

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации  
ФГБОУ ВО Иркутский государственный аграрный университет  
им. А.А. Ежевского

Факультет энергетический  
Кафедра электрооборудования и физики

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ  
**«ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ  
МАТЕРИАЛЫ»**  
ДЛЯ СТУДЕНТОВ ОЧНОГО, ЗАОЧНОГО И ДИСТАНЦИОННОГО  
ОБУЧЕНИЯ, НАПРАВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКИ  
13.03.02 - ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА,  
ПРОФИЛЬ «ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ»



Молодежный 2020

УДК 621.315.61(076.5)

Л 125

Допущено методическим советом энергетического факультета  
(протокол № 2 от 21 октября 2020 года)

**Составители: Прудников А.Ю., Боннет В.В., Логинов А.Ю.**

**Рецензент: Подъячих С. В.** - к.т.н., заведующий кафедрой  
«Электроснабжения и электротехники» Иркутского ГАУ им. А.А. Ежевского

Лабораторный практикум по дисциплине «Электротехнические и конструкционные материалы» для студентов очного, заочного и дистанционного обучения, направления подготовки 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника, профиль «Электроснабжение» / Иркут. гос. аграр. ун-т им. А. А. Ежевского ; сост.: А. Ю. Прудников [и др.] – Молодёжный : Изд-во ИрГАУ, 2020. – 85 с. – Текст : электронный.

В лабораторном практикуме приведен обзор основных теоретических материалов, а также методики выполнения лабораторных. Практикум предназначен для самостоятельной работы студентов энергетического факультета очного, заочного и дистанционного обучения, направления подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника, профиль «Электроснабжение». Приведены сведения по технике безопасности, справочные материалы, а также контрольные вопросы для самоконтроля. Практикум составлен на основе действующей рабочей программы по дисциплине «Электротехнические и конструкционные материалы».

© Прудников А.Ю., Боннет В.В., Логинов А.Ю., 2020

© Иркутский государственный аграрный  
университет имени А.А. Ежевского, 2020

## Содержание

<b>Введение</b>	4
<b>Основные правила техники безопасности при работах на установках высокого напряжения</b>	5
<b>Лабораторная работа № 1</b>	
ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛАБОРАТОРИИ	8
<b>3. Лабораторная работа № 2.</b>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	15
<b>4. Лабораторная работа № 3.</b>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА	27
<b>5. Лабораторная работа № 4.</b>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТВЁРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ	38
<b>Лабораторная работа № 5</b>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	49
<b>Лабораторная работа № 6</b>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ	64
<b>Лабораторная работа № 7</b>	
ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОПРОВОДОВ	76
<b>Литература</b>	84

## Введение

Учебное пособие содержит указания для выполнения лабораторных работ по курсу «Электротехнические материалы».

Перед выполнением лабораторной работы обучающемуся следует проанализировать теоретический материал, чтобы получить представление о поставленной задаче и физических процессах, которые предстоит изучить в ходе работы. Также студент должен выполнить практическую часть лабораторной работы, знать конструкцию, назначение приборов и материалов, необходимых для выполнения задач исследования. Чтобы упростить подготовку обучающегося к выполнению работы, в ней присутствует краткая теория по исследуемым процессам и явлениям. Студентам следует заранее подготавливаться к занятиям в лаборатории.

Чтобы упростить подготовку обучающегося к выполнению лабораторной работы, в ней присутствует краткая теория по исследуемым процессам и явлениям. Для полученного более полного представления по теме следует использовать дополнительную литературу.

Для закрепления усвоенного материала каждая лабораторная работа заканчивается контрольными вопросами.

В каждой работе есть правила оформления отчёта. По желанию студента в отчете могут присутствовать дополнительные материалы. Отчёт выполняется индивидуально каждым студентом и сдаётся преподавателю к следующему учебному занятию.

Перед выполнением работ на высоковольтных установках студенты должны пройти инструктаж по правилам техники безопасности.

## **ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТАХ НА УСТАНОВКАХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ**

1. К высоковольтным установкам относятся только те устройства напряжение которых относительно земли более 1000 В.

2. Все лица, проводящие работы в лаборатории на высоковольтных установках, обязаны знать и строго соблюдать требования безопасности для высоковольтных установок, инструкции по технике безопасности, а также правила освобождения пострадавшего от действия электрического тока и оказания ему первой помощи.

3. Студенты не могут проводить работу на высоковольтных установках самостоятельно и могут работать в лаборатории только в присутствии преподавателя.

4. Работы на высоковольтных установках могут выполняться минимально двумя лицами, один из которых должен обладать квалификацией, дающей право самостоятельно производить работы на высоковольтных установках.

5. Действующая высоковольтная установка должна обеспечивать во всех случаях безопасное выполнение работ. Для этого служат защитное заземление, заземляющие и закорачивающие штанги, ограждения, блокировка, сигнализация, два видимых разрыва (переключателя) в цепи питания высоковольтной установки, запрещающие и предупреждающие плакаты.

6. Высоковольтная установка должна иметь свои специально разработанные инструкции по технике безопасности.

Инструкция должна содержать:

- а) порядок включения и выключения установки;
- б) список запрещенных действий;
- в) краткий перечень защитных средств (заземление, ограждение, блокировка и т. д.) и правила их использования;
- г) описания действий в случае аварии.

7. В связи с тем, что обстановка в лаборатории постоянно изменяется, не всегда стоит полагаться на средства защиты, и перед началом работы необходимо удостовериться, что:

- а) имеются инструкции по технике безопасности;
- б) исправна схема блокировки, переносных заземляющих устройств, постоянного заземления;
- в) ограждения исправны и правильно их установлены;
- г) имеются предупреждающие плакаты;
- д) за ограждением отсутствуют люди.

8. Подавая напряжение на схему, необходимо предварительно громко предупредить окружающих: «ВКЛЮЧАЮ ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ».

9. В процессе работы с включенной установкой категорически запрещается:

- а) выходить за ограждения;
- б) перемещать ограждения;
- в) вытягивать руки за ограждения;
- г) закорачивать или отключать блокировочные устройства;
- е) убирать запрещающие и предупреждающие плакаты;
- д) оставлять установку под напряжением, без присмотра.

10. После снятия напряжения перед приближением к оборудованию необходимо заземлить части установки, которые находились или могли находиться под высоким напряжением.

11. Если есть сомнения в исправности установки или защитного оборудования необходимо снять напряжение и установить защитное заземление.

12. При временном прекращении работы или проведении ремонтных работ установка должна быть отключена от электропитания и на выключателе вывешен плакат «НЕ ВКЛЮЧИТЬ, РАБОТАЮТ ЛЮДИ».

13. После завершения работ необходимо:

а) заземлить участки установки, которые находились или могут находиться под высоким напряжением;

б) убрать предупреждающие и запрещающие плакаты;

В) принять меры для предотвращения возможности случайного (ошибочного) включения.

14. При работе с высоковольтными установками присутствие посторонних лиц в помещениях лаборатории недопустимо. Настоящие правила составлены на основе стандартных правил безопасности для студентов, работающих в учебных лабораториях и мастерских Министерства образования Российской Федерации.

## *Лабораторная работа № 1*

# **ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛАБОРАТОРИИ**

**Цель работы:** ознакомление с устройством и принципом действия основных испытательных установок для определения электрической прочности диэлектрических материалов.

### **Программа работы**

1. Изучить устройство и принцип действия генератора импульсных напряжений и каскадной схемы промышленной частоты.
2. Ознакомиться с правилами техники безопасности при работе на этих установках.

### **1.1 Краткие теоретические сведения**

Электротехнические материалы, используемые для производства электрических машин, аппаратов и приборов, обладают определенными параметрами и характеристиками. Для диэлектрических материалов такими параметрами являются: электрическая прочность, удельное объемное и поверхностное сопротивление, диэлектрические потери, допустимая рабочая температура и другие.

Эти параметры определяют надежность, долговечность, экономичность, массогабаритные показатели и стоимость электрооборудования.

Поэтому как при производстве электрооборудования, так и в процессе его эксплуатации необходимо определять и контролировать некоторые параметры электротехнических материалов и изделий из них.



Для диэлектриков весьма существенным параметром является электрическая прочность, так как в процессе эксплуатации электрооборудование подвергается воздействию повышенных напряжений (перенапряжениям), которые по величине могут значительно превышать рабочее (номинальное) напряжение.

Перенапряжения возникают как в результате атмосферных явлений (грозовые перенапряжения), так и при переходных процессах: аварийных и несимметричных режимах в электрических сетях (внутренние перенапряжения). Перенапряжения могут иметь кратковременный (импульсный) или длительный характер.

Чтобы изучить поведение диэлектриков при таких воздействиях в испытательных лабораториях, необходимо иметь высоковольтные установки, воспроизводящие такие явления.

## 1.2 Генераторы импульсного напряжения (ГИН)

Импульсные установки должны обеспечить генерацию аperiodических импульсов напряжения (тока). Основными параметрами импульса (рис. 1.1) являются: амплитуда напряжения  $U_{\max}$ , длительность фронта импульса  $\tau_{\phi}$ , длительность импульса  $\tau_{и}$ .

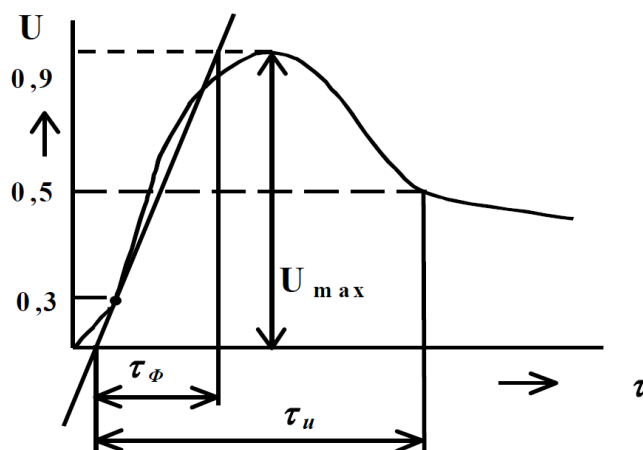


Рисунок 1.1 Основными параметрами импульса ГИН

Стандартные импульсы, имитирующие атмосферные перенапряжения, имеют  $\tau_{\phi} = 1,2$  мкс,  $\tau_{и} = 50$  мкс. Импульсы, имитирующие внутренние перенапряжения, имеют  $\tau_{\phi} = 250$  мкс,  $\tau_{и} = 2500$  мкс.

Схема ГИН, представленная на рис. 1.2, состоит из двух блоков: зарядного устройства 1 (ЗУ) и умножителя напряжения 2 (УН).

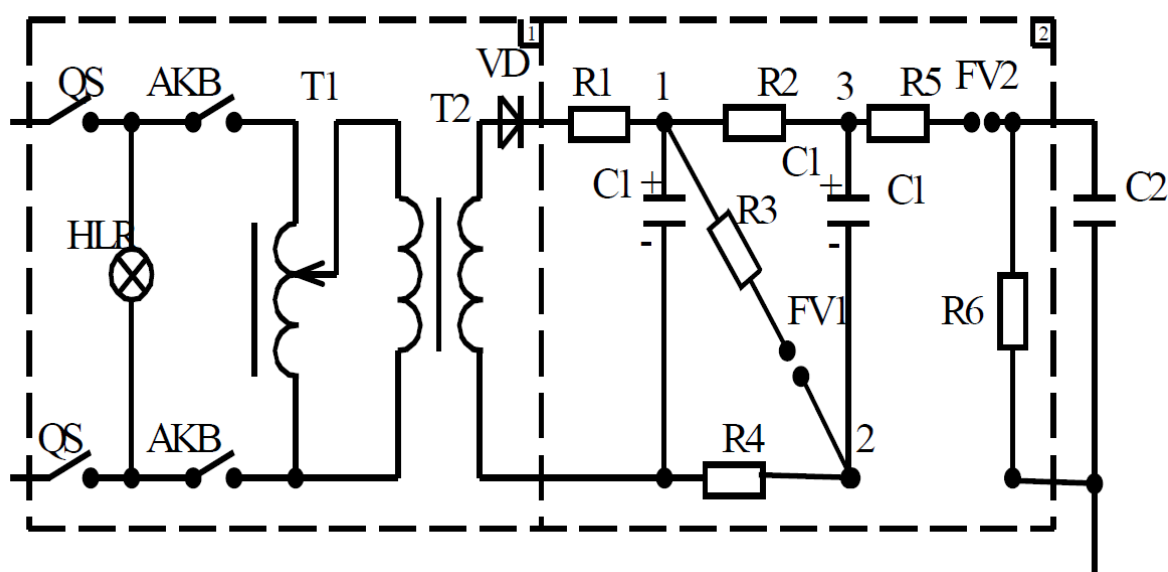


Рисунок 1.2 - Схема ГИН

Зарядное устройство 1 включает регулировочный автотрансформатор Т1, повышающий трансформатор Т2 и высоковольтный выпрямитель VD, т. е. ЗУ представляет собой однополупериодный высоковольтный регулируемый выпрямитель. В качестве вентиля VD на напряжение 100 кВ используют выпрямительные столбики на полупроводниковых диодах.

Умножитель напряжения 2 включает конденсаторы С1, резисторы R1 – R5 и разрядные промежутки FV1, FV2. На рисунке 1.2 приведена схема удвоения напряжения.

Принцип работы ГИН заключается в следующем: на первой стадии, в режиме заряда конденсаторы С1 соединены параллельно и заряжаются от ЗУ через резисторы R1, R2, R4 с полярностью, указанной на схеме (см. рис. 1.2). Защитный резистор  $R1 = 3 \cdot 10^6$  Ом предназначен для ограничения тока

заряда в момент включения, т.е. защищает вентиль VD и трансформатор T2 от перегрузки.

Величина напряжения, до которого заряжаются конденсаторы C1, определяется электрической прочностью искрового промежутка FVI, но не должна превышать амплитуду выпрямленного напряжения U2m.

Когда напряжение в точке 1 превысит электрическую прочность промежутка FVI, происходит пробой этого промежутка и конденсаторы C1 соединяются последовательно: точка 2 будет соединена с точкой 1 через демпфирующий резистор R3 и сопротивление искрового промежутка FVI.

Благодаря тому что сопротивление резисторов R2, R4 велико ( $R2 = R4 = 5 \cdot 10^4$  Ом), а сопротивление резистора R3 мало ( $R3 = 10 - 20$  Ом), конденсаторы не успевают разрядиться, потенциал точки 2 повышается до потенциала точки 1, а потенциал точки 3 увеличивается примерно в два раза.

При переключении конденсаторов C1 с параллельной схемы на последовательную происходит пробой разрядного промежутка FV2, так как его электрическая прочность ниже величины удвоенного напряжения умножителя: выходное напряжение умножителя будет приложено к объекту испытания C2 и разрядному резистору R6.

