление которого встречно движению электронов. Перемещение дырок ограничено пределами полупроводников, во внешней цепи их нет. Ток I возрастает с повышением интенсивности светового потока Ф, но не превосходит предельного тока In ФЭ, который получается при переводе всех валентных электронов в свободное состояние: дальнейший рост числа неосновных носителей невозможен. В режиме КЗ (RH=0, UH=IRH=0) напряженность поля Евш =0, р-п переход (напряженность поля ЕК) наиболее интенсивно разделяет пары неосновных носителей и получается наибольший ток фотоэлемента IФ для заданного Ф. Но в режиме КЗ, как и при холостом ходе (I=0) , полезная мощность P=UHI=0, а для 0<UH<U0 и 0<I<IФ будет P>0.

8.2. Снятие семейства вольтамперных характеристик фотодиода в режиме фотогенератора (вентильный режим)

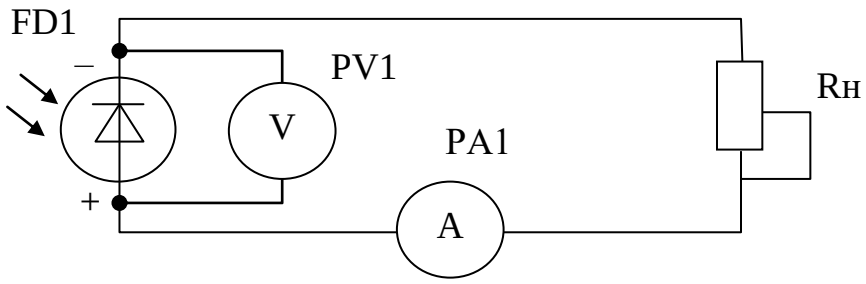


Рисунок 8.4 – Схема для снятия вольтамперных характеристик фотодиода в режиме фотогенератора (вентильный режим).

Таблица 8.2 – Результаты для определения вольтамперных характеристик фотодиода в режиме фотогенератора

E, лк	500лк							
U, В								
I,A								

E, лк	250лк							
U, В								
I,A								

8.3. Снятие семейства вольтамперных характеристик фотодиода в режиме фотопреобразователя

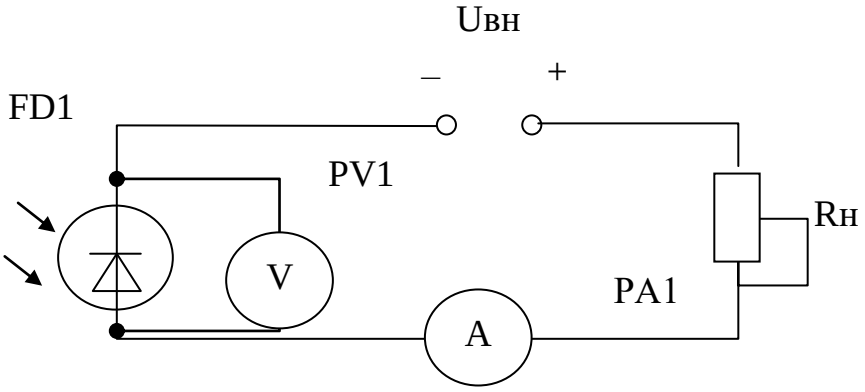


Рисунок 8.5 – Схема для снятия вольтамперных характеристик фотодиода в режиме фотопреобразователя.

Таблица 8.3 – Результаты для определения вольтамперных характеристик фотодиода в режиме фотопреобразователя.

E, лк	0лк							
Uвн, В								
Uд, В								
Iт,А								

E, лк	250лк							
Uвн, В								
Uд, В								
Iт,А								

E, лк	500лк							
Uвн, В								
Uд, В								
Iт,А								

На основании расчётов необходимо построить графики зависимости Uд=f (Iт)

8.5 Программа выполнения работы.

1. *Снятие семейства вольтамперных характеристик фотодиода в режиме фотогенератора.*



Рисунок 8.6 - Внешний вид лабораторного стенда

1.1. Собрать схему, представленную на рис. 8.4.

В качестве вольтметра используется цифровой мультиметр, переключенный на вольтметр постоянного напряжения (DCV) на предел 2000mV. В качестве амперметра также используется цифровой мультиметр, переключенный в режим измерения постоянного тока (DCA) на предел 200 mA.

1.2. Включить внешний источник освещения (лампу), расположить её над фотоэлементом на расстоянии 50 см, при этом освещенность поверхности фотоэлемента будет около 500 лк.

1.3. Переменное сопротивление Rн необходимо выставить в максимальное положение, при этом значение тока будет иметь минимальное значение, а напряжение – максимальное. Занести значение тока и напряжения в таблицу 8.3.

1.4. Затем необходимо уменьшить значение Rн и занести величины V и I в таблицу.

Снять 5-6 точек измерения, постепенно уменьшая Rн до минимального значения.

1.5. Отключить внешний источник освещения. При комнатном освещении освещенность фотоэлемента будет около 250 лк.

1.6. Выполнить действия согласно пунктов 1.3-1.4.

1.7. По полученным значениям построить семейство вольтамперных характеристик кривых. Примерный вид которых, представлен на рисунке 8.7.

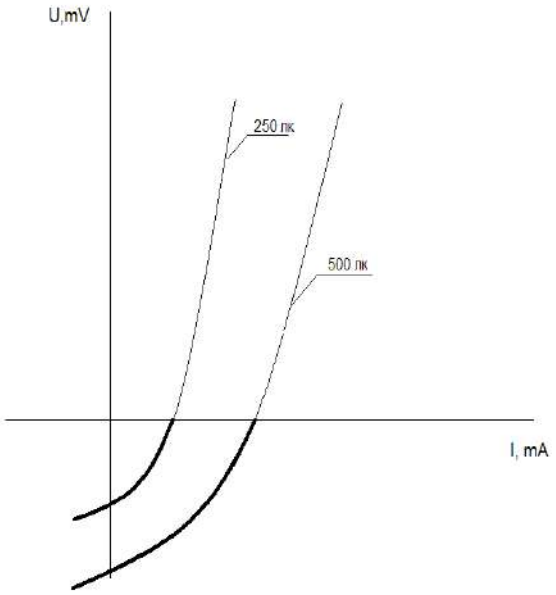


Рисунок 8.7 – Семейство ВАХ фотодиода

2. Снятие семейства вольтамперных характеристик кривых в режиме фотопреобразователя.

2.1. Собрать схему, представленную на рис. 8.5. Цифровой мультиметр (PV1) необходимо переключить на предел 20 V (DCV), амперметр переключить на предел 200 mA, внешний источник постоянного тока необходимо вывести в следующие положения: регулятор (VOLTAGE) в минимальное положение, а регулятор (CURRENT) – в максимальное.

2.2. Только после этого включить внешний источник постоянного напряжения.

2.3.Закрыть поверхность фотодиода светонепроницаемой крышкой, при этом освещённость будет составлять 0 лк.

2.4. Выставить регулятор нагрузки Rн в среднее положение.

2.5. Измерить значение темпового тока Iт и падение напряжения на диоде при разных значениях внешнего напряжения, записать значения в таблицу 3.

(Примечание: напряжение внешнего источника питания не должно превышать 5 вольт.)

2.6. Снять светонепроницаемую крышку с фотодиода и выполнить пункты 2.4-2.5, результаты занести в таблицу 8.4.

2.7. Включить внешний источник освещения (лампу), разместить его на расстоянии 50 см над фотодиодом и выполнить пункты 2.4-2.5. программы работы. Результаты занести в таблицу 5.

2.8. По полученным данным построить семейство вольтамперных характеристик I=f(Vd) при разных E, лк.

Контрольные вопросы

1) Что такое фотоэлемент?

2) Что такое запрещённая зона?

3) Какова ширина запрещённой зоны у полупроводников?

4) Что такое фотоэфект?

5) Работа фотодиода в режиме фотогенератора?

6) Работа фотодиода в режиме фотопреобразователя?

7) Какие типы проводимостей полупроводников вы знаете?

8) Перечислите элементарные полупроводники из периодической таблицы Д.И. Менделеева?

Литература

1. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов – М.: Высшая школа, 2007. – 538с.

2. Степанчук Г.В. Электротехнические материалы: конспект лекций по дисциплине "Материаловедение"./Г.В. Степанчук, П.В. Гуляев – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2009. – 114 с.

3. Журавлева Л.В. Электроматериаловедение / Л.В. Журавлева. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. - 312с.

4. Электротехнические и конструкционные материалы / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюнин, и др.; под ред. В.А. Филикова. – М.: Издательский центр «Академия», 2007, - 280с.

5. Кисаримов Р.А. Справочник электрика / Р.А. Кисаримов – М.: ИП РадиоСофт, 2005, – 512с.

6. Справочник по электротехническим материалам: В 3 т. Т.3 / Под ред. Ю.В. Корицкого и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1988, – 728с.

7. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.1 Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. В.Г. Герасимова, А.Ф.Дьякова, Н.Ф. Ильинского и др. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 440с.

8. Богородицкий Н.П. Электротехнические материалы / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев – Л.: Энергоатомиздат, 1985, - 304с.

9. Корицкий Ю.В. Электротехнические материалы / Ю.В. Корицкий. – М.: Энергия, 1976, - 320с.

(назад)

Лабораторная работа № 9.
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКИХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы Изучение диэлектрических характеристик жидких электроизоляционных материалов и методов их измерения.

9.1 Теоретические сведения

Электрическая емкость любого участка изоляции с электродами (в частности конденсатора или обмоток маслонаполненного трансформатора) зависит от его геометрических размеров и конфигурации, а также от вида диэлектрика.

Параметр ε_r, характеризующий способность диэлектрика образовывать емкость, называется относительной диэлектрической проницаемостью. Диэлектрическая проницаемость так же является параметром, который количественно характеризует процесс поляризации.

Для вакуума $\varepsilon_r = 1$, а для всякого диэлектрического материала $\varepsilon_r > 1$.

Емкость конденсатора любых размеров и формы пропорциональна диэлектрической проницаемости диэлектрика.

$$C = C_0 \cdot \varepsilon_r$$

где C_0 – емкость вакуумного конденсатора имеющего те же формы и размеры, что у конденсатора заполненного жидким диэлектриком с диэлектрической проницаемостью ε_r.

Относительная диэлектрическая проницаемость ε_r входит в величину абсолютной диэлектрической проницаемости.

$$\varepsilon_a = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \text{, Ф/м}$$

где ε_0 – электрическая постоянная, которая равна $8{,}854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Электрическая емкость конденсатора (любого участка изоляции с электродами) зависит от формы, размеров, материала. Так для плоского участка изоляции (обкладки конденсатора) емкость определится из выражения:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{h}$$

где S – площадь плоского конденсатора, м^2;

h – толщина диэлектрика или расстояние между электродами, м.

Относительная диэлектрическая проницаемость не только характеризует процессы поляризации и способность материала образовывать емкость; она также входит в ряд уравнений, характеризующих физические процессы, протекающие в диэлектрике.

Напряженность электрического поля, создаваемая точечным зарядом q на расстоянии h определится из выражения

$$E = \frac{q}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r 4\pi h^2}$$

Относительная диэлектрическая проницаемость любого жидкого диэлектрика может быть определена также из следующего выражения

$$\varepsilon_r = 1 + K_r$$

где K_r – диэлектрическая восприимчивость диэлектрика.

Таблица 9.1 – Диэлектрическая проницаемость некоторых диэлектриков

Наименование	Агрегатное состояние	ε_r
Тетраформ CCl_4	Жидкий	2,24
Бензол	Жидкий	2,28
Трансформаторное масло	Жидкий	2,1…2,4
Конденсаторное масло	Жидкий	2,1….2,3

Совол	Жидкий	5,0…5,2
Октол	Жидкий	2,2…2,4
Нитробензол	Жидкий	36
Вода	Жидкая	81

Диэлектрические потери

Диэлектрические потери - электрическая мощность, поглощаемая диэлектриком (участком изоляции) превращается в тепло под действием приложенного напряжения.

Если участок изоляции с сопротивлением $R_{из}$, Ом находится под постоянным напряжением U, В значение диэлектрических потерь P, Вт определяется как

$$P = I_y^2 \cdot R_{из} = \frac{U^2}{R_{из}} = I_y \cdot U \qquad (9.1)$$

где I_y - сквозной ток утечки через изоляцию, А.

Удельные электрические потери, т.е. отношение потерь к объему изоляции равны

$$P_{уд} = \frac{E^2}{\rho_V} = E^2 \cdot \gamma_V \qquad (9.2)$$

где E - напряженность поля, А/м;

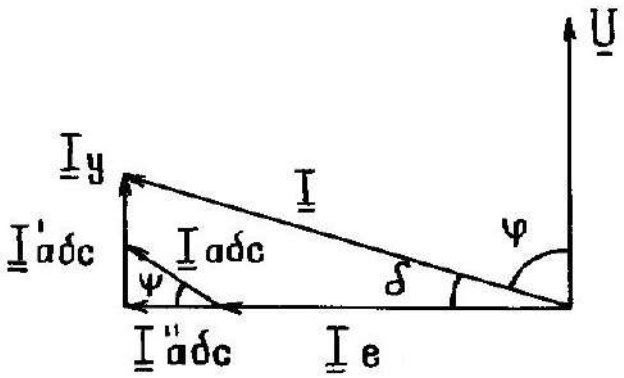
ρ_V - удельное объемное сопротивление диэлектрика, Ом/м;

γ_V - удельное объемная проводимость, Ом/мм^2.

Если участок изоляции включен под переменное значение напряжение, мощности потерь P, Вт на участке изоляции емкостью C, Ф, при действующем значении приложенного напряжения U, В и частоте f = 50 Гц равно

$$P = U \cdot I_a \qquad (9.3)$$

где I_a - активная составляющая тока, А.



$\underline{I}_e$ - емкостный ток электронной поляризации А;

$\underline{I}_y$ - сквозной ток утечки через изоляцию, А;

$\underline{I}''_{абс}$ - емкостной ток, вызванный процессами поляризации диэлектриков: дипольной, миграционной, ионно-релаксационной и других видов, А;

$\underline{I}'_{абс}$ - активный ток, вызванный процессами поляризации в диэлектрике, А;

$\underline{I}$ - суммарный ток диэлектрика.

Рисунок 9.1 – Векторная диаграмма токов диэлектрика с потерями.