Скорость нарастания напряжения на объекте (длина фронта импульса) будет определяться постоянной времени заряда конденсатора C2, т.е.

$$\tau_{\phi} = (2...3) \cdot (R_3 + R_5) \cdot C_2 \quad (1.1)$$

Когда напряжение на объекте (C2) достигнет предельного значения, конденсаторы C1 и C2 начнут разряжаться через главный разрядный резистор R6 (спад импульса). При этом длительность волны импульса в данной схеме будет приблизительно равна:

$$\tau_{и} = 0,67 \cdot (C_1/2 + C_2) \cdot (R_3 + R_5 + R_6) \quad (1.2)$$

Как видно из выражений (1.1) и (1.2) параметры напряжения на объекте (длительность фронта и длительность импульса) в основном определяются величиной сопротивления фронтового резистора R5 и разрядного резистора

R6. Поэтому чтобы получить импульс с заданными значениями  $\square\phi$  и  $\square i$ , необходимо определить значения R5 и R6 по выражениям (1.1), (1.2). Плавное регулирование амплитуды импульса осуществляется за счет изменения расстояния искрового промежутка FV1.

Современные ГИН на напряжение несколько миллионов вольт могут иметь несколько десятков каскадов. Таким образом, используя метод умножения напряжения, можно получить высокое значение испытательного напряжения при относительно низком значении напряжения зарядного устройства (порядка 100 – 200 кВ).

### **1.3 Источники высокого напряжения промышленной частоты (ИВН)**

Источниками испытательного напряжения промышленной частоты являются однофазные повышающие трансформаторы. Такие трансформаторы работают в кратковременном режиме, т. е. напряжение повышается плавно до заданного значения или до разряда на объекте, после чего трансформатор отключается.

Для ограничения токов короткого замыкания при разряде последовательно с обмоткой высокого напряжения включается ограничивающий резистор, сопротивление которого принимается из расчета 1 Ом на 1 В номинального напряжения. Мощность таких трансформаторов невелика. Расчетные токи принимаются  $I_n = 0,2 - 0,5$  А при  $U_n < 500$  кВ и  $I_n = 1$  А при  $U_n > 500$  кВ.

Для испытательных установок промышленной частоты широкое применение получили каскадные схемы с заземленной средней точкой обмотки высокого напряжения и двумя изолированными высоковольтными выводами. Соединение средней точки высоковольтной обмотки с сердечником и баком трансформатора позволяет выполнить изоляцию высоковольтной обмотки и выводов на половину напряжения. Запас прочности по изоляции не превышает 20 – 30 %.

Так как один из высоковольтных выводов может быть заземлен, то в этом случае сам трансформатор должен быть изолирован от земли и заземленного оборудования.

Схема двухкаскадного испытательного трансформатора представлена на рис. 1.3. Каждый каскад имеет обмотку низкого (НН), высокого (ВН) напряжения и обмотку связи (ОС). Обмотка связи служит для питания последующего каскада и имеет коэффициент трансформации по отношению к обмотке НН, равный единице.

Как видно из рисунка 1.3, один из выводов обмотки ВН первого каскада соединен с землей. Следовательно, относительно земли его бак имеет потенциал  $0,5U_2$ , а напряжение на втором выводе равно  $U_2$ .

Бак второго трансформатора имеет потенциал  $1,5U_2$ , а напряжение на выходе относительно земли  $2U_2$ .

Так как баки относительно земли находятся под напряжением, то бак первого и второго трансформаторов должны быть изолированы от земли с помощью опорных изоляторов соответственно на напряжения  $0,5U_2$  и  $1,5U_2$ .

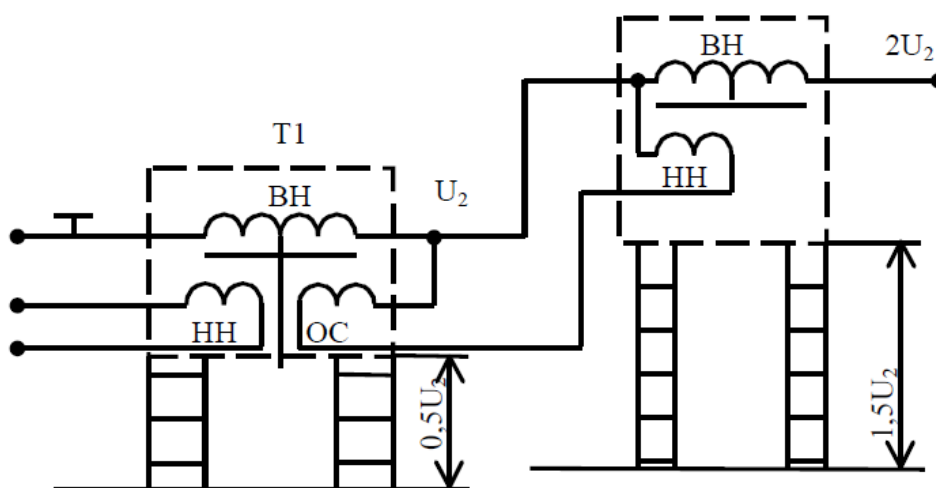


Рисунок 1.3 - Схема двухкаскадного испытательного трансформатора

Недостатком таких установок является значительная площадь, занимаемая ими.

## **1.4 Содержание работы и порядок ее выполнения**

1. Детально ознакомиться с инструкцией по ТБ к данной установке.
2. Ознакомиться со схемой двухкаскадного ГИН и конструктивным ее выполнением.
3. Ознакомиться со схемой двухкаскадного испытательного трансформатора.
4. Ответы на контрольные вопросы

## **1.6. Содержание отчета**

1. Название и цель работы.
2. Схема ГИН и его параметры.
3. Схема двухкаскадного испытательного трансформатора
4. Ответы на контрольные вопросы

## **Контрольные вопросы**

1. Необходимость высоковольтных испытаний электротехнических материалов?
2. Объясните принцип работы ГИН?
3. Основные испытательные установки?
4. Что применяют в качестве испытательных установок промышленной частоты?
5. Зачем последовательно с обмоткой высокого напряжения включается ограничивающий резистор?

*Лабораторная работа № 2*  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**

**Цель работы:** Ознакомиться с электроизоляционными материалами, применяемыми при монтаже и ремонте электрооборудования

**Программа работы:**

1. Изучить классификацию и область применения жидких, твердеющих и твёрдых электроизоляционных материалов.
2. Для электроизоляционных материалов, представленных в таблице 2.2., определить классы нагревостойкости.
3. Написать отчёт к лабораторной работе.

**2.1 Краткие теоретические сведения**

*Электроизоляционные материалы ЭИМ* ( диэлектрики ) по своему агрегатному состоянию делятся на *жидкие, твёрдые* и *газообразные*. В особую группу могут быть выделены *твердеющие материалы*, которые в исходном состоянии, во время введения их в изготавливаемую изоляцию, являются жидкостями, но затем отверждаются и в готовой, находящейся в эксплуатации изоляции представляют собой твёрдые тела ( например, лаки и компаунды).

Наибольшее применение в электротехнике имеют жидкие и твёрдые диэлектрики. Они используются для создания электрической изоляции, которая окружает токоведущие части электрических устройств и отделяет друг от друга части, находящиеся под различными электрическими потенциалами.

**Назначение электрической изоляции** - не допускать прохождения электрического тока по каким-либо нежелательным путям, помимо тех путей, которые предусмотрены электрической схемой устройства.

Кроме того, электроизоляционные материалы используются в качестве диэлектриков в электрических конденсаторах для создания определённого значения электрической ёмкости конденсатора, а в некоторых случаях для обеспечения определённого вида зависимости этой ёмкости от температуры или иных факторов.

Электроизоляционные материалы должны обладать высокой электрической и механической прочностью, нагревостойкостью, теплопроводностью и влагостойкостью.

К основным диэлектрическим характеристикам электроизоляционных материалов относятся: ***электрическая прочность, электропроводность, тангенс угла диэлектрических потерь и диэлектрическая проницаемость.***

Немаловажную роль играют тепловые свойства электроизоляционных материалов. Нагревостойкость – это способность электроизоляционных материалов и изделий без вреда для них длительно выдерживать воздействие высокой температуры.

Таблица. 2.1

**Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов**

Класс нагревостойкости	температура, °С	Характеристика основных групп электроизоляционных материалов
<b>У</b>	<b>90</b>	Древесина, бумага, картон, фибра, хлопчатобумажное волокно, пряжа, волокнистые материалы из натурального шёлка и целлюлозы а также вулканизированный натуральный каучук.



Продолжение таблицы 2.1

<b>А</b>	<b>105</b>	Материалы класса У, но пропитанные жидким, как масляным так и синтетическим диэлектриком, изоляция эмалированных проводов на поливинилацеталевых лаках, природные жидкие и твердеющие диэлектрики.
<b>Е</b>	<b>120</b>	Слоистые пластики и пластмассы на термореактивных связующих, изоляция эмалированных проводов на эпоксидных лаках, поликарбонатные пленки и эмали, синтетические жидкие диэлектрики.
<b>В</b>	<b>130</b>	Слюда, асбест, стекловолокно в сочетании с органическими связующими и пропитывающими составами.
<b>Ф</b>	<b>155</b>	Материалы класса В, но в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами.
<b>Н</b>	<b>180</b>	Материалы класса В, но в сочетании с кремний-органическими связующими и пропитывающими составами.
<b>С</b>	<b>выше 180</b>	Слюда, электротехническая керамика, стекло, кварц, применяемые без связующих или с неорганическими связующими составами.

## 2.2 Жидкие электроизоляционные материалы

*Жидкие электроизоляционные материалы* делятся на природные и синтетические.

К природным диэлектрикам относятся масла, которые являются продуктами переработки нефти : трансформаторное, конденсаторное, кабельное и касторовое масло.

**1. Трансформаторное масло** – светло-жёлтая прозрачная маловязкая жидкость с температурой вспышки паров не ни  $+135^{\circ}\text{C}$  и температурой застывания  $-45^{\circ}\text{C}$ . Электрическая прочность масла сильно снижается при увеличении содержания в нём влаги.

**2. Конденсаторное и кабельное масло** получают обычно из трансформаторного масла путём дополнительной очистки. Эти масла

отличаются от трансформаторного масла повышенными электрическими свойствами. кабельное масло служит для пропитки бумажной изоляции кабелей, где изоляционному маслу приходится работать в условиях очень высоких напряжённостей электрического поля.

**3. Касторовое масло** получают из семян клещевины и применяется оно в некоторых типах бумажно-масляных герметизированных конденсаторах, когда требуются не особенно высокие электрические характеристики и негорючесть изоляционного масла (касторовое масло практически не горит).

К синтетическим жидким электроизоляционным материалам относятся : совол и совтол.

**4. Совол** - представляет собой прозрачную очень вязкую жидкость, которую получают из бензола с последующим хлорированием. Это негорючая, взрывобезопасная, неокисляющая жидкость. Совол токсичен, раздражает слизистые оболочки, поэтому работа с ним требует соблюдения правил техники безопасности.

Совол применяется в основном для пропитки бумажных конденсаторов с повышенной удельной ёмкостью на невысокие напряжения.

**5. Совтол** является смесью совола и трихлорбензола. Вязкость совтола значительно меньше вязкости совола. Это облегчает пропитку совтолом волокнистых диэлектриков.

Совтол применяется для изоляции взрывобезопасных трансформаторов.

Конденсаторное масло применяется для пропитки изоляции бумажных конденсаторов.

## 2.3 Твёрдеющие электроизоляционные материалы

Твердеющие электроизоляционные материалы в момент их применения находятся в жидком состоянии и твердеют после охлаждения или в результате происходящих в них химических процессов.

**1. Воск** – это твёрдый легкоплавкий материал обладающий кристаллическим строением, низкой механической прочностью и малой гигроскопичностью. Он употребляется для пропитки и заливки изоляции.

**2. Парафин** – это наиболее дешёвое и широко известное неполярное воскообразное вещество. Получают его разгонкой и вымораживанием из соответствующей фракции парафинистой нефти. Парафин не смачивается водой. Парафин иногда применяют для пропитки бумажных конденсаторов низкого напряжения, для пропитки дерева и картона, для заливки катушек с невысокой рабочей температурой.

**3. Церезин** – воскообразное вещество, светло-жёлтого или оранжевого цвета, получаемое из некоторых сортов нефти или из воскообразного минерала «горного воска». По электрическим свойствам церезин мало отличается от парафина, но имеет более высокую температуру плавления (  $65 - 80^{\circ}\text{C}$  ), повышенную стойкость против окисления и меньшую усадку при застывании. Поэтому церезин, несмотря на его повышенную стоимость по сравнению с парафином, вытесняет его, в частности при пропитке бумажных и слюдяных конденсаторов.

**4. Вазелин** – близкая к воскообразным веществам масса, при нормальной температуре полужидкая ; применяется для пропитки бумажных конденсаторов. Вазелин является смесью твёрдых и жидких углеводородов, получаемой из нефти.

**5. Шеллак** – природная смола желтоватого или красно-коричневого цвета, хорошо растворяется в спирте. В электроизоляционной технике шеллак используется в виде клеящих лаков.

**6. Канифоль** – природная хрупкая смола жёлтого или коричневого цвета, растворима в нефтяных и растительных маслах, спиртах, скипидаре. В электропромышленности канифоль применяется в виде растворов в нефтяных маслах в качестве пропиточных и заливочных компаундов.

## **2.4 Твёрдые электроизоляционные материалы**

Твёрдые электроизоляционные материалы делятся на волокнистые, керамические, стеклообразные, горные и пластмассы.

### **2.4.1 Волокнистые электроизоляционные материалы**

**1. Древесина** применяется в электротехнике только для изготовления малоответственных изоляционных деталей: штанг приводов разъединителей, масляных выключателей, рукояток и др.

**2. Бумага** электроизоляционная изготавливается из древесной целлюлозы и делится на конденсаторную, кабельную, пропиточную, намоточную, микалентную и оклеечную.

Конденсаторная бумага имеет толщину 0,03 мм и высокую плотность.

Кабельная бумага имеет повышенную толщину 0,17 мм и меньшую плотность по сравнению с конденсаторной, но обладает высокими механическими свойствами, она применяется для изоляции силовых кабелей.

Пропиточная и намоточная бумага отличается пониженной плотностью и поэтому имеет большую впитываемость. Пропиточную

бумагу толщиной до 0,12 мм применяют для производства листового гетинакса.

**3. Электрокартон** изготавливается из смеси хлопчатобумажных волокон и волокон древесной целлюлозы и имеет широкое применение в электромашиностроении и электроаппаратостроении.

**4. Фибра** представляет собой монолитный материал, получаемый в результате прессования листов бумаги, предварительно обработанных нагретым раствором хлористого цинка и отмытых в воде. Естественный цвет фибры – серый. Фибра других цветов (красная, чёрная) получается введением в материал соответствующих красителей. Фибра поддаётся всем видам механической обработки (точение, сверление, нарезание резьбы, штампуется при толщине до 6 мм). Листовая фибра поддаётся формованию после размягчения её заготовок в горячей воде.

**5. Лакоткани** – гибкий электроизоляционный материал, получаемый пропиткой хлопчатобумажных, шёлковых, капроновых и стеклянных тканей масляными и масляно-битумными лаками, которые после высыхания образуют на поверхности ткани прочную эластичную плёнку, обладающую высокими диэлектрическими свойствами. Лакоткани применяют в виде лент, вырезанных под углом  $45^{\circ}$  к основе в качестве изоляции в электрических машинах и аппаратах низкого напряжения.