Как видно из диаграммы через диэлектрики идут три синусоидальных тока:

I_e - емкостной ток

$I_{абс}$ - ток абсорбции (поляризации с активной и реактивной составляющими)

I_y - сквозной ток утечки, А .

$$I_y = \frac{U}{R_{из}}$$

Активная составляющая тока, протекающего через диэлектрик определяемая из диаграммы равна

$$I_a = I'_{абс} + I_y = I_c \cdot tg\delta,$$
$$I_c = I_e + I''_{абс} = U\,\omega C$$

Подставляяполученные значения I_a в формулу (9.2) получаем следующее выражение мощности потерь.

$$P = U \cdot I_c \cdot tg\delta \qquad P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot tg\delta$$

Тангенс угла диэлектрических потерь

$$tg\delta = \frac{I_a}{I_e}$$

Угол диэлектрических потерь важнейшая характеристика изоляционных материалов и чем он меньше, тем качественнее материал.

Величина, обратная tgδ называется добротностью материала.

$$Q = \frac{1}{tg\delta}$$

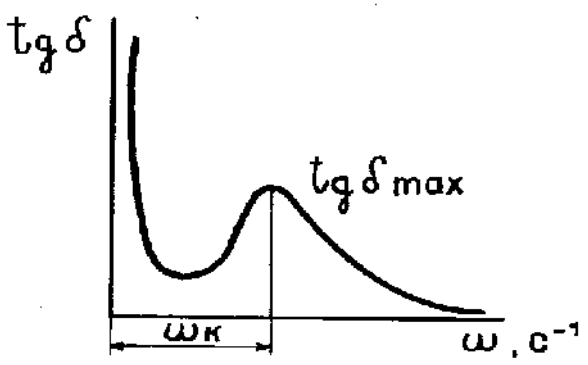


Рисунок 9.2 – Теоретическая зависимость $tg\delta$ от частоты приложенного напряжения

Угол диэлектрических потерь зависит не только от величины приложенного напряжения, но и от его частоты ω, температуры t, влажности φ.

В настоящее время измерение диэлектрических потерь наряду с другими видами испытаний используются при профилактических испытаниях трансформаторного масла, изоляции оборудования высокого напряжения.

Для измерения диэлектрической проницаемости применяются различные мостовые схемы. Наиболее широкое распространение в практике получили мосты переменного тока типа МД-16, МДП, Р525. С помощью этих мостов измеряются и значение емкости образца диэлектрика. В последнее время для измерения характеристик изоляционных материалов выпускаются универсальные измерители L, C, $tg\sigma$, добротности Е7-11, Е7-15. Прибор работает по принципу мостовых схем.

9.2 Программа работы

9.2.1 Ознакомиться с инструкцией приборов Е7 – 15

9.2.2 Измерить «$\mathrm{tg}\delta$» и ёмкость «C» образцов жидких диэлектриков (трансформаторного масла, конденсаторного масла).

9.2.3 Расчётным путём определить диэлектрическую проницаемость исследуемых образцов изоляционных материалов.

9.2.4 Сравнить полученные значения параметров с каталожными данными.

9.2.5 Сделать краткие выводы.

9.3 Техника безопасности при выполнении лабораторной работы

9.3.1 Измерение параметров жидких изоляционных материалов проводить звеном не менее 2х человек.

9.3.2 При замене образцов следует следить за правильностью подключения приборов.

9.4 Приборы и оборудование

Для измерения относительной диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь используется универсальный прибор "Измеритель имитанса" Е 7-15 и плоские (пластинчатые) образцы площадью S, см^2, погруженные в жидкий диэлектрик и позволяющие за одно измерение вычислить относительную диэлектрическую проницаемость образца изоляционного материала.

9.5 Выполнение работы

9.5.1 Инструкция работы с прибором Е7 - 15.

Передняя панель прибора показана на рисунке 9.3

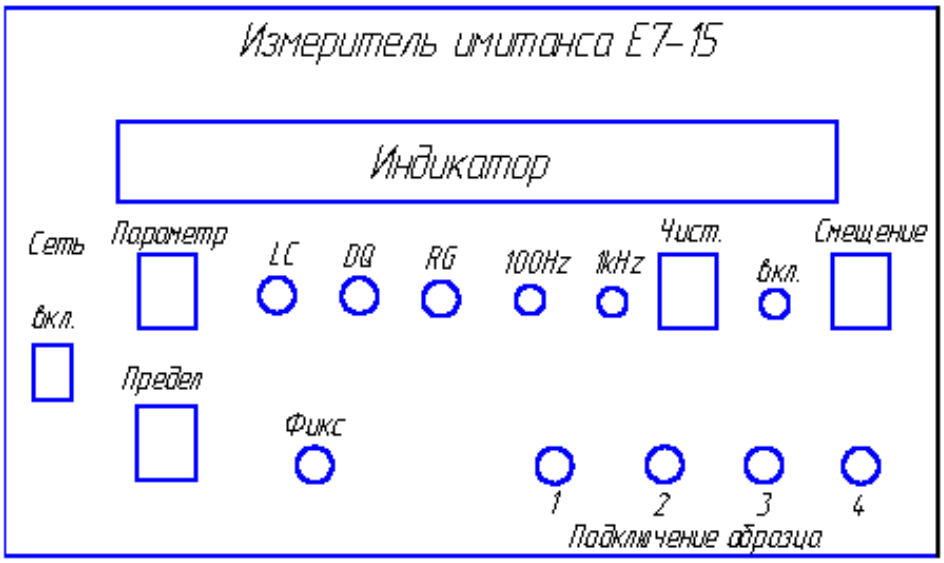


Рисунок 9.3 –Внешний вид панели прибора Е7-15

Измеритель иммитанса (параметра цепей) может измерять активные и реактивные параметры, измеряемых объектов по параллельной (1-4 пределах измерения) или последовательно (5-8 пределах измерения) эквивалентной

схеме. Относительные параметры измеряются в форме фактора потерь Д или добротности Q.

Для проведения измерения достаточно подключить измеряемый объект к зажимам УП-2 и установить при помощи кнопок передней панели нужный режим измерения. Нажатием кнопки "Параметр" можно установить прибор в режим измерения реактивной составляющей иммитанса (L или C), активной (R или G) или в режим измерения относительного параметра (Д или Q). Конкретная форма компонента иммитанса выбирается прибором автоматически в соответствии с таблицей 9.2.

Таблица 9.2 – Конкретная форма компоненты

Пределы измерения	Составляющая иммитанса объекта измерения	Формула представления результата
1 - 4	C L > L пред. L < L пред. R > R пред. R < R пред.	C - C L G R
5 - 8	L C > C C < C R	L - L C R
1 - 8	Д > 2 Д < 2	Д G

5.Кнопкой "ЧАСТОТА" установить требуемую частоту измерения 100 Гц или 1 кГц.

6.При измерении емкости электрических конденсаторов нажатием кнопки "смещение" можно подать поляризующее напряжение плюс 4,8 В (со стороны выводов I, U). Ток утечки через измеряемый конденсатор не должен при этом превышать 0,2 мА.

При измерении емкости конденсаторов с подачей напряжения смещения следует учитывать , что постоянная времени заряда измеряемого конденсатора ориентировочно составляет $\tau = 3$ C, где C – емкость измеряемого объекта в миллифарадах, τ - в сек.

7.При нажатии кнопки "ПРЕДЕЛ" измеритель иммитанса производит автоматическое переключение пределов измерения с 1 по 8 и установку прибора в режим автоматического выбора предела измерения. Номер установленного предела и режим автоматического выбора индицируется при этом на дисплее прибора (1…8 А). Для установки требуемого предела измерения необходимо опустить кнопку "ПРЕДЕЛ" в тот момент времени, в который на дисплее высвечивается требуемый номер предела (или режим автоматического выбора предела).

При необходимости узнать номер установленного предела нужно нажать кнопку "ПРЕДЕЛ", считать номер предела и отпустить кнопку до момента изменения предела (около 1,5 с). Нахождение прибора в режиме ручной установки предела индуцируется зажиганием светодиодного указателя "ФИКС".

Если установленный вручную предел приводит к перегрузке измерительной цепи, на дисплее измерителя иммитанса появляется символ "ПРГР".

8.При измерении 3-зажимных объектов точку нулевого потенциала необходимо подключать к корпусному выводу УП-2.

При этом не рекомендуется проводить измерения объектов, шунтирующие импедансы (выводы) Z1 и Z2.

Полученные значения $\mathrm{tg}\delta$ и емкости образцов заносим в таблицу 9.3.

Относительную диэлектрическую проницаемость для трансформаторного масла и другой изоляции, при одном измерении емкости, определяем по формуле:

$$\varepsilon_r = \frac{C \cdot h}{\varepsilon_0 \cdot S},$$

где h - расстояние между электродами, м;

S - площадь электродов, $м^2$;

C - ёмкость, Ф.

ε_0 – электрическая постоянная, которая равна $8{,}854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Таблица 9.3 - Данные испытаний изоляционных материалов

Материал	Добротность, Q	tgδ	Ёмкость C, пФ	Расстояние между электродами, h см	Площадь электродов, S, $см^2$	Диэлектрическая проницаемость ε_r	Мощности рассеиваемая в диэлектрике, P,Вт
1. Совол							
2. Октол							
3. Кабельное масло							
4.Конденсаторное масло							
5.Трансформаторное масло							

При расчёте мощности рассеиваемой в диэлектрике использовать следующие данные (U=220В, f=50 Гц).

Содержание отчёта

1) Краткие теоретические сведения: схемы опытов; данные измерений и расчеты; выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1) Что называется диэлектрической проницаемостью?

2) Как зависит диэлектрическая проницаемость от температуры, частоты приложенного напряжения?

3) Диэлектрические потери - что это такое?

4) Физическая сущность диэлектрических потерь.

5) Какое влияние оказывает температура и влажность на угол диэлектрических потерь в жидких диэлектриках?

6) Функциональное назначение трансформаторного масла?

7) Функциональное назначение конденсаторного масла?

8) Что такое: "добротность изоляции" и о чём она свидетельствует?

Литература

1. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов – М.: Высшая школа, 2007. – 538с.
2. Степанчук Г.В. Электротехнические материалы: конспект лекций по дисциплине "Материаловедение"./Г.В. Степанчук, П.В. Гуляев – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2009. – 114 с.
3. Журавлева Л.В. Электроматериаловедение / Л.В. Журавлева. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. - 312с.
4. Электротехнические и конструкционные материалы / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюнин, и др.; под ред. В.А. Филикова. – М.: Издательский центр «Академия», 2007, - 280с.
5. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.1 Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. В.Г. Герасимова, А.Ф.Дьякова, Н.Ф. Ильинского и др. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 440с.
6. ГОСТ 21515-76. Материалы диэлектрические. Термины и определения. М., 2005. – 14с.

(назад)

Лабораторная работа № 10.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы Изучить методику определения основных характеристик магнитных материалов и провести исследования процессов намагничивания и перемагничивания ферромагнетиков в переменном магнитном поле.

10.1 Теоретические сведения

Основная причина возникновения у веществ магнитных свойств – внутренние скрытые формы движения электрических зарядов, представляющие собой элементарные круговые токи, обладающие магнитными моментами. Такими токами являются электронные спины и орбитальное вращение электронов в атомах.

Особые свойства ферромагнетиков обусловлены их доменным строением. Домены представляют собой макроскопические области, намагниченные практически до насыщения даже в отсутствии внешнего магнитного поля.

Основные характеристики, определяющие поведение ферромагнитных материалов в магнитном поле: основная кривая намагничивания, максимальное значение индукции B_m, остаточная индукция B_r, коэрцитивная сила H_c, удельные потери, магнитная проницаемость μ_r и ее зависимость от напряженности магнитного поля и температуры.

Зависимость магнитной индукции предварительно размагниченного ферромагнетика от напряженности магнитного поля, полученную при монотонном увеличении напряженности, называют начальной кривой намагничивания.

При циклическом перемагничивании изменение состояния ферромагнетика характеризуется явлением гистерезиса, при котором наблюдается отставание индукции от напряженности поля. Изменяя амплитудное значение напряженности внешнего поля, можно получить семейство петель гистерезиса. Петлю гистерезиса, полученную при индукции насыщений, называют предельной. При дальнейшем увеличении напряженности поля площадь пет-

ли гистерезиса остается неизменной. Совокупность вершин петель гистерезиса образуют основную кривую намагничивания ферромагнетика.

Напряженность размагничивающегося поля ($-H_c$), при которой индукция в ферромагнетике, предварительно намагниченном до насыщения, обращается в ноль, называется коэрцитивной силой.

Значение индукции при напряженности внешнего магнитного поля равной нолю, полученное в процессе размагничивания образца, намагниченного до насыщения, называется остаточной индукцией (B_r).

По кривой намагничивания можно определить параметр, характеризующий поведение ферромагнетика во внешнем магнитном поле, – относительную магнитную проницаемость:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \qquad (10.1)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м.

Относительная магнитная проницаемость пропорциональна тангенсу угла наклонной секущей, проведенной из начала координат через соответствующую точку на основной кривой намагничивания. Предельное значение магнитной проницаемости $\mu_н$ при напряженности магнитного поля, стремящейся к нолю, называется начальной магнитной проницаемостью.

Крутизну отдельных участков кривой намагничивания и ветвей петли гистерезиса характеризует дифференциальная магнитная проницаемость

$$\mu_{диф} = \frac{1}{\mu_0}\frac{dB}{dH} \qquad (10.2)$$

Процесс перемагничивания ферромагнетиков в переменном магнитном поле сопровождается потерями энергии, которые вызывают нагрев материала. В общем случае потери на перемагничивание состоят из потерь на гистерезис, на вихревые токи и на магнитное последействие. Потерями на магнитном последействие при проведении инженерных расчетов, как правило, пренебрегают. Полная мощность магнитных потерь пропорциональна площади

динамической петли гистерезиса. Площадь статической петли характеризует только потери на гистерезис.

10.2 Программа работы

10.2.1 Ознакомиться с инструкцией прибора ИСХ-1 (измеритель статических характеристик) и стенда С3-РМ01.

10.2.2 Определить кривую намагничивания магнитного материала при синусоидальном питающем напряжении.

10.2.3 Определить кривую намагничивания магнитного материала при пилообразном питающем напряжении.

10.2.4 Построить графически семейство петель гистерезиса при изменении величины питающего напряжения.