**6. Асбест** – волокнистый минерал естественного происхождения, обладающий высокой огнестойкостью ( $1450^{\circ}\text{C}$ ), малой тепло- и электропроводностью, достаточной механической прочностью. Для целей электрической изоляции из асбеста изготавливают пряжу, ленты, ткани, бумагу, картон и другие изделия.

#### 2.4.2 Керамические электроизоляционные материалы

Электротехническая керамика представляет собой глиносодержащие материалы с добавлением окислов бария, кальция, титана, стронция.

**1. Фарфор электротехнический** – это электроизоляционный материал являющийся одним из основных материалов изоляторного производства. Для изготовления фарфора применяют специальные сорта глины ( каолин ), минералы кварца и полевого шпата.

Сущность изготовления фарфора сводится к очистке от примесей всех составных частей, измельчению их и перемешиванию в однородную массу с водой. Из фарфоровой массы получают изделия нужной конфигурации, затем сушка, глазуровка и обжиг.

**2. Стеатит** – вид керамики, изготавливаемый на основе минерала талька. Специальные сорта стеатита предназначаются для высокочастотной изоляции и имеют хорошие механические свойства. Преимуществом стеатитовой керамики является также малая усадка при обжиге, позволяющая получать изделия сравнительно точных размеров. К тому же он не нуждается в глазуровке и может легко обрабатываться шлифовкой.

**3. Радиокерамические материалы** – это керамика, которая применяется, в частности, для изготовления керамических конденсаторов. Такие конденсаторы имеют значительно меньшие размеры и массу, чем конденсаторы из стеатита.

#### **2.4.3 Стеклообразные электроизоляционные материалы**

**1. Стекло** – это твёрдый раствор различных силикатов. Механические свойства стёкол различны и зависят от их химического состава. Все стёкла отличаются малой теплопроводностью, высокими оптическими и электроизоляционными свойствами.

**2. Кварцевое стекло** – получается плавлением горного хрусталя, жильного кварца, или чистых кварцевых песков при весьма высоких температурах ( выше  $1700^{\circ}\text{C}$  ) и обладает наилучшими электроизолирующими свойствами. Кварцевое стекло отличается очень высоким пробивным напряжением, малой электропроводностью даже при

высоких температурах. Это даёт возможность использовать его в качестве высокочастотного и высоковольтного изолятора в приборостроении.

**3. Слюда** является важнейшим из природных минеральных электроизоляционных материалов и имеет хорошие электроизоляционные свойства, высокую теплостойкость ( 1250 – 1300<sup>0</sup>С ), влагостойкость, механическую прочность, гибкость. Применяется в электротехнической промышленности для изоляции высоких напряжений, а также в качестве диэлектриков в конденсаторах.

#### **2.4.4 Горные электроизоляционные материалы**

**Мрамор, шифер, талькохлорид и базальт** – горные породы (минеральные), которые находят применение в качестве электроизоляционных материалов. Эта группа диэлектриков отличается высокой стойкостью к электрическим дугам и хорошими механическими характеристиками. Минеральные диэлектрики, кроме базальта, подаются всем видам механической обработки, за исключением штампования и нарезания резьбы. Изделия из мрамора, шифера и талькохлорида применяются в виде досок для панелей и электроизоляционных оснований для рубильников и переключателей низкого напряжения.

#### **2.4.5 Пластмассы**

Пластмассы являются самостоятельным конструкционным материалом и обладают рядом ценных технических свойств.

**1. Волокнит** – прессматериал, наполненными хлопковыми очёсами, имеет светло-коричневый или чёрный цвет, применяется для низковольтных электроизоляционных деталей.

**2. Гетинакс** – слоистый прессованный материал, состоящий из двух или более слоёв бумаги, пропитанных смолами. Используется гетинакс как электроизоляционный материал.

**3. Текстолит** – слоистый прессованный материал из хлопчатобумажной ткани, пропитанной смолой; применяется для изготовления деталей, работающих под нагрузкой (шестерни, втулки, кольца), в качестве антифрикционного материала для изготовления подшипников скольжения, работающих в различных, часто в очень тяжёлых условиях, а также для деталей электрооборудования (электрощитки, панели, клеммы)

**4. Стеклотекстолит** – слоистый прессованный материал, состоит из стеклянной ткани, уложенной правильными слоями и смолы. Обладает высокой прочностью, высокими диэлектрическими свойствами, термо- и водостойкостью. Стеклотекстолит выпускается в виде листов и плит. Применяется для изготовления упругих мембран, работающих в керосине, и как электроизоляционный материал.

**5. Асботекстолит** – прессованный слоистый пластический материал из специальной асбестовой ткани, уложенной правильными слоями и пропитанной спиртовым раствором смолы. Применяется как прокладочный материал, работающий в условиях повышенной температуры, и для изготовления тормозных устройств и деталей механизмов сцепления.

**6. Полиэтилен** – бесцветный роговидный продукт, жирный на ощупь, морозостоек, горюч, хорошо сохраняет форму даже при температуре + 60<sup>0</sup>С, механически прочен, обладает высокими диэлектрическими свойствами, является самой лёгкой и наиболее водостойкой пластмассой. Применяется полиэтилен для изоляции различных кабелей и проводов.

**7. Полистирол** – бесцветная смола с хорошими антикоррозионными свойствами, является типичным высокочастотным диэлектриком. Полистирол применяется для изоляции кабелей, как прессматериал для изготовления различных электроизоляционных деталей.



**8. Капрон** – представляет собой твёрдую высокоплавкую смолу белого или светло-жёлтого цвета, без запаха, с малым удельным весом, температурой плавления 212 – 215<sup>0</sup>С. Капрон отличается исключительной стойкостью к щелочам, устойчив к бензину, спирту, бензолу, гигроскопичен, но в то же время вода для него является пластификатором и придаёт ему эластичность.

Капрон применяется для изготовления искусственного волокна и технических изделий (подшипников скольжения, шайб, втулок, зубчатых колёс, плёнок, лент).

### **2.5 Газообразные электроизоляционные материалы**

К газообразным диэлектрикам относятся: **воздух, азот, кислород, водород, метан, гелий, неон, аргон, криптон, ксеон.**

### **2.6 Содержание работы и порядок ее выполнения**

Ознакомиться с образцами электроизоляционных материалов, представленных на стенде.

Для электроизоляционных материалов, представленных в таблице 2.2., определить классы нагревостойкости по таблице 2.1.

**Таблица 2.2 - Нагревостойкость электроизоляционных материалов**

<b>№</b>	<b>Материал</b>	<b>Класс изоляции, температура.</b>
<b>1</b>	<b>Текстолит</b>	
<b>2</b>	<b>Электрокартон</b>	
<b>3</b>	<b>Церезин</b>	
<b>4</b>	<b>Полиэтилен</b>	
<b>5</b>	<b>Кварцевое стекло</b>	
<b>6</b>	<b>Совол</b>	
<b>7</b>	<b>Слюда</b>	
<b>8</b>	<b>Стеатит</b>	
<b>9</b>	<b>Канифоль</b>	

10	Полистирол	
11	Древесина	
12	Фибра	
13	Асботекстолит	
14	Капрон	
15	Совтол	
16	Фарфор	
17	Лакоткани	
18	Стекло	
19	Асбест	
20	Бумага	
21	Стеатит	
22	Кабельное масло	
23	Базальт	
24	Волокнит	
25	Талькохлорид	

**Контрольные вопросы:**

1. На какие группы делятся по своему агрегатному состоянию диэлектрики?
2. Каково назначение электрической изоляции?
3. Какими свойствами должны обладать диэлектрики?
4. Какие основные характеристики присущи диэлектрикам?
5. На какие два класса делятся жидкие диэлектрики?
6. Какие диэлектрики относятся к жидким электроизоляционным материалам, их характеристика и область применения?
7. Какие диэлектрики относятся к твердеющим электроизоляционным материалам, их характеристика и область применения?
8. На какие классы делятся твёрдые электроизоляционные материалы?
9. Какие диэлектрики относятся к твёрдым электроизоляционным материалам, их характеристика и область применения?
10. Перечислить какие диэлектрики относятся к газообразным электроизоляционным материалам?

### *Лабораторная работа № 3*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА**

**Цель работы:** Изучить методику экспериментального определения электрической прочности трансформаторного масла.

### **Программа работы:**

1. Изучить физические основы явления пробоя жидких электроизоляционных материалов.
2. Изучить методику измерения электрической прочности трансформаторного масла.
3. Определить экспериментально электрическую прочность трансформаторного масла.
4. Написать отчёт к лабораторной работе.

### **3.1 Краткие теоретические сведения**

Трансформаторное масло относится к жидким диэлектрикам.

По химической природе жидкие диэлектрики принято разделять на нефтяные масла ( трансформаторное, конденсаторное, кабельное ) и синтетические жидкости.

Нефтяные масла предназначены для пропитки изоляции трансформаторов, конденсаторов, кабелей с целью повышения её электрической прочности и отвода тепла в процессе конвенции,

для дугогашения в масляных выключателях, заливки маслонеполненных вводов, реакторов, реостатов и других электроаппаратов.

К нефтяным маслам предъявляются следующие требования :

- высокая теплопроводность ;
- стойкость к окислению ;
- совместимость с твёрдыми материалами ;
- пожаробезопасность;
- экологическая безопасность;
- вязкость;
- стабильность;

Если в результате повышения приложенного к диэлектрику напряжения напряжённость электрического поля в диэлектрике превысит некоторое критическое значение, то диэлектрик теряет свои электроизоляционные свойства. В этом случае сквозной ток, протекающий через диэлектрик, резко возрастает  $\sim 10^8$  А/м<sup>2</sup>, а сопротивление диэлектрика резко уменьшается, тогда происходит короткое замыкание электродов. Это явление называется *пробоем*.

С физической точки зрения пробой представляет собой неконтролируемое повышение электрической проводимости изоляции, которое могут вызвать процессы различного характера, например, ударная ионизация, нагрев, старение и т.д.

**Электрический пробой** – это процесс, в результате которого диэлектрик разрушается силами, действующими в электрическом поле на электрические заряды его атомов, молекул или ионов.

Этот вид пробоя протекает почти мгновенно ( $10^{-8} \dots 10^{-5}$  с). Он вызывается ударной ионизацией электронами.

**Тепловой пробой** обусловлен прогрессивно нарастающим выделением теплоты в диэлектрике под действием диэлектрических потерь или электропроводности. Тепловой пробой возникает, когда нарушается равновесие между теплотой выделяющейся в диэлектрике и теплотой, которая отводится в окружающую среду.

Если выделяющаяся теплота больше отводимой, то наступает пробой. Тепловой пробой развивается в течение  $10^{-3} \dots 10^{-2}$  с.

**Электрохимический пробой** (электрическое старение) обусловлен медленным изменением химического состава и структуры диэлектрика, которые развиваются под действием электрического поля или частичных разрядов в диэлектрике или в окружающей диэлектрик среде. Время развития электрохимического пробоя может достигать  $10^3 \dots 10^8$  с. Процесс электрохимического пробоя развивается в электрических полях с напряжённостью, значительно меньшей, чем электрическая прочность диэлектрика.

Значение напряжения при котором происходит пробой называется **пробивным напряжением** ( $U_{пр}$  кВ), а соответствующее значение напряжённости электрического поля **электрической прочностью** диэлектрика ( $E_{пр}$ , кВ/мм).

В случае однородного электрического поля электрическая прочность определяется по формуле :

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}, \text{ кВ/мм} \quad (3.1)$$

где,  $U_{пр}$  – напряжение пробоя, кВ;

$h$  – расстояние между электродами, мм;

В случае неоднородного электрического поля определённая таким образом электрическая прочность является условным параметром.

Электрическая прочность диэлектриков зависит от давления и температуры диэлектрика, от формы и размеров электродов, от расстояния между электродами, от характера приложенного напряжения (переменное, постоянное), от степени загрязнения волокнами, водой и другими примесями. Но три фактора, которые влияют на электрическую прочность при пробое всех типов это : давление, температура и площадь электродов.

При повышении **давления** жидкого диэлектрика электрическая прочность увеличивается. Это объясняется тем, что при более высоком давлении уменьшается средний свободный пробег носителей заряда и,

следовательно, затрудняются условия пробоя. При уменьшении давления электрическая прочность уменьшается. Это вызвано увеличением среднего пути свободного пробега свободных носителей заряда, увеличением их кинетической энергии при столкновениях, улучшением условий возникновения ударной ионизации, а тем самым и условий пробоя.

Электрическая прочность жидких диэлектриков уменьшается с ростом температуры. Это связано с тем, что тепловое движение ослабляет силы связи между частицами, повышает концентрацию свободных носителей заряда, с ростом температуры растут и диэлектрические потери.

Вероятность существования нарушения однородности или слабого места в диэлектрике тем больше, чем больше площадь электродов. Поэтому при электродах большей площади электрическая прочность меньше, чем при электродах меньшей площади.

Передача теплоты через более толстый слой ( $h$ ) диэлектрика более затруднена, поэтому толстые диэлектрики хуже охлаждаются. Поэтому их электрическая прочность меньше. Кроме того, в более толстом диэлектрике больше вероятность существования дефектов.

При чисто электрическом пробое значение электрической прочности при постоянном и переменном напряжении практически равны ( при сравнении необходимо брать максимальные значения переменного напряжения, а не действующее ). При постоянном напряжении возникают потери на электропроводность, а при переменном напряжении потери на электропроводность и поляризацию. Поэтому в переменном поле выделение теплоты больше и условия для теплового пробоя более благоприятны, следовательно, при постоянном напряжении электрическая прочность больше чем при переменном.

Механизм пробоя и значение электрической прочности электроизоляционных жидкостей зависит прежде всего от их чистоты.

Электрический пробой тщательно очищенных жидкостей при кратковременном воздействии электрического поля происходит за счёт сочетания двух процессов: ударной ионизации электронами и холодной эмиссии с катода. В соответствии с этим электрическая прочность тщательно очищенных жидкостей на два порядка выше, чем газов, и составляет примерно 100 кВ/мм. Это объясняется тем, что требуется большая напряжённость поля для того чтобы электрон, двигаясь в более плотной среде, с меньшей длиной свободного пробега  $\lambda$  накопил энергию, достаточную для ионизации.

Природу пробоя загрязнённых и технически чистых жидкостей определяют процессы, связанные с движением и перераспределением частиц примесей. Под действием высокого напряжения эти процессы приводят к возникновению таких вторичных явлений, как образование мостиков из твёрдых частиц или пузырьков газа, т.е. проводящих каналов. В частности, при нахождении жидкого диэлектрика в сильных полях, особенно высокой частоты, происходит его нагрев и образование пузырьков пара.

Поэтому характер пробоя жидких диэлектриков зависит от множества факторов, определяемых в значительной мере видом, размером, количеством и распределением примесей. Наличие мостиков и цепочек из твёрдых частиц сильно искажает поле между электродами. В результате пробой жидких электроизоляционных материалов происходит в неоднородном поле, а это приводит к снижению его электрической прочности.

Как степень очистки влияет на электрическую прочность трансформаторного масла показано в таблице 3.1

Таблица 3.1-Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от степени его очистки

Степень очистки трансформаторного масла	$E_{пр}$ , кВ/мм
неочищенное	5
очищенное центрифугой	13
очищенное бумажным фильтром	16
очищенное уплотненным фильтром (однократное фильтрование)	23
очищенное (двухкратное фильтрование)	33

Влага является наиболее часто встречающейся примесью в трансформаторном масле и резко снижает его электрическую прочность даже при малом её содержании. Влага может находиться в трансформаторном масле в двух состояниях : молекулярном ( растворённом ) и эмульгированном.

Растворённая влага не вызывает уменьшение электрической прочности, если не создаётся слишком высокая концентрация, когда из-за повышенной электропроводности может произойти тепловой пробой.

Эмульгированная влага, наоборот, вызывает сильное уменьшение  $E_{пр}$ . Наличие электрического поля на границе водяной капли вызывает растягивающие усилия, под действием которых капля меняет шаровидную форму на эллипсоидную с большой полуосью, направленной по полю. В качестве критерия пробоя принимается условие, когда капли, выстроившиеся по полю, сольются в единый водяной канал, по которому произойдёт пробой.

При чисто электрическом пробое электрическая прочность от частоты переменного электрического поля не зависит.

При тепловом пробое пропорционально частоте увеличиваются диэлектрические потери, что вызывает уменьшение электрической прочности с ростом частоты.



### 3.2 Содержание работы и порядок ее выполнения

Экспериментальная установка АИИ-70 служит для измерения напряжения пробоя ( $U_{пр}$ ), при переменном напряжении частотой 50 Гц .

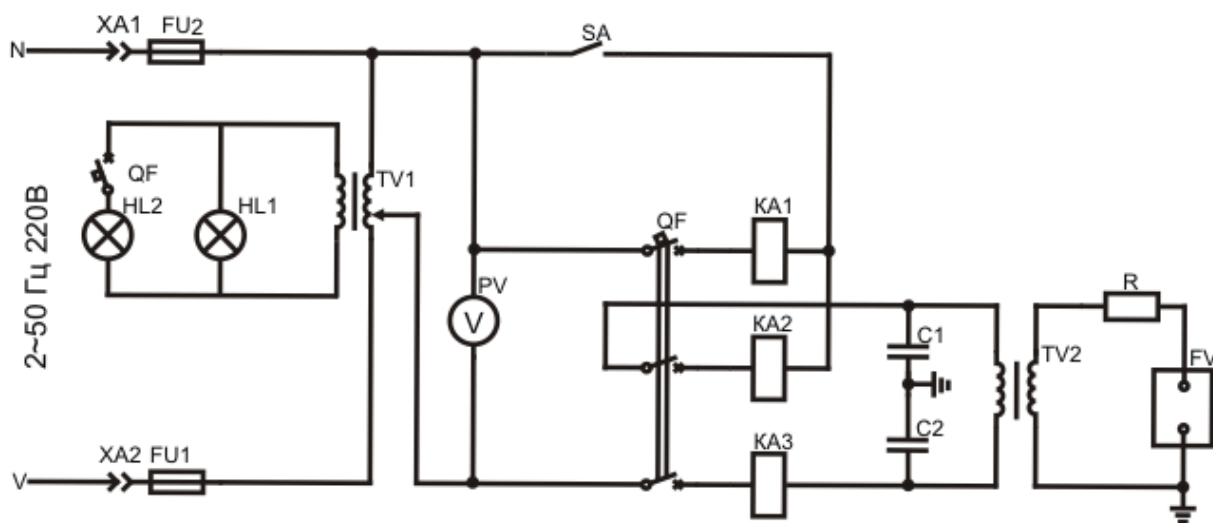


Рисунок 3.1. - Принципиальная электрическая схема управления установкой АИИ – 70

Принципиальная электрическая схема управления установкой АИИ – 70 (рисунок 3.1) включает в себя: регулировочный автотрансформатор **TV1**, высоковольтный трансформатор **TV2**, автоматический выключатель **QF** с тремя токовыми обмотками: **KA1**, **KA2** и **KA3** выполняющими максимально-токовую защиту, сигнальные лампочки **HL1**, **HL2**, штепсельные разъёмы **XA1**, **XA2** (электрическая розетка), предохранители **FU1**, **FU2**, вольтметр **PV**, переключатель максимально-токовой защиты **SA**, конденсаторы **C1**, **C2**, резистор **R** и сосуд с электродами **FV**. контакта **QF** подающего напряжение на токовые катушки **KA1**, **KA2** и **KA3**.

Мощность высоковольтного трансформатора напряжения **TV2** составляет 2 кВА, наивысшее напряжение при испытании на переменном токе составляет 50 кВ.

Напряжение от сети через предохранители **FU1** и **FU2** подводится к регулировочному автотрансформатору **TV1**, служащему для плавного изменения напряжения. Включение высокого напряжения осуществляется нажатием кнопки автоматического выключателя **QF**, имеющего четыре

замыкающих контакта. Три силовых последовательно ( причём одна из них шунтируется переключателем защиты **SA** ). Разомкнутое положение переключателя **SA** соответствует « чувствительной » защите, автоматический выключатель **QF** срабатывает при пробое на стороне высокого напряжения **TV2** .

Когда переключатель **SA** замкнут, осуществляется « грубая » защита : автоматический выключатель **QF** не срабатывает при коротком замыкании ( пробое ) на высокой стороне и остаётся включённым, если мощность на стороне высокого напряжения трансформатора **TV2** при напряжении 50 кВ не превосходит 2 кВА - такой режим должен длиться не более 1 минуты.

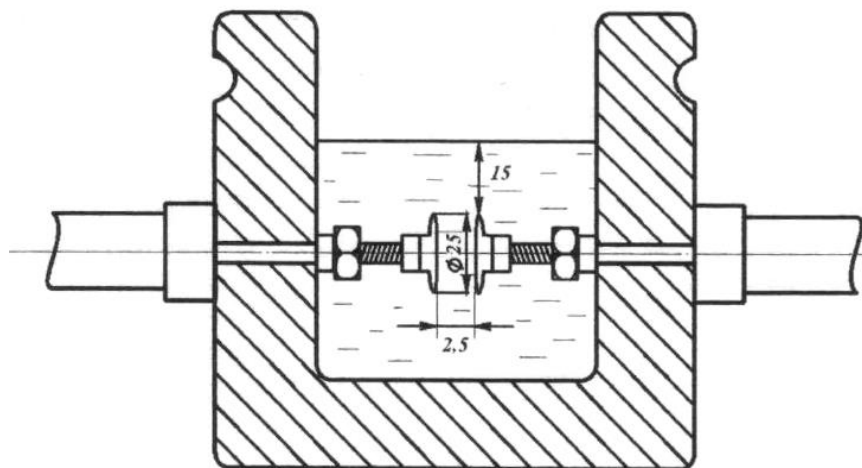


Рисунок 3.2 - Сосуд для испытания трансформаторного масла на пробой

Измерение напряжения на образце производится на стороне низкого напряжения вольтметром **PV** , проградуированным в киловольтах. Резистор **R** служит для защиты трансформатора **TV2** от перегрузки при пробое образца. Сосуд с электродами **FV** служит для стандартного испытания жидких материалов.

Аппарат АИИ-70 позволяет производить кратковременные испытания переменным напряжением до 50 кВ при длительности не более 1 минуты с интервалом 5 минут

### **Порядок выполнения работы :**

1. Проверить заземление установки АИИ-70 ;
2. Вынуть сосуд с электродами из установки АИИ-70 и установить с помощью щупа требуемое расстояние ( 2,5 мм ) между электродами.
3. Промыть фарфоровый сосуд с электродами сухим чистым маслом;
4. Залить в промытый сосуд такое количество испытуемого масла ( приблизительно 500 мл ), чтобы электроды были покрыты слоем масла не менее чем на 15 мм;
5. Открыть дверцу на крышке аппарата АИИ-70, установить сосуд на металлические стойки и снова закрыть крышку;
6. Дать маслу отстояться в течение 5 – 10 мин. для того, чтобы из него вышли пузырьки воздуха;
7. Рукоятку «защита» установить в положение «чувствительная»;
8. Проверить положение ручки регулировочного автотрансформатора **TV1** ( ручка должна быть повернута против часовой стрелки до упора );
9. Вставить колодку в вилку аппарата;
10. Включить вилку шнура питания в сеть ( эл. розетку ), при этом должна загореться сигнальная лампочка **HL1**, указывающая на наличие напряжения на электрической схеме;
11. Нажать кнопку «Вкл.» автоматического выключателя **QF** , при этом должна загореться сигнальная лампочка **HL2**, указывающая на то, что напряжение подаётся на низкую сторону трансформатора **TV2**.
12. Плавно вращая ручку регулятора напряжения автотрансформатора **TV1** по часовой стрелке со скоростью 2 кВ/с ( отсчёт вести по шкале киловольтметра **PV**, отградуированной в киловольтах эффективных ) пока не произойдёт пробой масла, сопровождающийся появлением сплошной искры между электродами в

масле. Отключение аппарата ( автоматического выключателя ) осуществляется автоматически.

Если пробой масла произошёл, а автоматический выключатель QF не сработал ( сигнальная лампочка HL2 продолжает гореть), немедленно отключить напряжение ( выдернуть вилку из розетки );

13. После первого испытания ручку регулировочного автотрансформатора установить в нулевое положение ;

14. Отключить питание ( выдернуть вилку из розетки );

15. Открыть дверцу и помешать сухой стеклянной палочкой масло в сосуде, для удаления образовавшихся между электродами углеродных частиц и пузырьков газа, появившихся в результате пробоя;

16. После оттаивания в течение 5 – 6 мин испытание повторить;

17. Всего следует провести 6 пробоев; данные испытаний занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 Данные испытания трансформаторного масла на пробой

№	$U_{пр},$ кВ	$E_{пр},$ кВ/мм	$E_{пр.ср.},$ кВ/мм	$\pm \Delta E_{пр},$ кВ/мм	$\Delta E_{пр.отн.},$ о.е.
1	-	-	-	-	-
2					
3					
4					
5					
6					

18. По формуле ( 3.1 ) вычислить значения электрической прочности (  $E_{пр}$  ) пяти последних пробоев ( первый пробой во внимание не принимается );

19. Вычислить среднеарифметическое значение электрической прочности по формуле:

$$E_{\text{пр.ср.}} = \frac{E_{\text{пр.2}} + E_{\text{пр.3}} + E_{\text{пр.4}} + E_{\text{пр.5}} + E_{\text{пр.6}}}{5}, \text{ кВ/мм}; \quad (3.2)$$

20. Вычислить абсолютную погрешность определения электрической прочности по формуле :

$$\Delta E_{\text{пр.i}} = E_{\text{пр.i}} - E_{\text{пр.ср.}}, \text{ кВ/мм} \quad (3.3)$$

21. Вычислить относительную погрешность определения электрической прочности по формуле :

$$\Delta E_{\text{пр.отн.i}} = \frac{\Delta E_{\text{пр.i}}}{E_{\text{пр.ср.}}}, \text{ от.ед.} \quad (3.4)$$

### Контрольные вопросы:

1. Для чего предназначены нефтяные масла?
2. Какие требования предъявляются к нефтяным маслам?
3. Что из себя представляет пробой диэлектрика (трансформаторного масла)?
4. Какие существуют виды пробоев?
5. Что такое электрическая прочность диэлектрика?
6. От чего зависит величина электрической прочности диэлектрика?
7. Как зависит электрическая прочность диэлектрика от давления и почему?
8. Как зависит электрическая прочность диэлектрика от температуры и почему?
9. Почему электрическая прочность диэлектрика зависит от площади электродов?
10. Как электрическая прочность зависит от толщины диэлектрика?
11. Почему электрическая прочность диэлектрика при постоянном напряжении больше чем при переменном?
12. Как содержание примесей влияет на значение электрической прочности трансформаторного масла и почему?
13. Как наличие влаги сказывается на величине электрической прочности трансформаторного масла и почему?

14. Как электрическая прочность зависит от частоты переменного электрического поля?

15. Какие элементы включает в себя принципиальная электрическая схема управления установкой АИИ – 70?

#### *Лабораторная работа №4.*

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТВЁРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ**

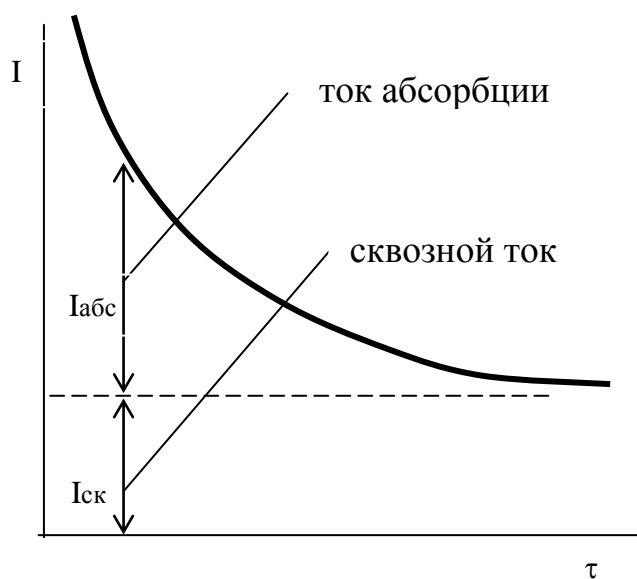
**Цель работы:** Изучить методику экспериментального определения объёмного и поверхностного сопротивлений различных твёрдых электроизоляционных материалов.

#### **Программа работы:**

1. Изучить физические основы прохождения электрического тока через электроизоляционный материал.
2. Изучить методику измерения объёмного и поверхностного сопротивлений твёрдых диэлектриков.
3. Определить экспериментально объёмные сопротивления различных твёрдых диэлектриков.
4. Определить экспериментально поверхностные сопротивления различных твёрдых диэлектриков.
5. Написать отчёт к лабораторной работе.

## 4.1 Краткие теоретические сведения

Электроизоляционные материалы (ЭИМ) под воздействием приложенного постоянного напряжения обладают определённой электропроводностью, которая обуславливается передвижением свободных ионов самого диэлектрика и ионов примесей. Величина электропроводности или обратная ей величина - сопротивление является одним из важнейших показателей качества электроизоляционных материалов.



**Рисунок 4.1.**-Зависимость тока в электроизоляционном материале от времени

Вторая составляющая, обусловленная перемещением свободных носителей заряда, существует во всё время приложения напряжения и называется сквозным током утечки.

Поэтому следует определять сквозной ток через 1 минуту после подачи напряжения.

Электропроводность ЭИМ равняется отношению сквозного тока утечки к приложенному постоянному напряжению:

$$\gamma = \frac{I_{ск}}{U} ; \quad (4.1.)$$

где,  $I_{ск}$  – сквозной ток утечки, А ;

$U$  - приложенное постоянное напряжение, В

Сквозной ток  $I_{ск}$ , проходящий через образец твёрдого ЭИМ, состоит из объёмного сквозного тока  $I_v$  и поверхностного сквозного тока  $I_s$  (рисунок 4.2) :

$$I_{ск} = I_v + I_s ; \quad (4.2.)$$

Для твёрдых ЭИМ необходимо различать объёмную и поверхностную электропроводности.