10.2.5 Сравнить полученные значения параметров с каталожными данными.

10.2.6 Сделать краткие выводы.

10.3 Техника безопасности при выполнении лабораторной работы

10.3.1 Измерение параметров ферромагнитных материалов проводить звеном не менее 2х человек.

10.3.2 При проведении опытов следует следить за правильностью подключения приборов.

10.4 Приборы и оборудование

Для изучения основных характеристик ферромагнитных материалов в данной лабораторной работе используется установка, принципиальная схема которой приведена на рис. 10.1. Исследуемый образец – магнитопровод Ш-образной формы имеет первичную обмотку с числом витков W_1 и вторичную обмотку с числом витков W_2.

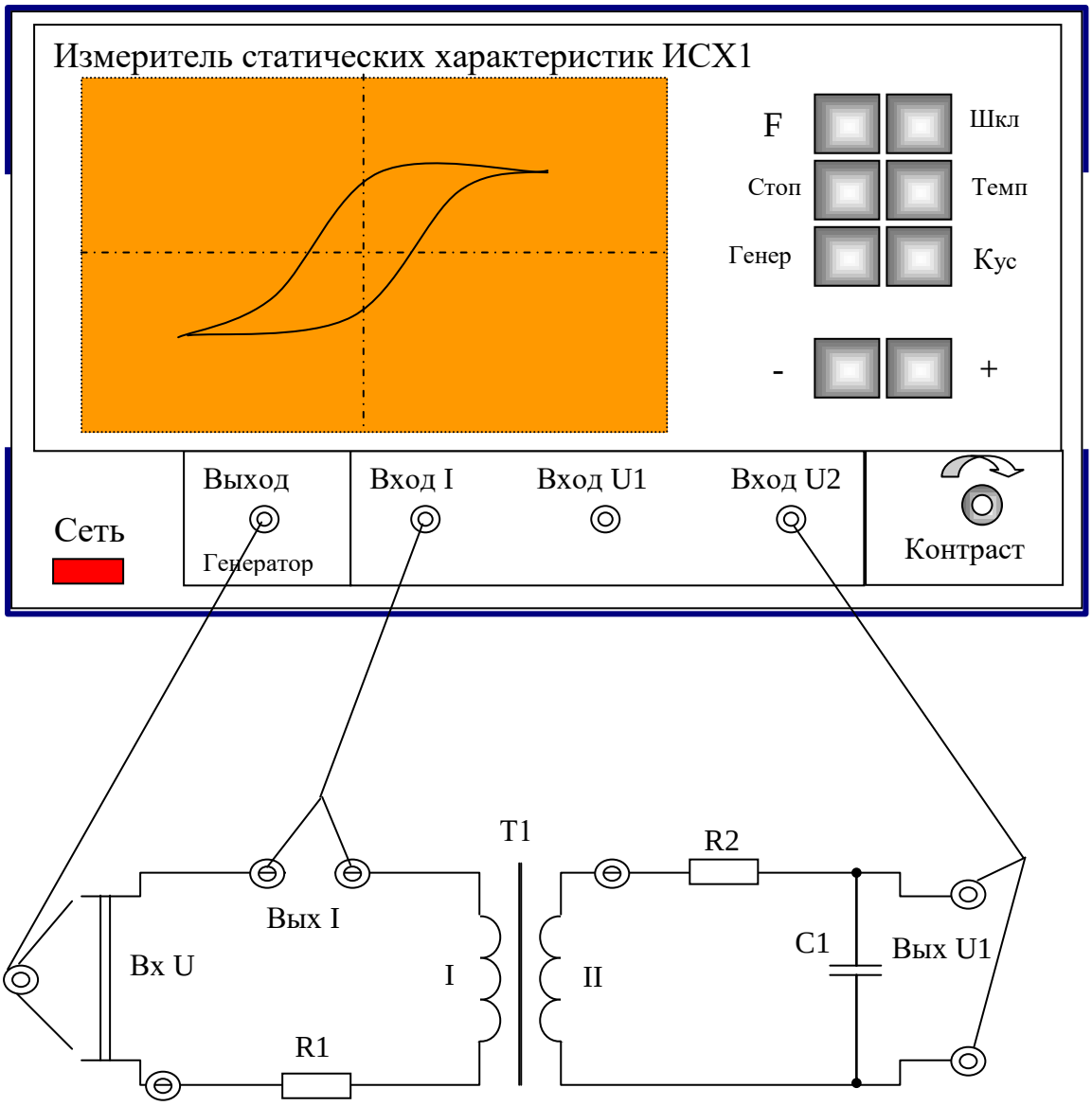


Рисунок 10.1. Электрическая схема испытательной установки

10.5 Выполнение работы

Первичные обмотки предназначены для создания переменного магнитного поля, намагничивающего сердечник. Они подключаются к регулируемому источнику переменного напряжения заданной частоты.

В соответствии с законом полного тока $\oint_l H_m dl = \sum I_{1M}$ для однородного образца с постоянным поперечным сечением величина напряженности определяется по формуле

$$H_m = \frac{\sqrt{2} I_1 W_1}{l} \qquad (10.3)$$

гдеI_1 - действующее значение тока в первичной обмотке, А;

W_1 - число витков в первичной обмотке;

l - средняя длина магнитной силовой линии, м.

Из формулы (10.3) следует, что напряженность поля пропорциональна значению тока, протекающего через первичную обмотку. Следовательно, подавая на горизонтальные пластины отклонения луча осциллографа величину падения напряжения на сопротивлении R_1, можно на экране зафиксировать величину напряженности магнитного поля на образце. Или при помощи прибора ИСХ 1 подключив токовый вход прибора (Вход I) к соответствующему разъёму на стенде С3-РМ01.

Для того чтобы на экране осциллографа была получена петля гистерезиса, на пластины вертикального отклонения луча необходимо подать напряжение, пропорциональное индукции магнитного поля в образце. В соответствии с законом электромагнитной индукции ЭДС индукции, возникающая во вторичной обмотке, определяется по формуле

$$e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt} \qquad (10.4)$$

Так как исследуемые образцы имеют постоянное поперечное сечение, то можно записать:

$$e_2 = -W_2 S \frac{dB}{dt} \qquad (10.5)$$

Следовательно, напряжение во вторичной обмотке пропорционально производной $\frac{dB}{dt}$. Для того чтобы подать на вход вертикального усилителя

осциллографа напряжение, пропорциональное индукции магнитного поля, необходимо между вторичной обмоткой и осциллографом включить интегрирующее звено. С этой целью ко вторичной обмотке подключена интегрирующая цепочка, состоящая из последовательно включенных сопротивления R_2 и емкости C_1. Значения емкостного сопротивления конденсатора C_1 и индуктивного сопротивления вторичной обмотки подобраны таким образом, чтобы они были значительно меньше значения активного сопротивления R_2. Благодаря этому ток во вторичной цепи можно условно считать число активным:

$$I_2 \approx \frac{e_2}{R_2} \qquad (10.6)$$

Напряжение на обкладках конденсатора C_1 , которое подается на пластины вертикального отклонения осциллографа (на вход U_2 измерителя ИСХ-1) , можно записать в виде

$$U_C = \frac{1}{C_1}\int i_2 dt = \frac{1}{R_2 C_1}\int l_2 dt\,. \qquad (10.7)$$

Подставляя значение $\boldsymbol{e_2}$ из уравнения (10.5), получим:

$$U_C = \frac{W_2 SB}{R_2 C_1} \qquad (10.8)$$

Следовательно, напряжение на конденсаторе C_1 пропорционально индукции магнитного поля в ферромагнитном образце.

Максимальное значение индукции B_m в образце определяется по формуле

$$B_m = \frac{U_2}{4{,}44\, f W_2 S} \qquad (10.9)$$

Таким образом, подавая одновременно на пластины горизонтального и вертикального отклонения луча осциллографа падение напряжения на сопротивление R_1 и конденсаторе C_1 , на экране получим в некотором масштабе петлю гистерезиса.

Масштаб петли гистерезиса определяется по крайним точкам изображения на экране осциллографа:

$$m_H = \frac{H}{l_H} : \quad m_B = \frac{B}{l_B}, \qquad (10.10)$$

где H - напряженность магнитного поля при данной величине тока в первичной обмотке, А/м;

$l_н$ - половина длины горизонтальной развертки, мм;

В - индукция при данной величине намагничивающего поля, Тл

l_B - половина длины вертикальной развертки, мм.

По масштабу изображения площади петли гистерезиса определяются удельные потери в образце:

$$P_{уд} = \frac{S m_n m_B f \cdot 10^{-3}}{\gamma}, \qquad (10.11)$$

гдеS - площадь петли гистерезиса, мм^2;

f - частота, Гц;

γ - удельный вес материала, г/см^3.

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему испытательной установки в соответствии с рис. 10.1.

2. Параметры образцов исследуемых материалов записать в табл. 10.1.

Т а б л и ц а 10.1- Параметры образцов магнитных материалов

Образец	Геометрические размеры и обмоточные данные				Максимальные токи и напряжения		Коэффициенты усиления		Плотность материала
	S_2, м^2	l, м	W_1, витков	W_2, витков	I_1, А	U_2, В	K_I	K_U	γ, г/см^3

4. Собрать схему показанную на рисунке 10.1.

5. Выбрать коэффициенты усиления по току и по напряжению, указанные в табл. 10.1.

6. В присутствии преподавателя включить питание испытательной установки и измерительных приборов. Время прогрева прибора 5-10 мин.

7. При нажатой кнопке $К_н$ регулятором установить в намагничивающей обмотке ток, необходимый для насыщения ферромагнетика. Величина тока для каждого образца не должна превышать значений, указанных в табл. 10.1.

8. Измерить величину напряжения на вторичной обмотке. Результаты измерений занести в табл. 10.2.

Таблица 10.2 - Результаты экспериментальных исследований параметров магнитных материалов.

Образец	Номер Измерения	Экспериментальные и расчетные параметры							
		I_1, А	U_2, В	H, А/м	B, Тл	$\mu_г$	$P_{уд}$ Вт/кг	$B_г$ Тл	$H_с$ А/м

9. С помощью коэффициентов усиления прибора ИСХ-1 отрегулировать изображение петли гистерезиса так, чтобы оно максимально заполняло экран.

10. По соответствующим формулам определить величины напряженности намагничивающегося поля H, амплитудные значения индукции в образце B и магнитной проницаемости μ. Результаты расчетов занести в табл. 10.2.

11. Переснять петлю гистерезиса с экрана осциллографа на миллиметровую бумагу и определить ее площадь.

12. Определить масштаб по оси напряженности магнитного поля $m_н$, используя формулу (10.10).

13. Определить масштаб по оси индукции $m_в$, используя формулу (10.10).

14. Определить величину удельных магнитных потерь, используя формулу (10.11). Результаты расчета записать в табл. 10.2.

15. Последовательно уменьшая амплитуду тока в намагничивающей цепи с помощью регулятора, повторить измерения по пп. 8 - 14 минимум для трех значений тока

16. По экспериментальным данным построить графики зависимости B=f(H); μ=f(H).

Содержание отчёта

1. Краткие теоретические сведения: схемы опытов; данные измерений и расчеты; выводы по проделанной работе.

2. Полученные экспериментальные и расчетные значения основных параметров исследуемых образцов сравнить со справочными данными.

3. Графики зависимости B=f(H); μ=f(H).

Контрольные вопросы

1) Назовите основные характеристики свойств магнитных материалов.

2) Опишите процесс намагничивания магнетика.

3) Приведите классификацию материалов по магнитным свойствам.

4) Назовите виды магнитных потерь и укажите факторы, оказывающие на них влияние.

5) Дайте характеристику свойств диамагнетиков и парамагнетиков.

6) Дайте характеристику свойств ферромагнетиков.

7) Опишите принцип работы экспериментальной установки для изучения явления гистерезиса.

8) Перечислите области использования магнитотвердых магнитомягких материалов.

Литература

1. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов – М.: Высшая школа, 2007. – 538с.
2. Степанчук Г.В. Электротехнические материалы: конспект лекций по дисциплине "Материаловедение"./Г.В. Степанчук, П.В. Гуляев – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2009. – 114 с.
3. Журавлева Л.В. Электроматериаловедение / Л.В. Журавлева. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. - 312с.

4. Электротехнические и конструкционные материалы / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюнин, и др.; под ред. В.А. Филикова. – М.: Издательский центр «Академия», 2007, - 280с.
5. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.1 Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. В.Г. Герасимова, А.Ф.Дьякова, Н.Ф. Ильинского и др. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 440с.
6. ГОСТ 21515-76. Материалы диэлектрические. Термины и определения. М., 2005. – 14с.
(назад)

Лабораторная работа №11.
ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Цель работы Изучение полупроводниковых материалов и изделий. Исследование зависимости изменения сопротивления полупроводниковых материалов от температуры.

11.1 Теоретические сведения

Полупроводники, вещества, характеризующиеся увеличением электрической проводимости с ростом температуры. Хотя часто **полупроводники** определяют как вещества с удельной электрической проводимостью в интервале от 10^{-8} до 10^{6} $Ом^{-1}$ $м^{-1}$, которая в сильной степени зависит от вида и количества примеси и структуры вещества, а также от внешних условий: температуры, освещения, внешних электрических и магнитных полей, облучения. и других факторов, способных изменять структуру вещества и состояние электронов.

Полупроводниковые свойства могут наблюдаться как в кристаллических веществах, так и в неупорядоченных системах - твердых аморфных веществах (стеклах) и жидкостях. При этом решающим является характер химической связи между частицами в ближнем порядке.

Существуют полупроводники с любым типом химической связи, кроме чисто металлической и чисто ионной (т.е. ковалентной, ковалентно-металлической, ковалентно-ионной и т.п.), причем ковалентная составляющая связи является обычно преобладающей. Широкое практическое применение получили полупроводники, являющиеся простыми веществами (Ge, Si и др.), а также химические соединения элементов III группы периодической системы с элементами V группы, например GaAs, GaP, InAs, CdTe и т.п. (бинарные полупроводники).

Такие вещества имеют кристаллическую решетку, подобную решетке алмаза, и называются алмазоподобными полупроводниками. В Ge и Si в кри-

сталлическом состоянии реализуется классическая двухэлектронная ковалентная связь, образованная перекрыванием гибридных орбиталей соседних атомов.

Повышение температуры, а также других внешних воздействий (облучение светом или сильное электрическое поле) могут вызвать разрыв ковалентной связи, ионизацию атомного остова и образование свободного электрона. Этот электрон в условиях непрерывного обмена валентными электронами между атомами кристалла может переходить из ячейки в ячейку и переносить с собой отрицательный заряд, который повсюду является избыточным, т.е. свободный электрон становится электроном проводимости. Недостаток электрона у разорванной ковалентной связи становится блуждающей по кристаллу дыркой, с которой связан единичный положительный заряд.

Электроны проводимости и дырки - два типа свободных носителей заряда в полупроводниках. В идеальных кристаллах полупроводника их концентрации равны. Электропроводность полупроводников, обусловленная электронами атомов данного вещества называется ***собственной проводимостью*** и определяется помимо концентрации носителей n их подвижностью μ-отношением скорости направленного движения, вызванного электрическим. полем (дрейфовой скоростью) $v_{др}$, к напряженности поля E:

$$\rho = e \cdot n \cdot \mu = \frac{e \cdot n \cdot v_{ДР}}{E} \qquad (11.1)$$

где e -элементарный электрический заряд.

n - концентрация носителей заряда,

μ – подвижность носителей заряда.

Подвижность носителей заряда в идеальном кристалле определяется процессами рассеяния электронов на тепловых колебаниях решетки, поэтому μ сильно зависит от температуры. При 300 ^{0}К подвижность носителей в твердых полупроводниках варьируется в широких пределах от 10^5 см^2/с до 10^{-3}

$см^2/с$ и меньше. В реальных кристаллах при пониженных температурах, как правило, преобладает рассеяние носителей на дефектах кристаллической структуры.

Примесная проводимость. В реальных кристаллах источниками свободных носителей заряда могут быть дефекты кристаллической структуры, например междоузельные атомы, вакансии, а также отклонения от стехиометрического состава. Примеси и дефекты делятся на доноры и акцепторы. Доноры отдают в объем полупроводника избыточные электроны, создавая электронную проводимость (*n*-типа). Акцепторы захватывают валентные электроны собственных атомов полупроводников, в результате чего образуются дырки и возникает дырочная проводимость (*p*-типа).

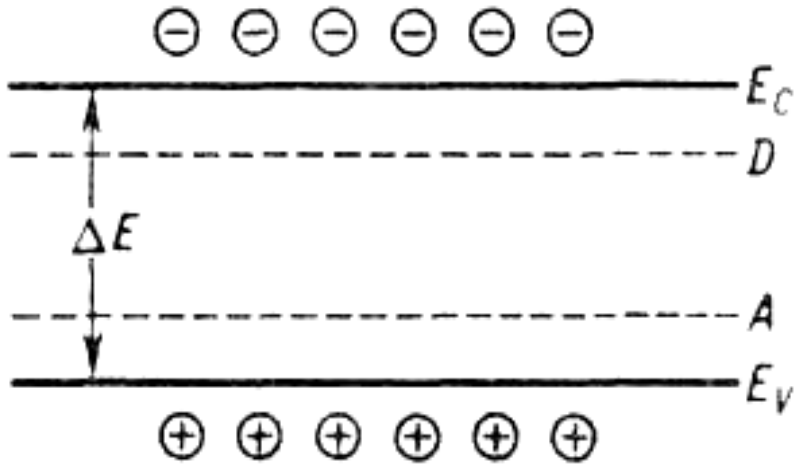
Типичными донорами в Ge и Si являются примесные атомы элементов V гр. (P, As, Sb). В узле кристаллической решетки 4 из 5 валентных электронов такого атома образуют ковалентные связи с соседними атомами Ge или Si, а 5-й электрон оказывается слабо связанным с примесным ионом. Энергия ионизации примеси мала (~0,01 эВ в Ge и 0,04 эВ в Si), поэтому уже при 77 К в полупроводниках появляются электроны проводимости в концентрации, определяемой содержанием примеси.

Аналогично атомы III гр. (B, Al, Ga, In)-типичные акцепторы в Ge и Si. Дырка, которая остается в месте захваченного примесью валентного электрона Ge или Si, очень слабо связана с примесным ионом и при не очень низких температурах легко превращается в свободный носитель заряда (носитель тока). Во многих бинарных полупроводниках типа $A^{IV}B^{VI}$ источниками дырок являются вакансии атомов A^{IV}, а вакансии B^{VI} - источниками электронов проводимости.

Электропроводность полупроводников, определяемая электронами примесных атомов, называется примесной проводимостью, а введение определенных примесей для получения полупроводников с различными требуемыми свойствами - ***легированием полупроводников***.

Зонная теория

Энергетические уровни электронов, участвующих в ковалентной связи, образуют верхнюю из заполненных разрешенных зон - ***валентную зону***. Следующая по энергии разрешенная зона, уровни которой не заполнены электронами, - ***зона проводимости***. Энергетический интервал между верхней E_c и нижней Ey зонами (валентной зоны и зоной проводимости) называется ***запрещенной зоной*** ΔE (рис.11.1).



E_c - граница зоны проводимости, E_V-граница валентной зоны, ΔE - ширина запрещенной зоны, D и A- соответственно донорные и акцепторные уровни.

Рисунок 11.1 – Зонная теория строения полупроводников.

Для различных полупроводников ширина запрещенной зоны меняется в широких пределах от ΔE = 0,165 эВ в PbSe до 5,6 эВ в алмазе (при Т=0 ^{0}К).

Тепловое движение переносит часть электронов в зону проводимости; в валентной зоне при этом появляются дырки - квантовые состояния, не занятые электронами. Как правило электроны занимают уровни, расположенные вблизи границы E_c зоны проводимости, а дырки-уровни, расположенные вблизи границы E_V валентной зоны. Расстояния от этих уровней значительно меньше ширины разрешенных зон. Локальные нарушения идеальности кристалла (примесные атомы, вакансии и др. дефекты) могут вызвать образование разрешенных локальных уровней энергии внутри запрещенной зоны.

При температурах вблизи 0 ^{0}К все собственные электроны полупроводника находятся в валентной зоне, полностью заполняя ее, а примесные электроны расположены вблизи примесей или дефектов, поэтому свободные носители заряда отсутствуют. С повышением температуры тепловое движение "забрасывает" в зону проводимости в основном электроны примесных атомов (доноров), так как энергия ионизации донора меньше ширины запрещенной зоны. Так как концентрация электронов в зоне проводимости при этом становится во много раз больше концентрации дырок в валентной зоне, то электроны называются основными носителями, а полупроводник называется ***n*-типа**, если основными носителями в полупроводнике являются «дырки», то полупроводник называется ***p*-типа**.

После полной ионизации всех доноров доминирующим процессом оказывается выброс из валентной зоны в зону проводимости собственных электронов. При некоторой температуре их концентрация в зоне проводимости становится сравнимой с концентрацией примесных электронов, а потом и во много раз большей. Это - температурная область собственной проводимости полупроводника, когда концентрации электронов n и дырок p практически равны.

Возникновение пары (электрон проводимости – дырка) называется генерацией носителей заряда. Обратный процесс называется рекомбинацией носителей заряда, приводящий к возвращению электрона проводимости в валентную зону и исчезновению дырки.

Рекомбинация носителей может сопровождаться выделением избыточной энергии в виде излучения, что лежит в основе полупроводниковых источников света и лазеров.

Электроны проводимости и дырки, возникновение которых явилось следствием тепловых флуктуации в условиях термодинамического равновесия, называются равновесными носителями заряда.

При наличии внешнего воздействия на полупроводники (освещение, облучение, наложение сильного электрического поля и.т.д.) может происхо-

дить генерация носителей заряда, приводящая к появлению избыточной их концентрации.

При появлении в полупроводнике избыточных носителей увеличивается рекомбинация т.е. захват электрона из зоны проводимости на примесный уровень в запрещенной зоне.

После исчезновения внешнего воздействия концентрация носителей приближается к равновесному значению.

_p-n_-переход в полупроводниках.

В объеме одного и того же полупроводника возможно создание двух областей с разными типами проводимости, например легированием донорной примесью (*p*-область) и акцепторной примесью (*n*-область). Т к. в *p*-области концентрация дырок выше, чем в *n*-области, происходит диффузия дырок из *p*-области (в ней остаются отрицательно заряженные акцепторные ионы) и электронов из *n*-области (в ней остаются положительно заряженные донорные ионы). На границе областей с *p*- и *n*- проводимостью образуется двойной слой пространств, заряда, и возникающая электрическая разность потенциалов препятствует дальнейшей диффузии основных носителей тока. В условиях теплового равновесия полный ток через *p*-*n*-переход равен нулю. Внешнее электрическое поле нарушает равновесие, появляется отличный от нуля ток через переход, который с ростом напряжения экспоненциально возрастает. При изменении знака приложенного напряжения ток через переход может изменяться в 10^5-10^6 раз, благодаря чему *p*-*n*-переход является вентильным устройством, пригодным для выпрямления переменного тока (полупроводниковый диод). На свойствах *p*-*n*-перехода основано применение **полупроводников** в качестве различного рода датчиков - температуры, давления, освещения, ионизирующих излучений и т.д.

Классификация полупроводников.

В соответствии с зонной теорией различие между полупроводниками и диэлектриками чисто количественное - в ширине запрещенной зоны. Условно считают, что вещества с $\Delta E > 2$ эВ являются диэлектриками, с $\Delta E < 2$ эВ -

полупроводниками. Столь же условно деление **полупроводников** на узкозонные (ΔE < 0,1 эВ) и широкозонные. Однако, один и тот же полупроводниковый материал в зависимости от внешних условий (температура и давление) может иметь различные свойства.

С повышением температуры и изменением концентрации свободных электронов характерная для **α-Sn** алмазоподобная структура переходит в структуру с более плотной упаковкой атомов, свойственной металлам. Аналогичный переход полупроводник-металл наблюдается при высокой температуре у Ge, Si и алмазоподобных бинарных **полупроводников**, которые при плавлении теряют полупроводниковые свойства.

Полупроводники также делятся на неорганические и органические.

Элементы, проявляющие полупроводниковые свойства в виде простых веществ, расположены компактной группой в периодической системе (в таблице 11.1 они выделены сплошной ломаной линией - ***граница Цинтля***).

Все они являются *p*-элементами, в атомах которых постепенно заполняются электронами *p*-орбитали. Собственная проводимость проявляется у веществ, структура которых допускает образование насыщенных (двухцентровых) ковалентных связей.

Таблица 11.1 - Граница Цинтля

Период	Группа				
	IIIa	IVa	Va	VIa	VIIa
2	B	C	N	O	F
3	Al	Si	P	S	Cl
4	Ga	Ge	As	Se	Br
5	In	Sn	Sb	Te	I
6	Tl	Pb	Bi	Po	At

В бинарных соединениях между элементами, расположенными левее границы Цинтля, и элементами, стоящими правее от нее, реализуются полярные

ковалентные связи. Обычно более электроотрицатательный атом называется "анионообразователем", более электроположительный - "катионообразователем". Эти соединения проявляют полупроводниковые свойства в том случае, если орбитали анионообразователя полностью заселены электронами.

Особую группу веществ, способных проявить полупроводниковые свойства, составляют соединения переходных металлов с элементами, расположенными справа от границы Цинтля. Эти соединения чрезвычайно многообразны по составу и свойствам.

Органические полупроводники принципиально отличаются от неорганических полупроводников. Все твердые неорганические полупроводники образуют координационные соединения, в то время как органические полупроводники - ***молекулярные кристаллы.***

Они так же, как и неорганические полупроводники, обладают положительным температурным коэффициентом проводимости, но механизм проводимости иной.

Проводимость в органических полупроводниках обеспечивается главным образом перескоками электронов между состояниями с разной энергией, причем дефицит энергии покрывается за счет энергии тепловых колебаний атомов - ***прыжковая проводимость***.

Различают четыре вида органических полупроводников:

1) низкомолекулярные соединения с конденсированными ароматическими ядрами: нафталин, антрацен, пирен, перилен и т.п. и их производные;

2) соединения, содержащие помимо конденсированных ароматических ядер открытоцепные участки (красители и пигменты типа хлорофилла, β-каротина);

3) полимерные материалы (полиэтилен, биополимеры);

4) молекулярные комплексы с переносом заряда, в которых проводимость осуществляется путем перехода электрона от молекулы-донора к молекуле-акцептору (комплексы ароматических соединений с галогенами).

11.2 Программа работы

11.2.1 Изучить неорганические полупроводниковые материалы.

11.2.2 Изучить полупроводниковые изделия.

11.2.3.Снять зависимость изменения сопротивления полупроводниковых материалов (германия, кремния) от температуры.

11.2.4 Рассчитать удельное сопротивление.

11.2.5 Построить зависимость удельного сопротивления материалов от температуры.

11.2.6 Рассчитать температурный коэффициент сопротивления.

11.3 Техника безопасности

11.3.1 Не включать электрические установки без разрешения преподавателя.

11.3.2 После подачи напряжения не касаться проводов даже если они изолированы.

11.3.3 По окончании испытания все установки должны быть отключены.

11.4 Приборы и оборудование

Для исследования зависимости сопротивления полупроводников с изменением температуры используются образцы германия и кремния различного сечения. Прибор – измеритель электропроводности ИЭП-1 (рисунок 11.2) для изменения омического сопротивления и температуры.

11.5 Порядок выполнения работы

11.5.1 Образец с полупроводниковыми материалами помещается в измерительную камеру. Кнопкой «сеть» прибор включается в работу.

Измерение необходимо проводить: по каналу 1 для левого образца и по каналу 2 для правого образца. На индикаторе находящемся верхнем левом углу высветится измеренное значение параметра (сопротивления). Если измеренное значение меньше измеряемого диапазона, то на индикаторе высве-

тится символ **L**, в этом случае необходимо нажать кнопку “ – “. Если измеренное значение больше измеряемого диапазона, то на индикаторе высветится символ **H**, в этом случае необходимо нажать кнопку “ + “.

Для снятия зависимости изменения параметра от температуры, необходимо выставить заданную температуру при помощи кнопок “ + “и “ – “ на панели температура. Однократное нажатие любой из этих кнопок показывает заданное значение температуры, двойное нажатие кнопок приводит к изменению заданного значения с шагом 5^0C. Индикатор температуры в правом верхнем углу показывает текущее значение температуры.