Для сравнительной оценки различных материалов в отношении их объёмной и поверхностной электропроводности пользуются значениями удельного объёмного сопротивления  $\rho_v$  и удельного поверхностного сопротивления  $\rho_s$ .

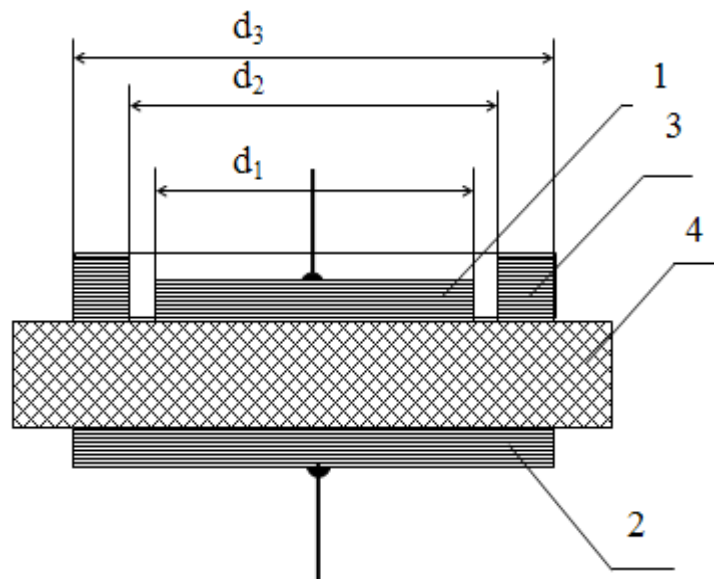


Рисунок 4.2 - Схема прохождения объёмного и поверхностного сквозных токов в твердом электроизоляционном материале.

По удельному объёмному сопротивлению ( $\rho_v$ ) может быть определена **удельная объёмная проводимость**

$$\gamma_v = \frac{1}{\rho_v} , \text{ См/м} ; \quad (4.3.)$$



Удельная объёмная проводимость  $\gamma_v$  измеряется в сименсах делённых на метр ( $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$ ).

По удельному поверхностному сопротивлению ( $\rho_s$ ) может быть определена **удельная поверхностная проводимость** :

$$\gamma_s = \frac{1}{\rho_s}, \text{ См}; \quad (4.4.)$$

Удельная поверхностная проводимость  $\gamma_s$  измеряется в сименсах ( $\text{См} = 1/\text{Ом}$ ).

В системе СИ удельное объёмное сопротивление  $\rho_v$  равно сопротивлению куба с ребром в 1 м, мысленно вырезанного из исследуемого материала, если ток проходит сквозь куб, от одной его грани к противоположной.

В случае плоского образца материала при однородном поле удельное объёмное сопротивление рассчитывается по формуле :

$$\rho_v = \frac{R_v \cdot S}{h}, \text{ Ом} \cdot \text{м}; \quad (3.5.)$$

где  $R_v$  – объёмное сопротивление образца, Ом;

$S$  - площадь верхнего (измерительного) электрода,  $\text{м}^2$ ;

$h$  - толщина образца, м.

Удельное поверхностное сопротивление равно сопротивлению квадрата (любых размеров), мысленно выделенного на поверхности материала, если ток проходит через квадрат, от одной его стороны к противоположной.

Удельное поверхностное сопротивление рассчитывается по формуле :

$$\rho_s = \frac{R_s \cdot d}{\ell}, \text{ Ом}; \quad (3.6)$$

где,  $R_s$  - поверхностное сопротивление образца материала, Ом;

$d$  – ширина электродов параллельно расположенных, м;

$\ell$  - расстояние между электродами, м.

**Полное сопротивление (сопротивление изоляции)** твёрдого

ЭИМ складывается из параллельно включенных объёмного и поверхностного сопротивления и определяется по формуле :

$$R = \frac{R_v \cdot R_s}{R_v + R_s}, \text{ Ом}; \quad (3.7.)$$

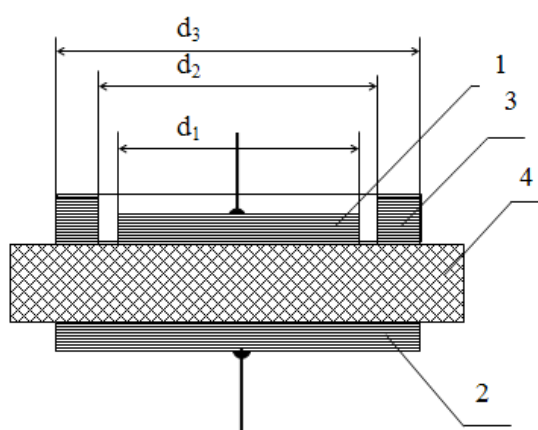
Измерение  $R_v$  и  $R_s$  ЭИМ производится, как правило, на плоских образцах и используется система из трёх электродов

( Рис.3.3. ). Напряжение прикладывается между измерительным электродом и электродом напряжения. Охранный электрод служит для уменьшения краевых эффектов, он заземляется.

В зависимости от измеряемой величины (  $R_v$  или  $R_s$  ) одни и те же электроды могут выполнять различные функции (табл.3.1.).

Таблица 4.1 - Назначение электродов

Обозначение электродов на Рис.3.3.	При измерении	
	$R_v$	$R_s$
<b>1</b>	измерительный	измерительный
<b>2</b>	напряжения	охранный
<b>3</b>	охранный	напряжения



**Рисунок 4.3.**-Расположение электродов на плоском образце: 1 – верхний электрод; 2 – нижний электрод; 3 – электрод в виде кольца, охватывающий верхний электрод; 4 – испытуемый образец ЭИМ

Удельное объёмное сопротивление рассчитывается по формуле :

$$\rho_v = R_v \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4 \cdot h}, \text{ Ом} \cdot \text{м}; \quad (3.8.)$$

Удельное поверхностное сопротивление рассчитывается по формуле :

$$\rho_s = R_s \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\ln \frac{d_2}{d_1}}, \text{ Ом}; \quad (3.9.)$$

где  $\pi = 3,14$  ;

$h$  – толщина образца, м ;

$d_1$  – диаметр верхнего электрода, м ;

$d_2$  - внутренний диаметр электрода в виде кольца, м ;

$R_v$  – объёмное сопротивление образца, Ом ;

$R_s$  - поверхностное сопротивление образца, Ом .

### 3.2 Содержание работы и порядок ее выполнения

Измерительная ячейка для испытаний образцов твёрдых ЭИМ (рисунок 4.4.) представляет систему трёх электродов.

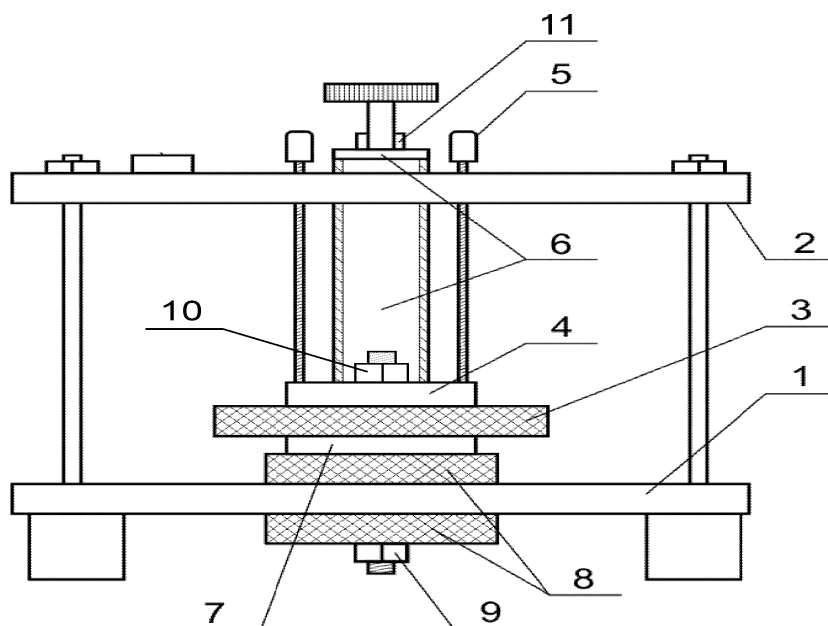


Рисунок 4.4. - Ячейка для измерения  $R_v$  и  $R_s$  твёрдых ЭИМ :

1 – нижнее основание ; 2 – верхнее основание ; 3 – образец ЭИМ ;  
 4 – электрод в виде кольца ; 5 – его зажимы ; 6 – верхний электрод ; 7 –  
 нижний электрод ; 8 – фторопластовая изоляция ; 9 – контакт  
 присоединения провода к нижнему электроду ;  
 10 - контакт присоединения провода к электроду в виде кольца ;  
 11 – контакт присоединения провода к верхнему электроду.

Верхний электрод имеет диаметр :  $d_1 = 2,5 \text{ см}$  ;

Нижний электрод имеет диаметр :  $d_3 = 4,99 \text{ см}$  ;

Внутренний диаметр электрода в виде кольца :  $d_2 = 2,89 \text{ см}$  ;

Внешний диаметр электрода в виде кольца :  $d_3 = 4,99 \text{ см}$ .

Измерение объёмного ( $R_v$ ) и поверхностного ( $R_s$ ) сопротивлений  
 твёрдых ЭИМ проводится с использованием мегаомметра Ф 4101 (   
 Рис.3.5.).



Рисунок 4.5 - Внешний вид мегаомметра Ф 4101

Мегаомметр Ф 4101 предназначен для измерения сопротивления  
 постоянному току в диапазоне от «0» до «20000» МОм. При-меняемый в  
 приборе метод измерения сопротивления основан на сравнении

измеряемого сопротивления и образцового сопротивления с помощью усилителя с обратной связью. В приборе имеется 5 диапазонов измерения сопротивлений и используются три шкалы (логарифмические). Диапазоны измерения, величины сопротивления в зависимости от положения переключателя диапазонов измерения и переключения напряжения приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Диапазоны измерений сопротивлений Ф 4101

Положение переключателя диапазонов измерения сопротивлений	Положение переключателя напряжений		
	$\frac{100V}{\times 1}$	$\frac{500V}{\times 5}$	$\frac{1000V}{\times 10}$
	Диапазоны измерений, МОм		
<b>I×1</b>	0 - 2	0 - 10	0 - 20
<b>II×1</b>	0,1 - 2	0,5 - 10	1 - 20
<b>III×10</b>	1 - 20	5 - 100	10 - 200
<b>III×10<sup>2</sup></b>	10 - 200	50 - 1000	100 - 2000
<b>III×10<sup>3</sup></b>	100 - 2000	500 - 10000	1000 - 20000

1. Измерить толщину испытуемого образца ЭИМ, данные занести в таблицу 4.3.
2. Поместить в измерительную ячейку ( Рис.3.4.) испытуемый образец ЭИМ и плотно прижать его зажимами - 5.
3. Присоединить провод к верхнему (измерительному) электроду: к клемме 11, второй провод присоединить к электроду в виде кольца: к клемме 10, третий провод присоединить к нижнему электроду: к клемме 9 ( рисунок 4.4. ).
4. Заземлить мегаомметр : клемму «земля» заземлить ( клемма «земля» находится на задней стенке мегаомметра ).

5. Включить мегаомметр в сеть, затем нажать кнопку «ВКЛ.», должна загореться сигнальная лампочка : через 15 секунд прибор готов к работе.
6. Установить переключатель измерительных напряжений в нужное положение ( по указанию преподавателя )
7. Установить переключатель диапазонов измерения сопротивлений в положение « I ×1 ».
8. При разомкнутых зажимах « r<sub>x</sub>» нажать кнопку «ИЗМЕР» и установить ручкой «УСТ. ∞» стрелку прибора на отметку « ∞ ».
9. Замкнуть зажимы « r<sub>x</sub>» , нажать кнопку «ИЗМЕР» и установить ручкой «УСТ. 0» стрелку прибора на отметку « 0 » шкалы « I » ( калибровка ).

#### **Измерение объёмного сопротивления R<sub>v</sub> :**

10. Подключить к зажимам « r<sub>x</sub>» мегаомметра ( Рис.3.5 ) зажим 11 верхнего и зажим 9 нижнего электродов ( Рис.3.4 ).
11. Электрод в виде кольца ( зажим 10, Рис.3.4.) заземлить.  
При необходимости экранировки, для уменьшения влияния токов утечки, экран объекта (ЭИМ) подсоединить к зажиму «Э» мегаомметра.
12. Нажать кнопку «ИЗМЕР.», подав на испытуемый образец ЭИМ напряжение; на время измерения ( 5 секунд ) держать кнопку «ИЗМЕР.» нажатой. Если стрелка прибора приближается к отметке «∞», переключатель диапазонов измерения сопротивлений последовательно установить в положение, при котором стрелка установится в рабочей части шкалы, записать показания прибора.
13. По окончании измерений переключатель диапазонов измерения сопротивлений установить в положение « I ×1» и спустя 15 секунд разрядить образец ЭИМ, наложив на него заземление.
14. Показания измеренного сопротивления по соответствующей шкале умножить на множители, соответствующие данному пределу измерений

сопротивлений и измерительному напряжению ( рисунок 4.5 ). Результат расчёта  $R_v$  занести в таблицу 4.3.

### **Измерение поверхностного сопротивления $R_s$ :**

15. Подключить к зажимам «г<sub>x</sub>» мегаомметра ( рисунок 4.5 ) зажим 11 верхнего и зажим 10 электрода в виде кольца ( рисунок 4.4 ).

16. Нижний электрод (зажим 9, рисунок 4.4.) заземлить. При необходимости экранировки, для уменьшения влияния токов утечки, экран объекта (ЭИМ) подсоединить к зажиму «Э» мегаомметра.

17. Нажать кнопку «ИЗМЕР.», подав на испытуемый образец ЭИМ напряжение ; на время измерения ( 1 минуту ) держать кнопку «ИЗМЕР.» нажатой. Если стрелка прибора приближается к отметке «∞», переключатель диапазонов измерения сопротивлений последовательно установить в положение, при котором стрелка установится в рабочей части шкалы, записать показания прибора.

18. По окончании измерений переключатель диапазонов измерения сопротивлений установить в положение « I ×1 » и спустя 15 секунд разрядить образец ЭИМ, наложив на него заземление. Мегаомметр отключить.

19. Показания измеренного сопротивления по соответствующей шкале умножить на множители, соответствующие данному пределу измерений сопротивлений и измерительному напряжению ( рисунок 4.5 ). Результат расчёта  $R_s$  занести в таблицу 4.3.

**Примечание** : При больших напряжённостях поля, превышающих 10 – 100 МВ/м, необходимо учитывать возможность появления в кристаллических диэлектриках электронного тока, быстро возрастающего с увеличением напряжённости поля, вследствие чего наблюдаются отступления от закона Ома.