11.5.2 Измерение сопротивлений первого и второго образцов проводить через 10÷15°C до температуры 90°C, результаты измерений занести в таблицу 4.7.

11.5.3 Построить графики зависимости R=f(T), ρ=f(T).

11.5.4. Определить сопротивление материалов при 0°C, графически.

11.5.5 Сравнить полученные значения удельных сопротивлений с табличными.

Таблица 11.2 – Сводные данные расчета удельного сопротивления полупроводников

№№ п/п	Материал	Сечение образца	Длина образца	t	$R_{изм}$	Удельное сопротивление	Температурный коэффициент сопротивления
1	Германий	$мм^2$	м	°C	Ом	Ом·м	α_ρ
				20			
				30			
				40			
				50			
				…			
				90			



Рисунок 11.2 – Внешний вид измерителя электропроводности ИЭП-1

Температурный коэффициент сопротивления полупроводников рассчитывается по той же формуле что и для проводников формуле:

$$\alpha(TK_{\rho}) = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta t}, \qquad (11.2)$$

где ΔR - разность сопротивлений, $\Delta R=R_2-R_1$;

R_2 - сопротивление полупроводника, Ом при температуре t_2, °С;

R_1 - сопротивление полупроводника при начальной температуре t_1, Ом;

Δt - разность температур t_1, t_2.

Удельное сопротивление полупроводника определяется по формуле:

$$\rho_{t_2} = \rho_{t_1} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t), \qquad (11.3)$$

где Δt - повышение температуры;

ρ_t - удельное сопротивление при температуре t_2, Ом·м;

ρ_{t_1} - удельное сопротивление при температуре t_1, Ом·м.

α (T_{Kp}) - температурный коэффициент сопротивления;

Содержание отчета

В отчете должны быть приведены:

1) Краткое содержание теоретических сведений по полупроводниковым материалам и изделиям.

2) Данные измерений и расчетов параметров.

3) Графики зависимостей $\rho = f_1(t)$, $R_2 = f_2(t)$.

4) Выводы по работе.

Контрольные вопросы

1) В каком диапазоне находится удельная проводимость полупроводников.

2) Зонное строение полупроводника.

3) От каких факторов зависит удельная электрическая проводимость полупроводников?

4) Как влияют донорные, примеси на удельную электрическую проводимость полупроводников?

5) Как влияют акцепторные примеси на удельную электрическую проводимость полупроводников?

6) Что такое рекомбинация носителей зарядов игде этот эффект используется в электротехнике.

Литература

1. Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов – М.: Высшая школа, 2007. – 538с.

2. Степанчук Г.В. Электротехнические материалы: конспект лекций по дисциплине "Материаловедение"./Г.В. Степанчук, П.В. Гуляев – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2009. – 114 с.
3. Журавлева Л.В. Электроматериаловедение / Л.В. Журавлева. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. - 312с.
4. Электротехнические и конструкционные материалы / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюнин, и др.; под ред. В.А. Филикова. – М.: Издательский центр «Академия», 2007, - 280с.
5. Органические полупроводники, 2 изд., М., 1968; Горюнова Н.А., Химия алмазоподобных полупроводников, Л., 1963; Угай Я. А., Введение в химию полупроводников, 2 изд., М., 1975.
6. Буров Л.И., Стрельченя В.М. Физика от А до Я: учащимся, абитуриентам, репетиторам. — Мн.: Парадокс, 2000. — С. 219-228.

(назад)

Лабораторная работа № 12.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Цель работы Изучение влияния температуры на магнитные свойства ферромагнитных материалов.

12.1 Теоретические сведения

Ферриты — это магнитные материалы, представляющие собой смесь окислов металлов и обладающие ферромагнетизмом. Магнитомягкие ферриты — это ферриты с коэрцитивной силой по индукции не более 4 кА/м.

Одним из основных достоинств ферритов является высокое удельное электрическое сопротивление в сочетании с достаточно высоким значением магнитной проницаемости; индукция насыщения ферритов меньше, чем металлических магнитных материалов. Особенно выгодно применение их на высоких частотах при малых индукциях. По электрическим свойствам ферриты представляют собой полупроводники, проводимость которых возрастает с повышением температуры. Эффективная удельная электрическая проводимость ферритов увеличивается с возрастанием частоты. На низких частотах ферриты обладают высокой относительной диэлектрической проницаемостью примерно 10^5. Одновременно высокое значение относительных магнитной μ и диэлектрической ε проницаемостей может приводить к нежелательному объемному резонансу. При объемном резонансе потери резко возрастают, а магнитная проницаемость уменьшается. Для сердечников из марганец-цинковых ферритов с поперечным сечением 1 см² $\varepsilon \approx 10^5$ частота объемного резонанса приблизительно равна 1 МГц.

При применении ферритов необходимо учитывать их эксплуатационные характеристики.

Область применения каждой марки феррита определяется критической частотой, выше которой резко возрастают потери и снижается магнитная проницаемость. Магнитные свойства ферритов резко меняются при одновременном наложении постоянных и переменных полей. Кроме того, после воздействия таких полей имеет место остаточный магнитный эффект, поэтому сердечники не рекомендуется подвергать намагничиванию полями, превышающими рабочие поля.

Механические свойства ферритов подобны свойствам керамических изделий: их режут алмазным инструментом; они хорошо шлифуются и полируются; склеивают их клеем Для ферритов, с точки зрения прочности, самыми опасными видами деформации являются растяжение и изгиб. Предел прочности ферритовых материалов при растяжении $(1\text{-}2)\cdot10^4$ кПа, при изгибе — в 2…2,5 раза больше, а при сжатии — в 10…15 раз больше, чем при растяжении.

Механические и теплофизические характеристики ферритов имеют следующие ориентировочные значения: модуль Юнга $(0{,}45…2{,}15)\cdot10^8$ кПа; модуль сдвига $(0{,}43…7{,}4)\cdot10^7$ кПа; коэффициент Пуассона 0,22…0,40; удельная теплоемкость ферритов приблизительно равна $(0{,}6…0{,}9)\cdot10^3$ Дж/(кг·К), коэффициент теплопроводности приблизительно равен (2,8…5,7) Вт/(м·К), коэффициент линейного расширения приблизительно равен $(5…10)\cdot10^{-6}$ 1/град.

При кратковременном воздействии повышенной и пониженной температур и при температурных циклах могут быть остаточные изменения магнитной проницаемости.

При увлажнении ферритов более чем на 5% могут незначительно возрасти магнитные потери на средних и высоких частотах из-за изменения электропроводности ферритов и диэлектрических потерь. При использовании ферритов с обмоткой на частотах 3МГц и более изменение диэлектрических характеристик при увлажнении вызывает изменение электромагнитных параметров из-за изменения собственной емкости и ее потерь. Вследствие этого

при использовании ферритов на частотах свыше 3 МГц в условиях повышенной влажности рекомендуется применять герметизацию.

При радиационном облучении ферритов изменение электромагнитных параметров существенно только при облучении интегральным потоком нейтронов с интенсивностью выше $1 \cdot 10^5$ нейтронов/см². Под воздействием гамма-нейтронного облучения магнитная проницаемость ферритов уменьшается, особенно у марганец-цинковых ферритов.

Ферриты обладают временной нестабильностью магнитной проницаемости, которая проявляется в спаде значения магнитной проницаемости при длительном воздействии положительных температур или длительном хранении.

Ферритовые сердечники характеризуются значением эффективной магнитной проницаемости и тангенсом угла магнитных потерь.

Классификация ферритов по применению

Ферриты общего применения

Группа ферритов общего применения (группа 1) включает марки 1000НМ, 1500НМ, 2000НМ, 3000НМ, изготавливаемые на основе марганец-цинковых ферритов, и марки 100НН, 400НН, 400НН1, 600НН, 1000НН, 2000НН, изготавливаемые на основе никель-цинковых ферритов. Объединяющим признаком этой группы материалов является их принадлежность к высокочастотным магнитомягким ферритам, а определяющим — установление норм только на величины начальной магнитной проницаемости и тангенса угла магнитных потерь.

Изделия из ферритов этой группы нашли широкое применение в целом ряде областей техники и выпускаются в виде деталей разнообразных конфигураций и размеров (Ш-, Е-, П- образные и броневые сердечники, пластины, стержни, трубки и т.п.). Их широко применяют в слабых и сильных полях в диапазоне частот до 30МГц в трансформаторах, дросселях, магнитных ан-

теннах и другой аппаратуре, где нет особых требований к температурной и временной стабильности.

В таблице 12.1 приведены основные электромагнитные параметры ферритов общего применения.

Таблица 12.1 - Основные электромагнитные параметры ферритов I группы.

Марка феррита	$\mu_н$		$(tg\delta_\mu/\mu_н)\times10^6$ не более, при		f, МГц
	номинальное значение	предельное отклонение	Ha, А/м		
			0,8	8	
100НН	100	±20	125	-	7
400 НН	400	+100 -50	18	50	0,1
400НН1	400	±80	12	25	
600НН	600	+200 -100	22	75	
1000НН	1000	±200	50	150	
1000НМ	1000	±200	15	45	
1500НМ	1500	±300	15	45	
2000НН	2000	+400 -20	85	270	
2000НМ	2000	+500 -300	15	45	
3000НМ	3000	±20	35	60	

Получение ферритов.

Ферриты получают в виде керамики и монокристаллов. Благодаря невысокой стоимости и относительной простоте технологического цикла керамические материалы занимают ведущее место среди высокочастотных магнетиков.

При изготовлении ферритовой керамики в качестве исходного сырья наиболее часто используют окислы соответствующих металлов. Общая технологическая схема производства ферритов во многом аналогична схеме производства радиокерамики. Однако при получении материалов с заданными магнитными свойствами предъявляются более жесткие требования к исходному сырью в отношении его химической чистоты, степени дисперсности и химической активности. В отличие от электрорадиокерамики ферритовая

керамика совершенно не содержит стекловидной фазы; все процессы массопереноса при синтезе соединения и спекания изделий происходят лишь за счет диффузии в твердой фазе.

Исходные окислы подвергают тщательному измельчению и перемешиванию в шаровых или вибрационных мельницах тонкого помола, а затем после брикетирования или гранулирования массы осуществляют предварительный обжиг с целью ферритизации продукта, т.е. образования феррита из окислов. Ферритизованный продукт вновь измельчают и полученный таким образом ферритовый порошок идет на формовку изделий. Предварительно его пластифицируют, причем в качестве пластификатора обычно используют водный раствор поливинилового спирта.

Формование изделий наиболее часто осуществляют методом прессования в стальных пресс-формах. Высокой производительностью формовки отличается также метод горячего литья под давлением. В этом случае в качестве пластифицирующего и связующего веществ применяют парафин.

Отформованные изделия подвергают спеканию при температуре 1100-1400 °С в контролируемой газовой среде. Контроль газовой среды особенно необходим на стадии охлаждения, чтобы предотвратить выделение побочных фаз. Наибольшей чувствительностью к изменению давления кислорода характеризуются ферриты марганца и твердые растворы на их основе. В процессе спекания завершаются химические реакции в твердой фазе, устраняется пористость, фиксируется форма изделий. За счет процесса рекристаллизации материал приобретает определенную зёренную структуру, которая существенно влияет на магнитные свойства керамики.

12.2 Программа работы

12.2.1 Ознакомиться с инструкцией приборов Е7 – 15

12.2.2 Измерить «$\mathrm{tg}\delta$» и индуктивность «L» образцов ферритов.

12.2.3 Расчётным путём определить магнитную проницаемость

исследуемых образцов ферритов.

12.2.4 Сравнить полученные значения параметров с каталожными данными.

12.2.5 Сделать краткие выводы.

12.3 Техника безопасности при выполнении лабораторной работы

12.3.1 Измерение параметров жидких изоляционных материалов проводить звеном не менее 2х человек.

12.2 При замене образцов следует следить за правильностью подключения приборов.

12.4 Приборы и оборудование

Для измерения индуктивность дросселей намотанных на ферритовый магнитопровод и расчета магнитной используется универсальный прибор "Измеритель имитанса" Е 7-15.

Для определения зависимости изменения магнитной проницаемости и тангенса угла магнитных потерь при изменении температуры используется универсальный измеритель ЛСМ1

12.5 Выполнение работы

12.5.1 Инструкция работы с прибором Е7 - 15.

Передняя панель прибора показана на рисунке 12.1

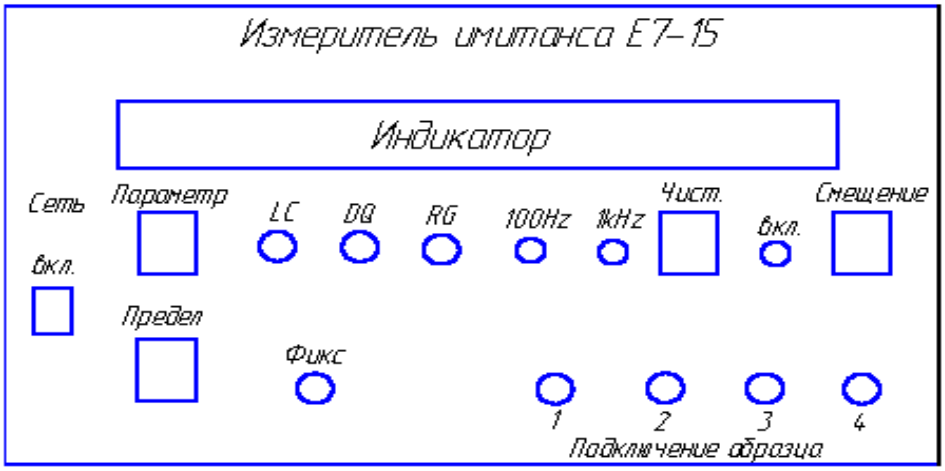


Рисунок 12.1 –Внешний вид панели прибора Е7-15

Измеритель иммитанса (параметра цепей) может измерять активные и реактивные параметры, измеряемых объектов по параллельной (1-4 пределах измерения) или последовательно (5-8 пределах измерения) эквивалентной схеме. Относительные параметры измеряются в форме фактора потерь Д или добротности Q.

Для проведения измерения достаточно подключить измеряемый объект к зажимам УП-2 и установить при помощи кнопок передней панели нужный режим измерения. Нажатием кнопки "Параметр" можно установить прибор в режим измерения реактивной составляющей иммитанса (L или C), активной (R или G) или в режим измерения относительного параметра (Д или Q). Конкретная форма компонента иммитанса выбирается прибором автоматически в соответствии с таблицей 12.2.