Таблица 4.3 - Результаты измерений объёмного  $R_V$  и поверхностного  $R_S$  сопротивлений ЭИМ

Наименование	Величина
Толщина образца, $h$ , м	
Объёмное сопротивления ЭИМ, $R_V$ , Ом	
Поверхностное сопротивление ЭИМ, $R_S$ , Ом	
Полное сопротивление ЭИМ, $R$ , Ом	
Удельное объёмное сопротивление ЭИМ, $\rho_V$ , Ом·м	
Удельное поверхностное сопротивление ЭИМ, $\rho_S$ , Ом	
Удельная объёмная проводимость ЭИМ, $\gamma_V$ , См/м	
Удельная поверхностная проводимость ЭИМ, $\gamma_S$ , См	

Таблица 3.4 - Приставки к обозначениям единиц

Тера (Т)	$10^{12}$	Санتي (с)	$10^{-2}$
Гига (Г)	$10^9$	Милли (м)	$10^{-3}$
Мега (М)	$10^6$	Микро (мк)	$10^{-6}$
Кило (к)	$10^3$	Нано (н)	$10^{-9}$
Деци (д)	$10^{-1}$	Пико (п)	$10^{-12}$

#### Контрольные вопросы :

1. Что является одним из важнейших показателей качества электроизоляционных материалов?
2. Какой ток называется током абсорбции?
3. Какой ток называется сквозным током утечки?
4. Как определяется электропроводность ЭИМ?
5. Из каких составляющих состоит сквозной ток?
6. Как определяется удельная объёмная проводимость?
7. Как определяется удельная поверхностная проводимость?
8. Чему равно в системе СИ удельное объёмное сопротивление?



9. По какой формуле рассчитывается удельное объёмное сопротивление?
10. Чему равно в системе СИ удельное поверхностное сопротивление ?
11. По какой формуле рассчитывается удельное поверхностное сопротивление?
12. По какой формуле рассчитывается полное сопротивление ?
13. По какой формуле рассчитывается удельное объёмное сопротивление при использовании системы из трёх электродов ?
14. По какой формуле рассчитывается удельное поверхностное сопротивление при использовании системы из трёх электродов?
15. Что из себя представляет измерительная ячейка и из чего она состоит?
16. Для чего предназначен мегаомметр Ф4101 и что он из себя представляет?

### *Лабораторная работа № 5*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Цель работы:** изучение электрических характеристик проводниковых материалов и методики их измерения.

### **Программа работы:**

Ознакомиться с методикой определения температурного коэффициента удельного электрического сопротивления и удельной теплопроводности проводников.

### **5.1 Краткие теоретические сведения**

Проводниками называются вещества, удельное электрическое сопротивление которых лежит в пределах от 0,01 до 10 мкОм·м. В качестве проводников электрического тока могут быть использованы твердые тела, жидкости, а при соответствующих условиях и газы. Практическое

применение в электротехнике нашли твердые проводниковые материалы на основе металлов и их сплавов. Из металлических проводниковых материалов могут быть выделены металлы высокой проводимости, имеющие удельное сопротивление  $\rho$  при нормальной температуре не более  $0,05 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ , и сплавы высокого сопротивления, имеющие  $\rho$  при нормальной температуре более  $0,3 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ .

Металлы высокой проводимости используются для изготовления проводов, токопроводящих жил кабелей, обмоток электрических машин и трансформаторов и т. п. К материалам высокой проводимости относятся: медь, алюминий, серебро, золото, платина, цинк, магний, никель, железо и др. К наиболее широко распространенным материалам высокой проводимости следует отнести медь, алюминий и их сплавы.

Преимущества меди, обеспечивающие ей широкое применение в качестве проводникового материала, следующие: 1) малое удельное сопротивление; 2) достаточно высокая механическая прочность; 3) удовлетворительная в большинстве случаев стойкость по отношению к коррозии; 4) хорошая обрабатываемость; 5) относительная легкость пайки и сварки.

Помимо чистой меди в качестве проводникового материала применяются ее сплавы с оловом, кремнием, фосфором, бериллием, хромом, магнием, кадмием. Такие сплавы (бронзы) имеют значительно более высокие механические свойства, чем чистая медь.

Сплав меди с цинком (латунь) обладает достаточно высоким относительным удлинением перед разрывом при повышенном пределе прочности при растяжении.

Алюминий является вторым по значению (после меди) проводниковым материалом. Алюминий приблизительно в 3,5 раза легче меди. Температурный коэффициент расширения, удельная теплоемкость и теплота плавления алюминия больше, чем меди. Алюминий обладает пониженными

по сравнению с медью свойствами, как механическими, так и электрическими. Однако важно, что алюминии менее дефицитен, чем медь.

Металлы и сплавы высокого сопротивления применяются для изготовления резисторов, электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания и т. п. К материалам и сплавам высокого сопротивления относятся: галлий, свинец, титан, барий, марганец, константан, сплавы на основе железа, такие как нихром, ферронихром, фехраль, хромаль и др.

При использовании сплавов высокого сопротивления для электроизмерительных приборов и образцовых резисторов помимо высокого удельного сопротивления требуются высокая стабильность  $\rho$  во времени, малый температурный коэффициент удельного сопротивления и малый коэффициент термоЭДС в паре данного сплава с медью.

При понижении температуры до 0 К удельное сопротивление  $\rho$  некоторых металлов стремится к нулю. Это явление носит название сверхпроводимости. При низких температурах (несколько десятков градусов по абсолютной шкале) удельное сопротивление этих металлов и сплавов ничтожно мало. Это явление носит название криопроводимости. Проводниковые материалы, обладающие таким свойством, называются сверхпроводниками и криопроводниками соответственно. К сверхпроводникам относятся иридий, алюминий, ниобий, ванадий, олово, индий, ртуть и другие металлы, сплавы и химические соединения различных элементов.

К жидким проводникам относятся расплавленные металлы и различные электролиты. Для большинства металлов температура плавления высока; только ртуть, имеющая температуру плавления около минус 39 °С, может быть использована в качестве жидкого металлического проводника при нормальной температуре. Другие металлы являются жидкими проводниками при повышенных температурах.

Наиболее ответственными соединениями, применяемыми в электротехнике, являются контакты, служащие для периодического

замыкания и размыкания электрических цепей. Материалы для разрывных контактов должны обеспечивать высокую надежность при малом переходном электрическом сопротивлении контакта в замкнутом состоянии. В качестве контактных материалов для разрывных контактов помимо чистых тугоплавких металлов применяются различные сплавы и металлокерамические композиции.

В некоторых случаях для уменьшения расходов цветных металлов в проводниковых конструкциях выгодно применять проводниковый биметалл. Это сталь, покрытая снаружи слоем меди, причем оба металла соединены друг с другом прочно и непрерывно по всей поверхности их соприкосновения. Биметаллические проводники применяются на линиях связи, для изготовления элементов автоматики и защиты.

В электротехнике также находят применение неметаллические проводники. Из числа твердых неметаллических проводниковых материалов наибольшее значение имеют материалы на основе углерода. Из угля изготавливают щетки электрических машин, электроды для прожекторов, электроды для дуговых электрических печей и электролитических ванн, аноды гальванических элементов. Угольные порошки используют в микрофонах для создания сопротивления, изменяющегося от звукового давления. Из угля делают высокоомные резисторы, разрядники для телефонных сетей; угольные изделия применяют в электровакуумной технике.

Механизм прохождения тока в металлах, – как в твердом, так и в жидком состоянии – обусловлен движением свободных электронов под воздействием электрического поля, поэтому металлы называют проводниками с электронной электропроводностью или проводниками первого рода. Проводниками второго рода, или электролитами, являются растворы кислот, щелочей и солей. Прохождение тока через эти вещества связано с переносом вместе с электрическими зарядами ионов в соответствии с законами Фарадея, вследствие чего состав электролита постепенно

изменяется, а на электродах выделяются продукты электролиза. Ионные кристаллы в расплавленном состоянии также являются проводниками второго рода. Все газы и пары, в том числе и пары металлов, при низких напряженностях электрического поля не являются проводниками. Если напряженность поля превзойдет некоторое критическое значение, обеспечивающее начало ударной и фотоионизации, то газ может стать проводником с электронной и ионной электропроводностью. Сильно ионизированный газ при равенстве числа электронов числу положительных ионов в единице объема представляет собой особую проводящую среду, носящую название плазмы.

## 5.2 Свойства проводников

К важнейшим параметрам, характеризующим электрические свойства проводниковых материалов, относятся:

- 1) удельная проводимость  $\gamma$ , или обратная ей величина – удельное сопротивление  $\rho$ ;
- 2) температурный коэффициент удельного сопротивления  $\text{TK}_\rho$  или  $\alpha_\rho$ ;
- 3) коэффициент теплопроводности  $\gamma_T$
- 4) контактная разность потенциалов и термоэлектродвижущая сила (термоЭДС);
- 5) работа выхода электронов из металла.

### ***Удельная проводимость и удельное сопротивление проводни-***

***ков.*** Связь плотности тока  $J$  и напряженности электрического поля

$E$  в проводнике дается известной формулой:

$$J = \gamma \cdot E, \quad (5.1)$$

где  $\gamma$  – удельная проводимость; в соответствии с законом Ома у металлических проводников  $\gamma$  не зависит от  $E$  при изменении последней в весьма широких пределах. Величина  $\rho = 1/\gamma$  может быть определена по выражению:

$$\rho = R \cdot S/l, \quad (5.2)$$

где  $R$  – электрическое сопротивление проводника длиной  $l$  с постоянным поперечным сечением  $S$ .

Удельное сопротивление измеряется в Ом·м. Для измерения  $\rho$  проводниковых материалов находит применение внесистемная единица Ом·мм<sup>2</sup>/м, равная по размеру единице СИ мкОм·м. Связь между названными единицами удельного сопротивления следующая:

$$1 \text{ Ом} \cdot \text{м} = 10^6 \text{ мкОм} \cdot \text{м} = 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}.$$

Диапазон значений удельного сопротивления  $\rho$  металлических проводников (при нормальной температуре) довольно узок: от 0,016 для серебра и до примерно 10 мкОм·м для железохромоалюминиевых сплавов. Удельная проводимость металлических проводников может быть определена по формуле

$$\gamma = \frac{e^2 n_0 \lambda}{2m v_T}, \quad (5.3)$$

где  $e$  – заряд электрона;

$n_0$  – число свободных электронов в единице объема металла;

$\lambda$  – средняя длина свободного пробега электрона между двумя соударениями с узлами решетки;

$m$  – масса электрона;

$v_T$  – средняя скорость теплового движения свободного электрона в металле.

Преобразование выражения удельной проводимости на основе положений квантовой механики приводит к формуле

$$\gamma = K n_0^{2/3} \lambda, \quad (5.4)$$

где  $K$  – численный коэффициент.

Для различных металлов скорости хаотического теплового движения электронов  $v_T$  (при определенной температуре) примерно одинаковы. Незначительно различаются также и концентрации свободных электронов  $n_0$ .

Поэтому значение удельной проводимости  $\gamma$  в основном зависит от средней длины свободного пробега электронов в данном проводнике  $l_0$ , которая определяется структурой проводникового материала. Все чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельного сопротивления; примеси, искажая решетку, приводят к увеличению  $\rho$ .

При переходе из твердого состояния в жидкое у большинства металлов наблюдается увеличение удельного сопротивления  $\rho$  (металлы, у которых при плавлении увеличивается объем), однако у некоторых металлов  $\rho$  при плавлении уменьшается (металлы, у которых при плавлении уменьшается объем: галлий, висмут, сурьма).

Значительное возрастание  $\rho$  наблюдается при сплавлении двух металлов в том случае, если они образуют друг с другом твердый раствор, т. е. атомы одного металла входят в кристаллическую решетку другого. Если же сплав двух металлов создает отдельную кристаллизацию и структура застывшего сплава представляет собой смесь кристаллов каждого из компонентов, то удельная проводимость у сплава меняется с изменением состава приблизительно линейно.

#### ***Температурный коэффициент удельного сопротивления металлов.***

Число носителей заряда в металлическом проводнике при повышении температуры практически остается неизменным. Однако вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки с ростом температуры появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения свободных электронов под действием электрического поля, т. е. уменьшаются средняя длина свободного пробега электрона  $\lambda$ , подвижность электронов и, как следствие, удельная проводимость металлов и возрастает удельное сопротивление. Иными словами, температурный коэффициент удельного сопротивления металлов положителен:

$$TK_{\rho} = \alpha_{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} K^{-1}. \quad (5.5)$$

Согласно электронной теории металлов значения  $\alpha_p$  чистых металлов в твердом состоянии должны быть близки к температурному коэффициенту расширения идеальных газов, т. е.  $1/273 = 0,0037 \text{ K}^{-1}$  (повышенными значениями  $\alpha_p$  обладают некоторые металлы, в том числе ферромагнитные: железо, никель и кобальт). При изменении температуры в узких диапазонах допустима кусочно-линейная аппроксимация зависимости  $\rho(T)$ ; в этом случае принимают, что

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \bar{\alpha}_p (T_2 - T_1)], \quad (5.6)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – удельные сопротивления проводникового материала при температурах  $T_1$  и  $T_2$  соответственно (при этом  $T_2 > T_1$ );

$\bar{\alpha}_p$  – средний температурный коэффициент удельного сопротивления данного материала в диапазоне температур от  $T_1$  до  $T_2$ .

Относительно высокими значениями температурного коэффициента удельного сопротивления обладают чистые металлы, а у сплавов  $\alpha_p$  меньше и даже может приобретать небольшие отрицательные значения. Сплав, у которого уменьшение подвижности с ростом температуры компенсируется возрастанием концентрации носителей заряда, будет иметь нулевой температурный коэффициент удельного сопротивления.

**Теплопроводность металлов.** За передачу теплоты через металл в основном ответственны свободные электроны, которые определяют электропроводность металлов и число которых в единице объема металла весьма велико. Поэтому коэффициент теплопроводности  $\gamma_T$  металлов, как правило, намного больше, чем коэффициент теплопроводности диэлектриков. Очевидно, что при прочих равных условиях, чем больше удельная электрическая проводимость металла, тем больше должен быть и его коэффициент теплопроводности.

При повышении температуры, когда подвижность электронов в металле и соответственно его удельная проводимость уменьшаются,



отношение коэффициента теплопроводности металла к его удельной проводимости  $\gamma_T/\gamma$

должно возрастать. Математически это выражается законом Видемана–Франца–Лоренца:

$$\frac{\gamma_T}{\gamma} = L_0 T, \quad (5.7)$$

где  $T$  – термодинамическая температура, К;

$L_0$  – число Лоренца.

$$L_0 = \frac{\pi^2 k^2}{3e^2} = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2/\text{К}^2, \quad (5.8)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

Закон Видемана–Франца–Лоренца выполняется (в области температур, близких к нормальной или несколько повышенных) для большинства металлов (исключение составляют марганец и бериллий).

При нормальной температуре для меди  $L_0 = 2,47 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2/\text{К}^2$ , для алюминия

$L_0 = 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2/\text{К}^2$ , для серебра  $L_0 = 2,35 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2/\text{К}^2$ .

В области низких температур отношение  $\gamma_T/\gamma$  не остается неизменным. Чистота и характер механической обработки металла могут влиять на его теплопроводность, в особенности при низких температурах.