Таблица 12.2 – Конкретная форма компоненты

Пределы измерения	Составляющая иммитанса объекта измерения	Формула представления результата
1 - 4	C L > L пред. L < L пред. R > R пред. R < R пред.	C - C L G R
5 - 8	L C > C C < C R	L - L C R
1 - 8	Д > 2 Д < 2	Д G

Кнопкой "ЧАСТОТА" установить требуемую частоту измерения 100 Гц или 1 кГц.

При нажатии кнопки "ПРЕДЕЛ" измеритель иммитанса производит автоматическое переключение пределов измерения с 1 по 8 и установку прибора в режим автоматического выбора предела измерения. Номер установленного предела и режим автоматического выбора индицируется при

этом на дисплее прибора (1…8 А). Для установки требуемого предела измерения необходимо опустить кнопку "ПРЕДЕЛ" в тот момент времени, в который на дисплее высвечивается требуемый номер предела (или режим автоматического выбора предела).

При необходимости узнать номер установленного предела нужно нажать кнопку "ПРЕДЕЛ", считать номер предела и отпустить кнопку до момента изменения предела (около 1,5 с). Нахождение прибора в режиме ручной установки предела индуцируется зажиганием светодиодного указателя "ФИКС".

Если установленный вручную предел приводит к перегрузке измерительной цепи, на дисплее измерителя иммитанса появляется символ "ПРГР".

Полученные значения $\mathrm{tg}\delta$ и индуктивности образцов заносим в таблицу 12.3.

Магнитную проницаемость для сердечника дросселя определяем через формулу для расчёта индуктивности дросселя:

$$L = \frac{W^2 \cdot \mu_H \cdot \mu_O \cdot S}{l_C}$$

где W - Число витков в катушке, шт;

S - площадь поперечного сечения магнитопровода, м^2;

l_C - длина силовой линии магнитопровода, м.;

$\mu_н$ – магнитная проницаемость, Г/м.;

μ_0 – магнитная постоянная, которая равна $125 \cdot 10^{-8}$ Г/м.

Таблица 12.3 - Данные испытаний изоляционных материалов

Материал	Добротность, Q	$tg\delta_\mu$	Индуктивность L, Гн	Длина силовой линии, l_C, м	Число витков в катушке W, шт	Площадь поперечного сечения,S, м^2	Магнитная проницаемость $\mu_н$, Г/м.
1. Феррит марки 2000НМ							

Для определения зависимости изменения $tg\delta_{\mu}$ и магнитной проницаемости исследуемых образцов ферритов при изменении температуры используется универсальный прибор "Измеритель LC" ЛСМ1.

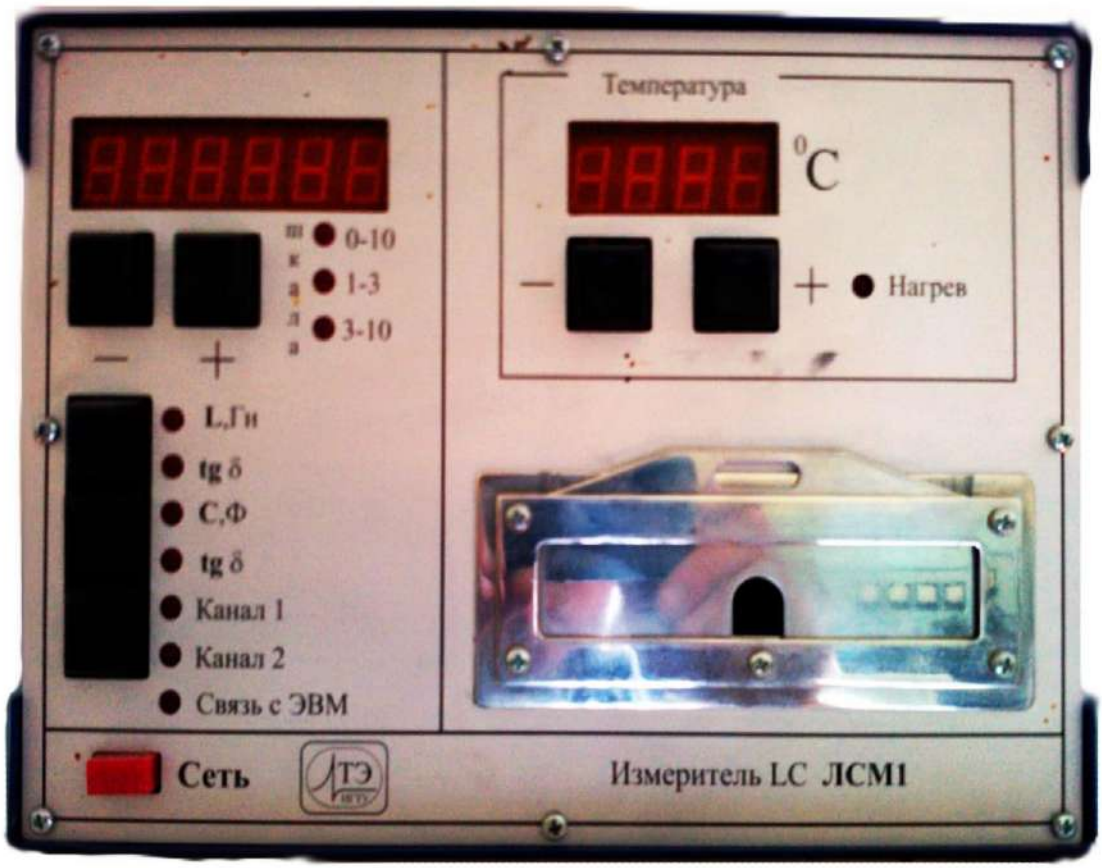


Рисунок 12.2 – Внешний вид измерителя LC ЛСМ 1

Образец диэлектрического материала помещается в измерительную камеру. Кнопкой «сеть» прибор включается в работу. Соответствующими кнопками на панели выбирается измеряемый параметр L или tgδ, при этом напротив измеряемого параметра загорится индикационный светодиод.

Измерение необходимо проводить по каналу 1. На индикаторе находящемся верхнем левом углу высветится измеренное значение параметра. Если измеренное значение меньше измеряемого диапазона, то на индикаторе высветится символ **L**, в этом случае необходимо нажать кнопку “ – “. Если из-

меренное значение больше измеряемого диапазона, то на индикаторе высветится символ **Н**, в этом случае необходимо нажать кнопку “ + “.

Для снятия зависимости изменения параметра от температуры, необходимо выставить заданную температуру при помощи кнопок “ + “и “ – “ на панели температура. Однократное нажатие любой из этих кнопок показывает заданное значение температуры, двойное нажатие кнопок приводит к изменению заданного значения с шагом 5^0С. Индикатор температуры в правом верхнем углу показывает текущее значение температуры.

Полученные значения $\mathrm{tg}\delta$, индуктивность и температуру заносятся в таблицу 12.4.

Магнитную проницаемость определяем расчётным путём

Таблица 12.4 - Данные испытаний параметров ферромагнитных материалов при изменении температуры

Температура / Материал	25	30	35	40	45	50	55	60	65	…	105
$tg\delta_{\mu}$											
Индуктивность L, Г											
Магнитная проницаемость $\mu_н$ Г/м											

Содержание и форма отчёта

Отчет должен содержать:

1. Краткие теоретические сведения;
2. Схемы опытов;
3. Данные измерений и расчеты;
4. Графики зависимостей $\mu_н = f(T)$, $tg\delta_{\mu} = f(T)$;

5. Выводы по результатам проведенных лабораторных опытов и расчетов: анализ зависимостей $\mu_н = f(T)$, $tg\delta_\mu = f(T)$.

Контрольные вопросы

1. Область применения ферромагнитных материалов.
2. Тангенс угла магнитных потерь?
3. Технология изготовления ферритов?
4. Влияние влажности на магнитную проницаемость ферритов?
5. Влияние механических воздействий на магнитную проницаемость ферритов?
6. Магнитотвёрдые ферриты (область применения)?
7. Ферриты марки ППР?

Литература

6.Колесов С.Н. Материаловедение и технология конструкционных материалов / С.Н. Колесов, И.С. Колесов – М.: Высшая школа, 2007. – 538с.

7.Степанчук Г.В. Электротехнические материалы: конспект лекций по дисциплине "Материаловедение"./Г.В. Степанчук, П.В. Гуляев – Зерноград: ФГОУ ВПО АЧГАА, 2009. – 114 с.

8.Журавлева Л.В. Электроматериаловедение / Л.В. Журавлева. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. - 312с.

9.Электротехнические и конструкционные материалы / В.Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.М. Матюнин, и др.; под ред. В.А. Филикова. – М.: Издательский центр «Академия», 2007, - 280с.

10.Электротехнический справочник: В 4 т. Т.1 Общие вопросы. Электротехнические материалы / Под общ. ред. В.Г. Герасимова, А.Ф.Дьякова, Н.Ф. Ильинского и др. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 440с.

6. ГОСТ 21515-76. Материалы диэлектрические. Термины и определения. М., 2005. – 14с.

(назад)

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

Задание № 1

Определить температурный коэффициент линейного расширения α_l и удлинение Δl проволоки, если при повышении температуры от t_1 до t_2 электрическое сопротивление её изменяется от R_1 до R_2. Длина проволоки при начальной температуре равна l_1. Температурный коэффициент удельного сопротивления материала α_ρ.

Последовательность решения:

$$\alpha_R = (R_2 - R_1) / (R_1(T_2 - T_1)),$$

где α_R – температурный коэффициент сопротивления проволоки, $К^{-1}$;

T_1, T_2 – температура в градусах Кельвина ($T = t + 273$), К.

$$\alpha_l = \alpha_\rho - \alpha_R,$$

где α_ρ – температурный коэффициент удельного сопротивления, $К^{-1}$.

$$\Delta l = l_1 \alpha_l (T_2 - T_1).$$

Задание № 2

Сопротивление металлического проводника при температуре t_1 равно R_1. Определить температуру проволоки t_2, если при её включении под напряжение U, если в установившемся режиме в ней протекает ток I. Темпе-

ратурный коэффициент удельного сопротивления при температуре t_1 равен α_ρ . Принять, что температурный коэффициент сопротивления $\alpha_R = \alpha_\rho$.

Последовательность решения:

С учетом линейной зависимости сопротивления металлического проводника от температуры можно записать:

$$R_2 = R_1(1+ \alpha_R (T_2 - T_1)),$$

где R_2 – сопротивление при температуре T_2 , Ом.

Учитывая, что $R_2 = U/I$, определяем изменение температуры ΔT и температуру T_2 :

$$\Delta T = T_2 - T_1 = (R_2 - R_1)/(R_1 \alpha_R); \qquad T_2 = T_1 + \Delta T.$$

Задание № 3

Определить площадь поперечного сечения S проводника плавкого предохранителя, рассчитанного на предельный ток I , если удельное сопротивление материала проводника ρ, его плотность d , а температура плавления $t_{пл}$. Теплоотводом во внешнюю среду пренебречь, начальная температура предохранителя равна t_o.

Последовательность решения:

Теплота, выделяющаяся в материале предохранителя, идет на повышение его температуры, поэтому:

$$I^2 R_n = \rho\, l\, I^2 / S = c\, l\, S\, d\, \Delta T,$$

где R_n - сопротивление проводника, Ом;

c – удельная теплоемкость материала проводника, Дж/(кг К);

l – длина проводника, м;

ΔT – разность температур, К.

Удельная теплоемкость материала проводника вблизи температуры плавления определяется теплоемкостью кристаллической решетки $c_{кр}$, поэтому:

$c = c_{кр} = 3R/A$, Дж/(кг*К),

где A – атомная масса, кг/моль;

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль*К).

С учетом последнего выражения получаем:

$$S = \sqrt{\frac{\rho I^2 A}{3 R d \Delta T}}.$$

Задание № 4

Нормально вектору напряженности однородного электрического поля E_0 расположена пластина изотропного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью ε. Определить:

- напряженность поля E и электрическое смещение (электрическую индукцию) D внутри пластины;
- поляризованность диэлектрика P и поверхностную плотность связанных зарядов σ.

Последовательность решения:

Среднее макроскопическое электрическое поле $\boldsymbol{E}$ в диэлектрике в $\boldsymbol{\varepsilon}$ раз меньше внешнего: $\boldsymbol{E=E_0/\varepsilon}$.

Для большинства диэлектриков поляризованность пропорциональна напряженности поля:

$\boldsymbol{P = \varepsilon_0 (\varepsilon-1)E}$, Кл/м^2,

где $\boldsymbol{\varepsilon_0 = 8{,}854\cdot 10^{-12}}$ – электрическая постоянная, Ф/м.

В изотропных диэлектриках векторы напряженности электрического поля и поляризованности совпадают по направлению, а электрическое смещение определяется выражением:

$\boldsymbol{D = \varepsilon_0 E+P}$

Поляризованность однородного плоского диэлектрика в равномерном электрическом поле равна поверхностной плотности связанных зарядов:

$\boldsymbol{\sigma = P}$.

Задание № 5

Вычислить поляризованность монокристалла соли, считая, что смещение ионов $\boldsymbol{\Delta x}$, под действием электрического поля от положения равновесия, составляет 1% от расстояния между ближайшими соседними ионами. Элементарная ячейка кристалла имеет форму куба, расстояние между соседними ионами $\boldsymbol{\alpha}$.

Последовательность решения:

Поляризованность диэлектрика $\boldsymbol{P}$ численно равна отношению электрического момента $\boldsymbol{dp}$ элемента диэлектрика к объему $\boldsymbol{dV}$ этого диэлектрика:

$$\boldsymbol{P = dp / dV}$$

Учитывая, что $\boldsymbol{dV = \alpha^3}$, можно записать:

$$\boldsymbol{dp = q\Delta x},$$

где $\boldsymbol{q}$- заряд иона, равный заряду электрона ($\mathbf{1{,}602*10^{-19}}$ Кл);

$\boldsymbol{\Delta x}$- смещение ионов под действием поля, м.

Поэтому: $\boldsymbol{P = q\Delta x / \alpha^3}$.