**Термоэлектродвижущая сила.** При соединении двух различных металлических проводников между ними возникает контактная разность потенциалов. Причина появления разности потенциалов заключается в различии значений работы выхода электронов из различных металлов, а также в том, что концентрация электронов, а следовательно, и давление электронного газа у разных металлов и сплавов могут быть неодинаковыми. Из электронной теории металлов следует, что контактная разность потенциалов между металлами  $A$  и  $B$  определяется по формуле:

$$U_{AB} = U_B - U_A + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}, \quad (5.9)$$

где  $U_A$  и  $U_B$  – потенциалы соприкасающихся металлов;

$n_{0A}$  и  $n_{0B}$  – концентрации электронов в металлах  $A$  и  $B$ .

Если температуры «спаев» одинаковы, то сумма разности потенциалов в замкнутой цепи равна нулю. Иначе обстоит дело, когда один из спаев имеет температуру  $T_1$ , а другой – температуру  $T_2$ . В этом случае между спаями возникает термоЭДС, равная:

$$U = U_{AB} + U_{BA} = U_B - U_A + \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} + U_A - U_B + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_{0B}}{n_{0A}} = \frac{k}{e} (T_1 - T_2) \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} = \psi(T_1 - T_2), \quad (6.10)$$

где  $\psi$  – постоянный для данной пары проводников коэффициент термоЭДС, т. е. термоЭДС должна быть пропорциональна разности температур спаев.

Провод, составленный из двух изолированных друг от друга проволок из различных металлов или сплавов (термопара), применяют для измерения температур. В термопарах используются проводники, имеющие большой и стабильный коэффициент термоЭДС. Для изготовления термопар применяются следующие сплавы: копель, алюмель, хромель и т.п. Термопары могут применяться для измерения температур до 1600 °С. Для обмоток измерительных приборов и резисторов стремятся применять проводниковые материалы и сплавы с возможно меньшим коэффициентом термоЭДС относительно меди, чтобы избежать появления в измерительных схемах паразитных термоЭДС, которые могли бы вызвать ошибки при точных измерениях.

### 5.3 Содержание работы и порядок ее выполнения

1. С помощью мультиметра *МУ-65* (электронный измерительный прибор), измерить при комнатной температуре сопротивление  $R_0$  следующих материалов: меди, никеля, константана, стали и алюминия.

Мультиметр является сложным электронным измерительным прибором, который объединяет в себе несколько функций: вольтметр, амперметр и омметр. В настоящее время во многих мультиметрах доступны и другие функции:

- Прозвонка — измерение электрического сопротивления со звуковой (иногда и световой) сигнализацией низкого сопротивления цепи (обычно менее 50 Ом)
- Генерация тестового сигнала простейшей формы — как своеобразный вариант прозвонки
- Тест диодов — проверка целостности полупроводниковых диодов
- Тест транзисторов — проверка полупроводниковых транзисторов
- Измерение электрической емкости
- Измерение индуктивности
- Измерение температуры (термопара К-типа)
- Измерение частоты гармонического сигнала

Технические характеристики *МУ-65*:

Пределы измеряемых величин:

- напряжение постоянного тока: 200 мВ, 2 В, 20 В, 200 В, 1000 В;
- напряжение переменного тока: 2 В, 20 В, 200 В, 700 В;
- переменный ток: 2 мА, 20 мА, 200 мА, 10 А;
- постоянный ток: 2 мА, 20 мА, 200 мА, 10 А;
- сопротивление: 200 Ом, 2 кОм, 20 кОм, 200 кОм, 2 Мом, 20 Мом, 200 МОм;
- частота: 20 кГц;
- ёмкость: 2000 пФ, 20 нФ, 200 нФ, 2 мкФ, 20 мкФ.

В мультитестерах при измерении сопротивления следует **выбрать секцию** с обозначением значка “Омега” при помощи ручного переключателя режимов работы. Для замера сопротивления цепи необходимо ориентировочно определить сопротивление измеряемой цепи и выбрать соответствующий предел измерения. У мультиметров обычно 5 пределов измерения: **200** (до 200 Ом), **2k** или **2000** (до 2000 Ом), **20k** (до 20.000 Ом), **200k** (до 200.000 Ом), **2M** либо **2000k** (до 2.000.000 Ом).



*Секция измерения сопротивления*

Рисунок 5.1- Внешний вид мультиметра

Например, у Вас есть резистор, сопротивление которого ориентировочно составляет от 1 килоОма (1000 Ом) до 10 килоОм (10.000 Ом). В этом случае необходимо выбрать предел измерения, который выше наибольшего предполагаемого сопротивления, таким пределом будет **20k** (20 килоОм). Если же номинальное сопротивление резистора окажется больше, то на цифровом дисплее кратковременно “моргнёт” показание и зафиксируется единица. При этом необходимо перевести ручной переключатель на предел выше и провести повторное измерение.

Таблица 5.1.

Материал	Длина образца, м.	Диаметр, мм.
Медь		
Никель		
Константан		
Сталь		
Алюминий		

2. Включить и поместить образцы в термостат, измерить их сопротивление  $T_R$  при  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Результаты измерений занести в таблицу 6.2.

Таблица 5.2

Наименование материала	$R_0$ , Ом	$R_T$ , Ом	$\alpha_p$ , $\text{K}^{-1}$	$\rho_{20}$ , $\text{мкОм}\cdot\text{м}$	$\gamma_T$ , $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$
Медь					
Никель					
Константан					
Сталь					
Алюминий					

3. По результатам измерений и данным таблицы 5.2 определить температурный коэффициент удельного электрического сопротивления и удельное электрическое сопротивление проводников при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Значения  $\rho_{20}$  и  $\alpha_p$  материалов занести в таблицу 5.2.

4. Определить удельную теплопроводность исследуемых проводниковых материалов при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\gamma_T$ ), используя закон Видемана – Франца. Результаты расчета занести в таблицу 5.2.

5. По полученным данным построить зависимость удельного сопротивления и температурного коэффициента удельного сопротивления от состава сплава. Для этого необходимо по оси абсцисс (рис. 5.2) слева направо отложить процентное содержание никеля, а справа налево – процентное содержание меди так, чтобы сумма их в каждой точке равнялась 100 % с

интервалом 20 %. В крайних точках оси абсцисс строят две оси ординат. На левой оси ординат откладывают значение удельного сопротивления никеля и против процентного содержания константана (40 % Ni и 70 % Cu) значение его удельного сопротивления. Значения  $\rho$  с другим содержанием меди и никеля могут быть получены по приближенной эмпирической формуле:

$$\rho = 0,545 - \alpha'(x - 0,53),$$

где  $\alpha'$  – коэффициент;

$x$  – содержание никеля в сплаве в долях единиц.

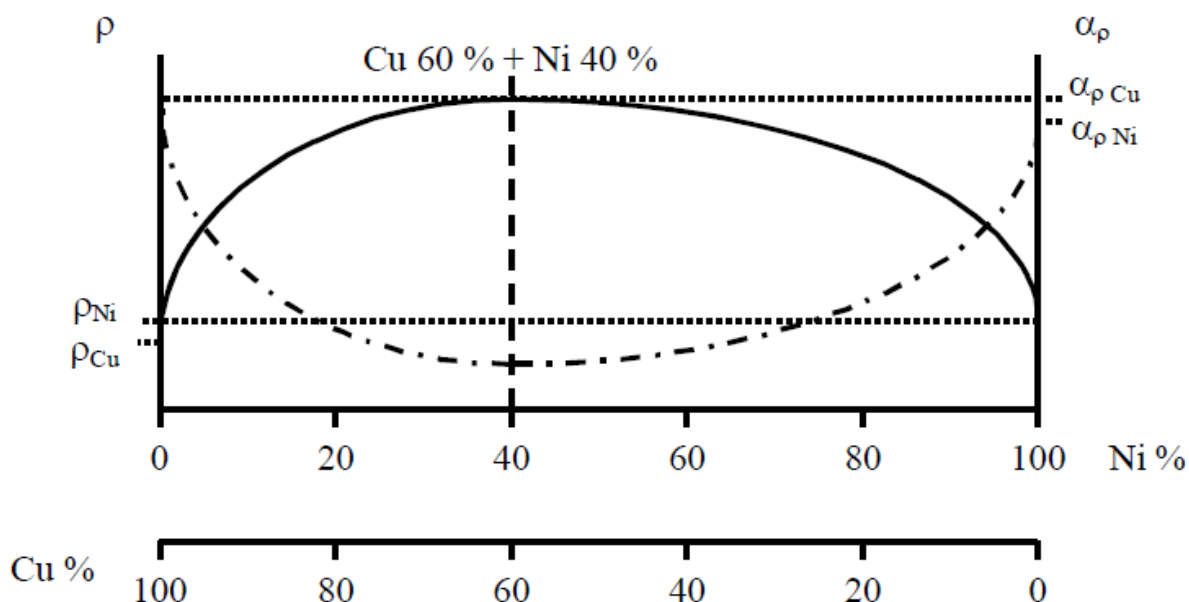


Рисунок 5.2 - Зависимость удельного сопротивления и температурного коэффициента удельного сопротивления от состава сплава

Подставляя в приведенную формулу значение удельного сопротивления константана, полученное при измерении, и содержание никеля в сплаве ( $x = 0,4$ ), находим коэффициент. В дальнейшем, подставляя вместо  $x$  значения 0,2, 0,7 и 0,8, получают достаточное количество точек для построения зависимости удельного объемного сопротивления. Результаты вычислений для медно-никелевых сплавов занести в таблицу 5.3.

Таблица 5.3

X, %	0	20	40	70	80	100
$\rho$ , мкОМ·м						
$\alpha_{\rho}$ , К <sup>-1</sup>						

На осях координат откладывают значения  $\alpha_{\rho}$  меди и никеля, а против  $x = 0,4$  откладывают  $\alpha_{\rho}$  константана. Соединяют эти три точки плавной вогнутой кривой, считая, что  $\alpha_{\rho}$  константана является минимумом этой кривой.

### 5.5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
3. Результаты измерений и вычислений в виде таблиц 6.2 и 6.3 и графики зависимостей  $\rho = f(x)$ , % и  $\alpha_{\rho} = f(x)$ , % а также расчетные формулы.
2. Критическая оценка полученных данных в сопоставлении их с литературными данными.

### Контрольные вопросы

1. Поясните механизм проводимости в металлах.
2. Почему электрическое сопротивление чистых металлов отличается от сопротивления сплавов?
3. От каких факторов зависит удельная электрическая проводимость проводников?
4. Чем обусловлена контактная разность потенциалов?
5. Почему медь заменяется алюминием? Какие он имеет преимущества и недостатки?
6. В чем заключается особенность работы контактных материалов? Какие основные требования предъявляются к ним?
7. Какие материалы высокого сопротивления являются наиболее распространенными? В чем их достоинства и недостатки?

8. Дайте классификацию проводниковых материалов.
9. Какие вещества имеют высокую проводимость, их свойства и применение?
10. Какими основными параметрами определяются свойства проводников электрического тока?

*Лабораторная работа № 6*  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

**Цель работы:** изучение электрических характеристик и свойств полупроводниковых материалов при различной температуре.

**Программа работы:**

Ознакомиться с методикой измерения характеристик полупроводниковых приборов, исследуемых в работе.

**6.1 Краткие теоретические сведения**

К полупроводникам относятся материалы, у которых электрическая проводимость сильно зависит от внешних энергетических воздействий: температуры, напряженности электрического поля, длины волны излучения и др.

Полупроводниковые материалы по величине удельного электрического сопротивления  $\rho_v$  занимают промежуточное место между металлами и диэлектриками. Так,  $\rho_v$  полупроводников составляет

$10^{-5} - 10^8$  Ом·м,  $\rho_v$ ; диэлектриков –  $10^8 - 10^{18}$  Ом·м; металлов –  $10^{-8} - 10^{-6}$  Ом·м. Полупроводниками являются сотни разнообразных сложных химических соединений, некоторые окислы, а также химических элементов периодической системы Д.И. Менделеева (например, германий, кремний, селен, бор, йод, мышьяк и др.).



Электрические свойства полупроводников объясняются зонной теорией твердого тела. Согласно этой теории при соединении многих атомов в твердое тело, вследствие их воздействия друг на друга, электронные уровни каждого атома несколько смещаются, образуя зоны энергетических уровней твердого вещества (рисунок 6.1). В проводнике зона, заполненная электронами (валентная), и свободная зона (зона проводимости) примыкают друг к другу или даже перекрываются (рисунок 6.1, а), что обеспечивает непрерывный переход электронов в свободную зону и большую электронную проводимость вещества. В диэлектрике между заполненной электронами

зоной и свободной лежит большой энергетический барьер (запрещенная зона),  $W = 6...10$  эВ (рисунок 6.1, б), который исключает возможность перехода электронов в зону проводимости. В полупроводнике между заполненной и свободной зоной также имеется запрещенная зона, но небольшой величины:  $W = 0,01...3$  эВ (рисунок 6.1, в).

Поэтому у полупроводников всегда существуют условия для того, чтобы часть электронов могла попасть в свободную зону и обеспечить заметную электронную проводимость, хотя и меньшую, чем у проводников. Такую проводимость называют собственной. Количество свободных электронов, а следовательно и собственная проводимость полупроводника будут зависеть от сообщаемой ему энергии (температуры, освещения и т.д.), способствующей переходу электронов через энергетический барьер в свободную зону.

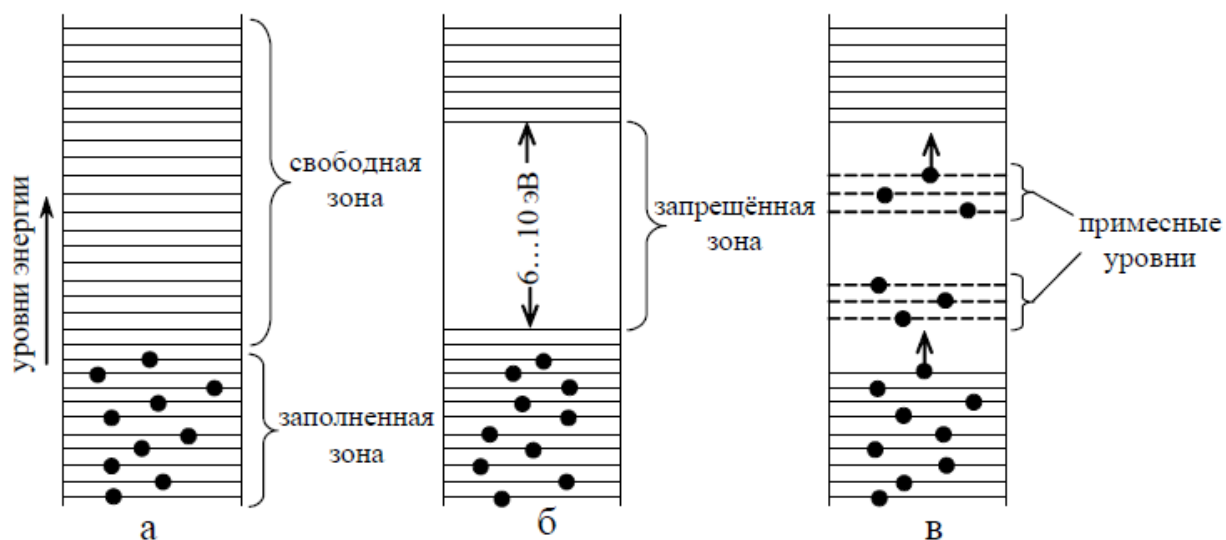


Рисунок - 6.1 Энергетические диаграммы а) проводника, б) диэлектрика, в) полупроводника

Особую роль в полупроводниках играют примеси. Наличие даже небольших количеств примеси может существенно изменить проводимость полупроводника (ее называют примесной проводимостью), поскольку примесь создает дополнительные энергетические уровни в запрещенной зоне, что облегчает появление свободных носителей заряда. Если энергетический уровень примеси располагается ближе к заполненной зоне (рис. 7.1, в), то электроны из заполненной зоны могут переходить на уровень примеси, оставляя в заполненной зоне вакантные места – дырки. Перемещение дырок в заполненной зоне эквивалентно движению положительных зарядов.