Задание № 6

Между пластинами плоского конденсатора без воздушных промежутков зажат лист гетинакса толщиной $\boldsymbol{h}$. На конденсатор подано напряжение $\boldsymbol{U}$. Определить поверхностную плотность заряда на пластинах конденсатора $\boldsymbol{\sigma_1}$ и на диэлектрике $\boldsymbol{\sigma_д}$. Материал имеет диэлектрическую проницаемость $\boldsymbol{\varepsilon}$.

Последовательность решения:

Вследствие поляризации диэлектрика при подключенном источнике постоянного напряжения на пластинах конденсатора удерживается дополнительный заряд $\boldsymbol{\sigma_{д.}}$.

Поэтому: $\boldsymbol{\sigma_1 = \sigma_д + \sigma_0}$,

где $\boldsymbol{\sigma_0 = \varepsilon_0 E}$ - поверхностная плотность заряда на пластинах конденсатора в отсутствие диэлектрика, Кл/м^2.

Тогда:

$\sigma_1 = \varepsilon_0 \varepsilon E = \varepsilon_0 \varepsilon U/h$; $\sigma_д = P = \varepsilon_0 \varepsilon E - \varepsilon_0 E$.

Задание № 7

Две противоположные грани куба с ребром α из диэлектрического материала с удельным объемным сопротивлением ρ_v и удельным поверхностным сопротивлением ρ_s покрыты металлическими электродами . Определить ток, протекающий через эти грани куба при постоянном напряжении U_0.

Последовательность решения:

Электрический ток протекает как через объем куба, так и по поверхности четырех боковых граней. Поэтому сопротивление между электродами определяется параллельным соединением объемного сопротивления и поверхностных сопротивлений четырех граней. Тогда:

- объемное сопротивление:

$R_v = \rho_v \alpha / \alpha^2 = \rho_v / \alpha$;

- поверхностное сопротивление:

$R_{s1} = R_{s2} = R_{s3} = R_{s4} = \rho_s$

- сопротивление между электродами:

$R_{из} = R_v R_{s1} / (R_{s1} + 4R_v)$

- ток, протекающий через грани куба:

$I = U_0 / R_{из}$.

Задание № 8

При повышении температуры от t_1 до t_2, ^oC удельное сопротивление диэлектрика уменьшается от ρ_1 до ρ_2. Определить температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ, считая его постоянным в рассматриваемом диапазоне температур. При этом же допущении найти удельное сопротивление материала ρ_0 при комнатной температуре t_0.

Последовательность решения:

Постоянство температурного коэффициента удельного сопротивления предполагает экспоненциальную зависимость $\rho(T)$.

$$\rho = Ae^{\alpha_\rho / T},$$

где A – постоянная для данного материала;

T – температура, К.

Отсюда следует:

$$\alpha_\rho = \frac{1}{T_2 - T_1} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1}; \qquad \rho_0 = \rho_1 e^{\alpha_\rho (T_0 - T_1)}.$$

Задание №9

При комнатной температуре t_0 тангенс угла диэлектрических потерь керамического материала $tg\delta_0$, а при повышении температуры до t_1 он возрастает в два раза. Чему равен $tg\delta_2$ этого материала при температуре t_2. Во сколько раз увеличится активная мощность, выделяющаяся в высокочастот-

ном проходном изоляторе из этого материала, при изменении температуры от t_0 до t_2 ? Изменением диэлектрической проницаемости керамики пренебречь.

Последовательность решения:

Потери в материале обусловлены сквозной электропроводностью, поэтому тангенс угла диэлектрических потерь увеличивается с температурой по экспоненциальному закону:

$$tg\delta_2 = tg\delta_0 \exp\left[\alpha\left(T_2 - T_0\right)\right],$$

где α-температурный коэффициент $tg\delta_0$, который может быть рассчитан из выражения:

$$\alpha = \frac{\ln tg\delta_1 - \ln tg\delta_0}{t_1 - t_0},$$

где $tg\delta_1$ - значение тангенса угла диэлектрических потерь при t_1.

Выделяющаяся в изоляторе активная мощность P_a растет с температурой пропорционально $tg\delta$. Поэтому:

$$\frac{P_{a_2}}{P_{a_0}} = \frac{tg\delta_2}{tg\delta_0}.$$

Задание № 10

Дисковый керамический конденсатор емкостью C включен на переменное напряжение U и рассеивает мощность P_a. Определить удельные потери в диэлектрике p, если его диэлектрическая проницаемость ε, электрическая прочность $E_{пр}$ и запас по электрической прочности K.

Последовательность решения:

Удельные потери рассчитываются на объем рабочего диэлектрика конденсатора:

$$p = P_a/(Sh),$$

где S и h – площадь обкладок и толщина диэлектрика, соответственно, м^2 и м.

Толщину диэлектрика находим из условия обеспечения электрической прочности:

$$h = \sqrt{2}UK / E_{пр}.$$

Площадь обкладок может быть определена из выражения для емкости плоского конденсатора:

$$S = \frac{Ch}{\varepsilon_0 \varepsilon}.$$

Задание № 11

Предполагая отсутствие рассеяния теплоты в окружающее пространство, определить, на сколько увеличится температура изолятора толщиной h после нахождения его в течение времени t в переменном однородном электрическом поле частотой f при напряжении U. Удельная теплоемкость материала изолятора c (Дж/(кг*К) , плотность d, диэлектрическая проницаемость ε, тангенс угла диэлектрических потерь материала $tg\delta$.

Последовательность решения:

Мощность, рассеиваемая в диэлектрике толщиной h, расположенном между электродами площадью S рассчитывается так:

$$P_a = U^2 \omega C \, tg\delta,$$

где $tg\delta$- тангенс угла диэлектрических потерь,

C – емкость конденсатора с данным материалом, Ф.

С другой стороны, P_a можно определить так:

$$P_a = U^2 2\pi f \, \varepsilon_0 \, \varepsilon \, S \, tg\delta / h.$$

Количество теплоты, которая выделяется в объеме изолятора за время t:

$$Q = P_a t$$

Зная габариты изолятора и удельную теплоемкость материала, можно определить повышение температуры:

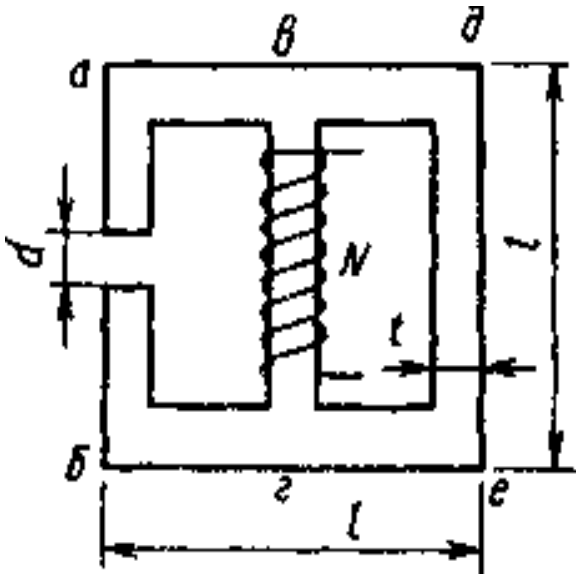
$$\Delta T = \frac{Q}{cdV} = \frac{P_a t}{cdSh} = \frac{U^2 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon \cdot t \cdot tg\,\delta}{cdh^2}.$$

Для снижения тепловыделения, обусловленного диэлектрическими потерями, необходимо, чтобы не только $tg\delta$, но и ε были низкими. Отсюда вытекает важное требование малого коэффициента диэлектрических потерь $\varepsilon'' = \varepsilon tg\delta$ высокочастотных электроизоляционных материалов.

Задание № 12

По обмотке электромагнита, имеющей 100 витков, проходит ток I=0.1 А. Определить напряженность магнитного поля в зазоре d = 1 мм, если сече-

ние сердечника одинаково на всех участках, магнитная проницаемость материала $\mu = 200$. Форма сердечника показана на рисунке, где l=50 мм; t=20 мм.



Последовательность решения.

Обозначим магнитные потоки на участках аб, вг и де разветвленной магнитной цепи через Φ_1, Φ_2 и Φ_3, соответственно (рис.83). Из непрерывности магнитных потоков следует

$$B_2 = B_1 + B_3\,, \qquad (1)$$

где $B_{1,2,3} = \Phi_{1,2,3}/S_{1,2,3}$.

В соответствии с законом полного тока имеем:

$$\frac{B_1}{\mu_0\mu}(2l - 2t - d) + \frac{B_1}{\mu_0}d + \frac{B_2}{\mu_0\mu}(l - t) = nI, \qquad (2)$$

$$\frac{B_1}{\mu_0\mu}(2l - 2t - d) + \frac{B_1}{\mu_0}d = \frac{B_3}{\mu_0\mu}(2l - 2t). \qquad (3)$$

Выражая B_2 и B_3 через B_1 из уравнений (2) и (3), после подстановки в (1) получаем

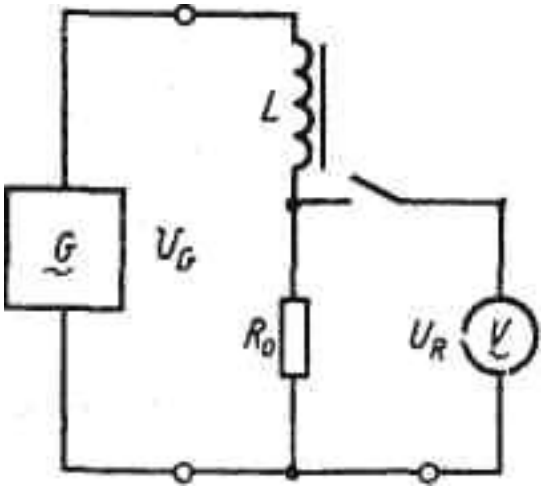
$$B_1 \cdot 8l[1 - t/l + 3d(\mu - 1)/(8l)] = 2\mu_0\mu nl.$$

Учитывая, что $B_1 = \mu_0 H_1$, имеем

$$H_1 = \frac{\mu n I}{4l[1-t/l+3d(\mu-1)/(8l)]} = \frac{200\cdot100\cdot0.1}{4\cdot5\cdot10^{-2}[1-1/5+3\cdot10^{-3}(200-1)/(8\cdot5\cdot10^{-2})]} = 8724 \text{ А/м.}$$

Задание № 13

При испытании магнитного сердечника на частоте f = 1 кГц с помощью установки, схема которой представлена на рисунке, были получены следующие результаты: $U_G = 300$ мВ, $U_R = 30$ мВ. Вычислить магнитную проницаемость, индукцию и напряженность магнитного поля в кольцевом сердечнике размерами $R \times r \times h = 30 \times 20 \times 10$ мм, если число витков измерительной обмотки n = 30, а сопротивление резистора, ограничивающего ток в измерительном контуре, $R_0 = 10$ Ом.



Последовательность решения.

По измеренному значению падения напряжения на резисторе R_0 определяем ток в измерительном контуре:

$$I = U_R/R_0 = 30 \cdot 10^{-3}/10 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 3\text{мА}.$$

Пренебрегая активным сопротивлением обмотки и потерями в магнитном сердечнике, находим падение напряжения на катушке индуктивности:

$$U_L = \sqrt{U_G^2 - U_R^2} = \sqrt{(300)^2 - (30)^2} = 298.5 \text{ мВ}.$$

Индуктивность катушки с исследуемым сердечником

$$L = U_L/(\omega t) = 298.5 \cdot 10^{-3}/(2\pi \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-3}) = 15.836 \cdot 10^{-3}\ \text{Гн}.$$

Учитывая, что потокосцепление Ψ=nBS=LI, где S – площадь поперечного сечения сердечника, находим индукцию магнитного поля в сердечнике

$$B = \frac{LI}{nS} = \frac{LI}{n(R-r)h} = \frac{15.836 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{30(30-20) \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^{-3}} = 15.836 \cdot 10^{-3}\ \text{Тл}.$$

При известном токе в обмотке напряженность магнитного поля в кольцевом сердечнике

$$H = \frac{nI}{t_{ср}} = \frac{nI}{2\pi r_{ср}} = \frac{30 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 25 \cdot 10^{-3}} = 0{,}573\ \frac{\text{А}}{\text{м}},$$

где $l_{ср}$ — средняя длина магнитного контура в сердечнике. Тогда относительная магнитная проницаемость материала сердечника

$$\mu = B/(\mu_0 H) = 15.836 \cdot 10^{-3}/(4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0.573) = 2.2 \cdot 10^4.$$

(назад)

ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

Задание № 1

Определить температурный коэффициент линейного расширения α_l и удлинение Δl проволоки, если при повышении температуры от t_1 до t_2 электрическое сопротивление её изменяется от R_1 до R_2. Длина проволоки при начальной температуре равна l_1. Температурный коэффициент удельного сопротивления материала α_ρ.

№ варианта	t_1°C	t_2°C	R_1, Ом	R_2, Ом	l_1, м	$\alpha_\rho/10^{-5}$, K^{-1}
1	20	1000	50	56	50	15
2	18	940	45	49	37	14
3	15	800	36	39	12	13
4	21	368	39	40	47	12
5	31	1100	62	68	58	11
6	33	1540	60	66	84	10
7	15	730	40	43	20	15
8	11	600	35	37	30	14
9	32	700	37	40	40	13
10	17	856	39	42	50	12
11	24	930	41	44	60	11
12	30	958	58	62	22	10
13	16	970	55	61	25	15
14	18	1050	51	55	28	14
15	23	1060	29	32	31	13
16	25	1070	43	46	35	12

17	27	1080	45	48	62	11
18	10	1090	47	50	58	10
19	12	1100	49	55	44	15
20	14	721	62	68	29	14
21	16	746	57	60	54	13
22	40	854	44	47	42	12
23	34	648	41	43	37	11
24	16	731	40	42	28	10
25	20	900	50	54	50	15
26	18	840	45	47	37	14
27	15	700	36	38	12	13
28	21	268	39	40	47	14
29	31	1150	62	66	58	11
30	33	1340	60	64	84	10

Задание № 2

Сопротивление металлического проводника при температуре t_1 равно R_1. Определить температуру проволоки t_2, если при её включении под напряжение U, если в установившемся режиме в ней протекает ток I. Температурный коэффициент удельного сопротивления при температуре t_1 равен α_ρ . Принять, что температурный коэффициент сопротивления $\alpha_R = \alpha_\rho$.

№ варианта	t_1,°C	R_1, Ом	U, В	I, А	$\alpha_\rho/10^{-3}$, $К^{-1}$
1	20	35	220	0,6	5
2	22	32	100	0,3	4,8
3	24	34	110	0,4	4,7

4	26	37	120	0,5	4,6
5	28	39	130	0,45	4,4
6	31	51	140	0,44	4,3
7	33	53	150	0,32	4,2
8	35	54	160	0,48	4,1
9	18	36	170	0,54	4
10	19	47	180	0,62	3,8
11	24	22	190	0,55	3,6
12	23	31	200	0,44	3,4
13	18	27	240	0,34	3,2
14	16	42	235	0,48	3
15	14	44	228	0,39	4,1
16	12	48	214	0,26	4,2
17	10	53	262	0,63	4,3
18	22	34	243	0,44	4,4
19	38	39	236	0,56	4,5
20	41	26	156	0,43	4,6
21	33	38	162	0,37	4,7
22	35	32	174	0,65	4,8
23	36	44	182	0,43	4,9
24	14	29	196	0,38	5
25	31	47	140	0,41	4,3
26	33	49	150	0,35	4,2
27	35	51	160	0,46	4,1
28	18	30	170	0,52	4
29	19	40	180	0,67	3,8
30	24	27	190	0,54	3,6

Задание № 3

Определить площадь поперечного сечения S проводника плавкого предохранителя, рассчитанного на предельный ток I , если удельное сопротивление материала проводника ρ, его плотность d , а температура плавления $t_{пл}$. Теплоотводом во внешнюю среду пренебречь, начальная температура предохранителя равна t_0.

№ варианта	I, А	ρ, мкОм*м	d, кг/м^3	$t_{пл}$, °С	t_0, °С	$c_{кр}$, Дж/(кг*К)
1	6	0,19	11340	327	20	121
2	1	0,11	11231	329	12	100
3	2	0,12	11245	330	13	110
4	3	0,13	11264	341	14	105
5	4	0,14	11325	342	15	107
6	5	0,15	11653	343	16	114
7	7	0,16	11732	344	17	115
8	8	0,17	12346	245	18	116
9	9	0,18	12431	346	19	118
10	10	0,20	12365	431	21	119
11	11	0,21	12653	423	22	120
12	12	0,22	12974	424	23	113
13	13	0,23	12465	425	24	121
14	14	0,24	13431	426	25	100
15	15	0,25	13243	321	26	110
16	10	0,26	13654	322	27	105
17	8	0,27	14431	323	28	107

18	9	0,31	11234	324	29	114
19	10	0,32	11253	325	30	115
20	11	0,33	11652	326	14	116
21	12	0,34	11753	443	15	118
22	13	0,35	11367	451	16	119
23	14	0,36	11345	321	17	120
24	15	0,38	12354	423	20	113
25	6	0,17	11340	320	20	120
26	1	0,12	11231	325	12	110
27	2	0,13	11245	336	13	115
28	3	0,14	11264	348	14	118
29	4	0,15	11325	340	15	110
30	5	0,16	11653	334	16	112

Задание № 4

Нормально вектору напряженности однородного электрического поля $\boldsymbol{E_0}$ расположена пластина изотропного диэлектрика с диэлектрической проницаемостью $\boldsymbol{\varepsilon}$. Определить:

- напряженность поля $\boldsymbol{E}$ и электрическое смещение (электрическую индукцию) $\boldsymbol{D}$ внутри пластины;
- поляризованность диэлектрика $\boldsymbol{P}$ и поверхностную плотность связанных зарядов $\boldsymbol{\sigma}$.

№ варианта	E_0, В/м	ε	№ вариан-та	E_0, В/м	ε
1	100	2	16	200	4
2	50	2	17	210	4
3	60	2	18	220	4
4	70	2	19	230	4
5	80	2	20	240	2
6	90	2	21	250	2
7	110	2	22	260	2
8	120	3	23	270	2
9	130	3	24	280	2
10	140	3	25	100	3
11	150	3	26	50	3
12	160	3	27	60	3
13	170	3	28	70	3
14	180	4	29	80	3
15	190	4	30	90	3

Задание № 5

Вычислить поляризованность монокристалла соли, считая, что смещение ионов $\boldsymbol{\Delta x}$, под действием электрического поля от положения равновесия, составляет 1% от расстояния между ближайшими соседними ионами. Элементарная ячейка кристалла имеет форму куба, расстояние между соседними ионами $\boldsymbol{\alpha}$.

№ варианта	α, нм	№ варианта	α, нм
1	0,28	16	0,14
2	0,29	17	0,15
3	0,30	18	0,16
4	0,31	19	0,17
5	0,32	20	0,18
6	0,33	21	0,19
7	0,34	22	0,20
8	0,35	23	0,21
9	0,36	24	0,22
10	0,37	25	0,25
11	0,38	26	0,26
12	0,39	27	0,27
13	0,40	28	0,48
14	0,12	29	0,49
15	0,13	30	0,50

Задание № 6

Между пластинами плоского конденсатора без воздушных промежутков зажат лист гетинакса толщиной $\boldsymbol{h}$. На конденсатор подано напряжение $\boldsymbol{U}$. Определить поверхностную плотность заряда на пластинах конденсатора $\boldsymbol{\sigma_1}$ и на диэлектрике $\boldsymbol{\sigma_0}$. Материал имеет диэлектрическую проницаемость $\boldsymbol{\varepsilon}$.

№ варианта	h, мм	U, В	ε	№ варианта	h, мм	U, В	ε
1	1	200	6	16	2	250	3
2	2	100	2	17	3	260	4
3	3	110	3	18	4	270	5
4	4	120	4	19	5	280	6
5	5	130	5	20	6	290	7
6	6	140	7	21	7	300	8
7	7	150	8	22	1	310	2
8	1	160	2	23	2	320	3
9	2	170	3	24	3	330	4
10	3	180	4	25	1	135	6
11	4	190	5	26	2	105	2
12	5	210	6	27	3	206	3
13	6	220	7	28	4	137	4
14	7	230	8	29	5	142	5
15	1	240	2	30	6	158	7

Задание № 7

Две противоположные грани куба с ребром $\boldsymbol{\alpha}$ из диэлектрического материала с удельным объемным сопротивлением $\boldsymbol{\rho_v}$ и удельным поверхностным сопротивлением $\boldsymbol{\rho_s}$ покрыты металлическими электродами . Определить ток, протекающий через эти грани куба при постоянном напряжении $\boldsymbol{U_0}$.

№ варианта	α, мм	$\rho_v/10^{10}$, Ом*м	$\rho_s/10^{11}$, Ом*м	U_0, кВ
1	10	1	1	2
2	12	1	1	2
3	14	1	1	2
4	16	1	1	2
5	18	1	1	2
6	20	1	1	2
7	21	1	1	2
8	22	2	2	1
9	24	2	2	1
10	26	2	2	1
11	11	2	2	1
12	12	2	2	1
13	13	3	3	3
14	14	3	3	3
15	15	3	3	3
16	16	3	3	3
17	17	3	3	3
18	18	1	1	4
19	19	1	1	4
20	20	1	1	4
21	21	1	1	4
22	22	1	1	4
23	23	1	1	4
24	24	1	1	4
25	10	1	1	1
26	12	1	1	1
27	14	1	1	1
28	16	1	1	1
29	18	1	1	1
30	20	1	1	1

Задание № 8

При повышении температуры от t_1 до t_2, ^oC удельное сопротивление диэлектрика уменьшается от ρ_1 до ρ_2. Определить температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ, считая его постоянным в рассматриваемом диапазоне температур. При этом же допущении найти удельное сопротивление материала ρ_0 при комнатной температуре t_0.

№ варианта	t_1, °C	t_2, °C	$\rho_1/10^{13}$, Ом*м	$\rho_2/10^{11}$, Ом*м	t_0, °C
1	60	127	1	1	20
2	30	60	1	1	12
3	40	80	1	1	14
4	50	100	1	1	16
5	70	180	1	1	18
6	80	190	1	1	22
7	90	250	1	1	24
8	100	320	1	1	26
9	30	80	1	1	10
10	40	90	1	1	12
11	50	130	1	1	14
12	60	170	1	1	16
13	70	190	2	2	18
14	80	250	2	2	20
15	90	280	2	2	22
16	100	320	2	2	24
17	30	100	2	2	26

18	40	120	2	2	28
19	50	140	2	2	10
20	60	160	2	2	12
21	70	180	2	2	14
22	80	190	2	2	16
23	90	200	2	2	18
24	100	220	2	2	20
25	30	60	1	1	14
26	40	80	1	1	15
27	50	100	1	1	17
28	70	180	1	1	19
29	80	190	1	1	20
30	90	250	1	1	21

Задание №9

При комнатной температуре t_0 тангенс угла диэлектрических потерь керамического материала $tg\delta_0$, а при повышении температуры до t_1 он возрастает в два раза. Чему равен $tg\delta_2$ этого материала при температуре t_2. Во сколько раз увеличится активная мощность, выделяющаяся в высокочастотном проходном изоляторе из этого материала, при изменении температуры от t_0 до t_2 ? Изменением диэлектрической проницаемости керамики пренебречь.

№ варианта	$t_{0,}$ °C	$tg\delta_0 /10^{-4}$	$t_{1,}$ °C	$t_{2,}$ °C
1	20	5	100	200
2	12	2	80	210
3	14	3	90	220
4	16	4	110	230

5	18	5	120	240
6	22	6	130	250
7	24	2	140	260
8	12	3	150	270
9	14	4	80	280
10	16	5	90	290
11	18	6	100	300
12	20	2	110	310
13	22	3	120	320
14	24	4	130	330
15	26	5	80	340
16	10	6	90	350
17	12	2	100	360
18	14	3	110	370
19	16	4	120	380
20	18	5	130	390
21	20	6	140	400
22	22	2	150	250
23	24	3	100	260
24	26	4	120	280
25	20	5	80	200
26	12	2	90	210
27	14	3	190	220
28	16	4	115	230
29	18	5	130	240
30	22	6	140	250

Задание № 10

Дисковый керамический конденсатор емкостью $\boldsymbol{C}$ включен на переменное напряжение $\boldsymbol{U}$ и рассеивает мощность $\boldsymbol{P_a}$. Определить удельные потери в диэлектрике $\boldsymbol{p}$, если его диэлектрическая проницаемость $\boldsymbol{\varepsilon}$, электрическая прочность $\boldsymbol{E_{пр}}$ и запас по электрической прочности $\boldsymbol{K}$.

№ варианта	C, пФ	U, В	ε	$E_{пр}$, МВ/м	K	$\boldsymbol{P_a}/10^{-3}$, Вт
1	100	100	150	10	10	1
2	50	110	100	2	2	2
3	60	120	110	3	3	3
4	70	130	120	4	4	4
5	80	140	130	5	5	5
6	90	150	140	6	6	6
7	110	160	160	7	7	7
8	120	170	170	8	8	8
9	130	180	180	9	9	9
10	140	190	190	11	2	10
11	150	200	200	12	3	11
12	160	210	100	13	4	12
13	170	220	110	14	5	1
14	180	230	120	15	6	2
15	190	100	130	5	7	3
16	200	110	140	6	8	4
17	210	120	150	7	9	5
18	220	130	160	8	10	6

19	230	140	170	9	12	7
20	240	150	180	10	14	8
21	250	160	190	11	15	9
22	260	170	200	12	10	10
23	270	180	110	13	11	11
24	280	190	120	14	12	12
25	100	100	150	9	10	1
26	110	110	100	10	2	2
27	120	120	110	11	3	3
28	130	130	120	12	4	4
29	140	140	130	13	5	5
30	150	150	140	14	6	6

Задание № 11

Предполагая отсутствие рассеяния теплоты в окружающее пространство, определить насколько, увеличится температура изолятора толщиной h после нахождения его в течение времени t в переменном однородном электрическом поле частотой f при напряжении U. Удельная теплоемкость материала изолятора c (Дж/(кг*К) **,** плотность d**,** диэлектрическая проницаемость ε, тангенс угла диэлектрических потерь материала $tg\delta$.

№ варианта	h, см	t, с	f, Мгц	U, кВ	c /10^3, Дж/(кг*К)	d, кг/м^3	ε	tgδ
1	1	30	1	10	2,25	940	2,4	0,01
2	2	20	2	2	2,25	550	2,2	0,02
3	3	40	3	3	2,25	560	2,2	0,03
4	4	50	4	4	2,25	570	2,2	0,04

5	5	60	5	5	2,25	580	2,2	0,05
6	1	70	6	6	2,25	590	2,2	0,06
7	2	80	7	7	2,25	600	2,2	0,07
8	3	90	8	8	2,25	610	2,2	0,08
9	4	100	9	9	2,25	620	2,2	0,09
10	5	110	10	11	2,25	630	2,2	0,1
11	1	120	1	12	2,25	640	2,2	0,01
12	2	130	2	13	2,25	650	2,2	0,02
13	3	140	3	14	2,25	670	2,6	0,03
14	4	150	4	15	2,25	680	2,6	0,04
15	5	160	5	16	2,55	690	2,6	0,05
16	1	170	6	17	2,55	700	2,6	0,06
17	2	180	7	18	2,55	710	2,6	0,07
18	3	190	8	19	2,55	720	2,6	0,08
19	4	200	9	20	2,55	730	2,6	0,09
20	5	210	10	10	2,55	740	2,6	0,1
21	1	220	1	11	2,55	750	2,6	0,01
22	2	230	2	12	2,55	800	2,6	0,02
23	4	240	3	13	2,55	850	2,6	0,03
24	5	250	4	14	2,55	900	2,6	0,04
25	1	30	1	10	2,25	600	2,4	0,01
26	2	20	2	2	2,25	610	2,2	0,02
27	3	40	3	3	2,25	620	2,2	0,03
28	4	50	4	4	2,25	630	2,2	0,04
29	5	60	5	5	2,25	640	2,2	0,05
30	1	70	6	6	2,25	650	2,2	0,06

Гуляев Павел Владимирович
кандидат технических наук

Степанчук Геннадий Владимирович
кандидат технических наук

Украинцев Максим Михайлович
кандидат технических наук

Корчагин Павел Тимофеевич
кандидат технических наук

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебное пособие для студентов обучающихся по направлениям подготовки: 35.03.06 Агроинженерия; 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»;13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Издается в авторской редакции
Объем ЭИ: 3,416 Мб
Формат ЭИ Portable Document Format (PDF)