Примесь этого типа называется акцептором, а полупроводник с дырочной проводимостью – полупроводником типа *p*. Дырки *p* здесь являются основными носителями тока. Если энергетический уровень примеси располагается ближе к свободной зоне (рисунке 6.1, в), то электроны с этого уровня могут переходить в свободную зону, образуя электронную проводимость. Такая примесь называется донором, а полупроводник такого типа (с электронной проводимостью) – полупроводником типа *n*. Здесь электроны являются основными носителями

тока. В связи с этим полупроводники характеризуются двумя механизмами электропроводности: электронной (в пределах зоны проводимости) и дырочной (в пределах валентной зоны).

Полупроводники нашли очень широкое техническое применение: из них изготавливают полупроводниковые диоды (вентили), триоды, нелинейные резисторы (варисторы), термисторы, фоторезисторы, тиристоры и другие приборы. Вентиль – полупроводниковый диод, применяемый для выпрямления переменного тока. Полупроводниковые диоды изготавливают на основе кремния, германия, арсенида галлия и др. Выпрямление переменного тока происходит на стыке двух областей с различными механизмами проводимости  $p$  и  $n$  (в  $p$ - $n$ -переходе) (рисунке 6.2, а). При приложении положительного потенциала к  $p$ -области и соответственно отрицательного – к  $n$ -области  $p$ - $n$ -переход насыщается электронами и дырками и по электрической цепи протекает ток (рисунке 6.2, б). Такой ток обусловлен примесной проводимостью. Его называют прямым и обозначают  $I_a$ . Соответственно приложенное напряжение называют прямым и обозначают  $U_a$ .

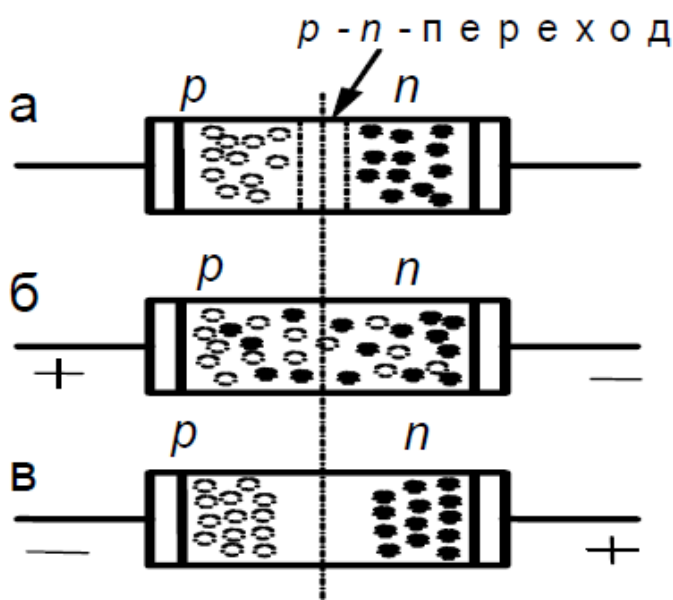


Рисунок 6.2 - Выпрямление переменного тока в  $p$ - $n$ -переходе.

При приложении к  $p-n$ -переходу напряжения обратной полярности (рисунок 6.2, в) по цепи будет протекать значительно меньший ток, который называют обратным и обозначают  $I_b$ . Протекание обратного тока обусловлено наличием у полупроводниковых материалов собственной проводимости. Зависимость протекающего через вентиль тока от приложенного напряжения (зависимость  $I = f(U)$  называют вольтамперной характеристикой (рисунок 6.3). Эта характеристика имеет две ветви: прямую (а) и обратную (б).

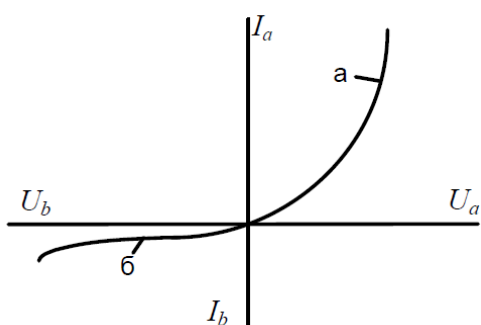


Рисунок 6.3 Вольтамперная характеристика полупроводников

Варисторы – нелинейные полупроводниковые резисторы, особенностью которых является резко выраженная зависимость электрического сопротивления от приложенного к ним напряжения.

Вольтамперная характеристика варистора – нелинейная (рисунок 6.4).

Основу варистора составляет карбид кремния (карборунд) SiC. Он отличается высокой химической и температурной стойкостью, а также высокой твердостью.

Электропроводность кристаллов SiC при нормальной температуре примесная. Избыток Si дает  $n$ -проводимость, а избыток C –  $p$ -проводимость. Собственная проводимость карбида кремния наблюдается, начиная с температуры около  $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Для изготовления варисторов используется порошкообразный карбид кремния, удельное сопротивление которого невелико – около  $10\text{--}2\text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Порошок прессуется со связующим веществом из окиси кремния SiO<sub>2</sub>,

которая, обволакивая кристаллики порошкообразного SiC, образует пленочное покрытие их. Удельное сопротивление SiO<sub>2</sub> составляет 10<sup>4</sup>– 10<sup>6</sup> Ом·м. При определенном напряжении пленки SiO<sub>2</sub> могут частично пробиваться, вследствие чего ток через варистор резко увеличивается. Этим объясняется нелинейность вольтамперных характеристик варистора.

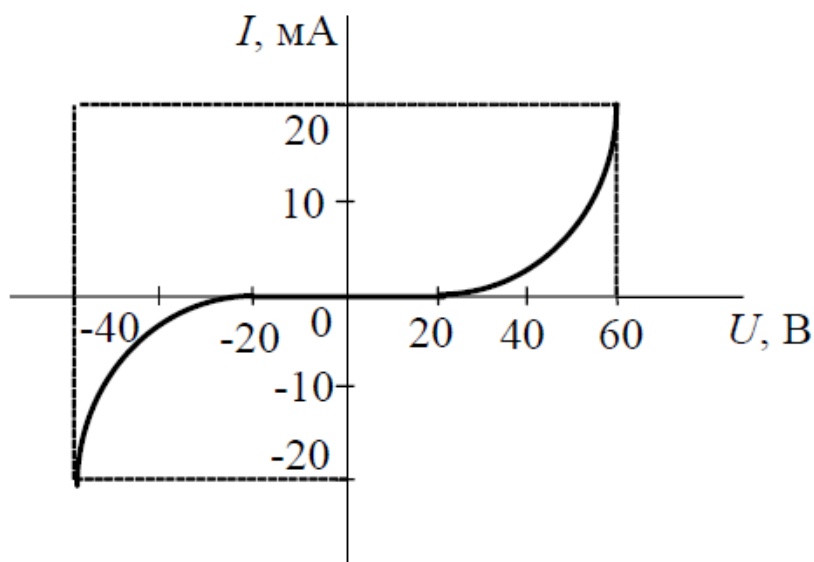


Рисунок - 6.4 Вольтамперная характеристика варистора

Варисторы применяются для изготовления нелинейных элементов вентильных разрядников. Карбид кремния используется в технике получения высоких температур в качестве нагревательных силитовых стержней.

Терморезисторы или термисторы, – это резисторы, изменяющие свое сопротивление при изменении температуры. Это положено в основу применения термисторов для измерения температуры. Нужные свойства термисторов удается получить, используя смеси различных окислов, относящихся к электронным полупроводникам, например CuO + Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; MgCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> + Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и др. Удельное сопротивление таких термисторов и его температурный коэффициент могут изменяться в миллионы раз в зависимости от процентного содержания компонентов. ТК  $\rho$  термисторов на порядок выше, чем у металлов.

Термисторы изготавливаются в виде стерженьков, пластинок или таблеток методами керамической технологии. Свойства их зависят от размера зерна, давления при прессовке, температуры обжига.

При измерении температуры чувствительность термисторов на несколько порядков превышает чувствительность термопар. Применяются термисторы также для стабилизации напряжения, ограничения импульсных пусковых токов, токовых реле времени, измерения теплопроводности жидкости, в качестве бесконтактных реостатов.

Основной недостаток термисторов – относительно малый интервал измеряемых температур (-60... +120 °С).

Электрическая проводимость терморезистора изменяется от температуры по экспоненциальному закону.

$$\gamma = A \cdot e^{-\frac{\omega_a}{2kT}}, \quad (6.1)$$

где  $A$  – постоянный коэффициент для данного полупроводникового материала;

$\omega_a$  – работа переброса электрона из валентной зоны в зону проводимости (энергия активации), Дж (в системе СИ);

$k$  – постоянная Больцмана, равная  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;

$T$  – абсолютная температура, К.

Логарифмируя уравнение (6.1), получим зависимость

$$\ln \gamma = \ln A - \frac{\omega_a}{2k} \cdot \frac{1}{T} \quad (6.2)$$

Типичная кривая этой зависимости показана на рисунок 6.5. Разная величина  $\omega_a$  на отдельных участках кривой свидетельствует о том, что энергия активации  $\omega_a$

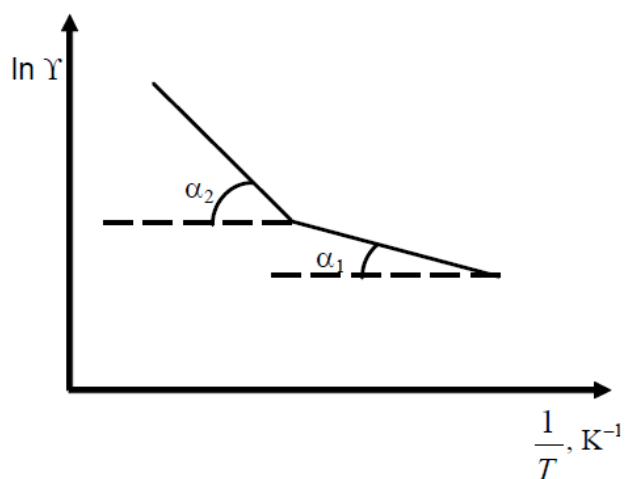


Рисунок 6.5- Зависимости  $\ln \gamma = f(1/T)$

### 6.3. Описание установки

Все испытания производят на установке, приведенной на рисунок 6.6, где ИП – источник питания постоянного тока с пределами регулирования напряжения от 0 до 240 В. PV – вольтметр, к выводам которого поочередно присоединяют испытуемые приборы, помещенные в термостат Т. Вольтметр можно использовать также для измерения сопротивлений в пределах от 1 Ом до 10 МОм. РА – миллиамперметр магнитоэлектрической системы с пределами измерения от 0,15 до 60 мА. Температура измеряется ртутным термометром, помещенным в термостат.

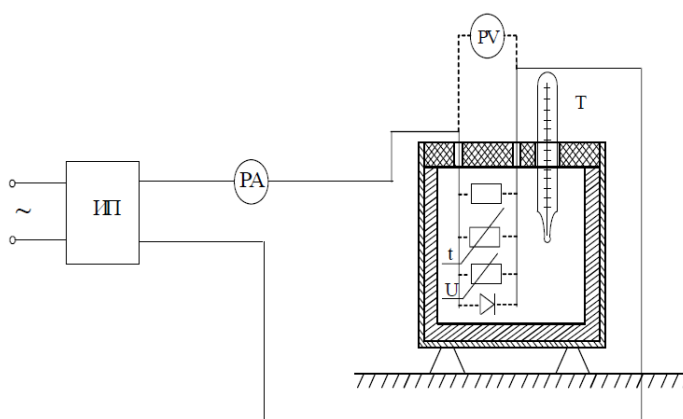


Рисунок 6.6 Установка для снятия вольтамперной характеристики полупроводников

#### 6.4. Содержание и порядок выполнения работы

1. Используя схему рисунок 6.6, снять прямую ветвь вольтамперной характеристики германиевого диода. Для этого в схему последовательно с миллиамперметром необходимо присоединить помещенный в термостат германиевый диод, подключив его в проводящем направлении.

Включить установку. Увеличивая прямое напряжение  $U_a$  источника питания ИП от 0 до 0,5 В (не более), отсчитать прямой ток  $I_a$  по миллиамперметру. Результаты опыта занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1- Данные для расчетов токов прямой и обратной последовательности диода

$U_b$	0	0.1	0.15	0.25	0.2	0.3	0.4	0.5
$I_b$								
$U_a$	0	10	20	30	40	50	70	90
$I_a$								

**Внимание!** Перед началом выполнения следующего опыта установить напряжение источника питания ИП на нуль (ток ИП в течение выполнения всей работы должен быть установлен 50 мА), а предел измерения миллиамперметра – на 60 мА. Полярность диода, помещенного в термостат, изменить на обратную.

Включить установку и снять обратную ветвь вольтамперной характеристики диода, изменяя напряжение  $U_b$  от 0 до 90 В. При необходимости предел измерения миллиамперметра изменить. Результаты измерения  $I_b$  и  $U_b$  занести в табл. 7.1.

2. Снять вольтамперную характеристику варистора, прямой и обратной ветви, для чего выводы, ведущие к термостату от источника питания ИП, переключить с диода на варистор и произвести действия, аналогичные описанным выше для диода.



Результаты измерений при снятии прямой и обратной ветви вольтамперной характеристики следует занести в таблицу 6.2 для варистора.

Таблица 6.2- Данные для расчетов токов прямой и обратной последовательности варистора

$U_b$	0	0.1	0.15	0.25	0.2	0.3	0.4	0.5
$I_b$								
$U_a$	0	10	20	30	40	50	70	90
$I_a$								

**Внимание!** Напряжение на источнике питания ИП можно увеличивать до 90 В при снятии как прямой, так и обратной ветви вольтамперной характеристики варистора.

По полученным результатам построить зависимости  $I_a = f(U_a)$  и  $I_b = f(U_b)$  диода и  $I_a = f(U_a)$ ,  $I_b = f(U_b)$  для варистора на одном графике.

3. Снять зависимости сопротивления резистора и терморезистора от температуры. Для измерения сопротивлений варистора использовать прибор В7-16 в режиме омметра.

Предел измерения установить 10 МОм. Измерить термометром значение начальной температуры и записать ее в табл. 7.3 и 7.4 в графу с пометкой «исходная». Выводы В7-16 присоединить поочередно к резистору и к термистору, которые находятся в термостате.

Отсчитывая по шкале сопротивлений В7-16 сопротивление резистора, а затем термистора при этой исходной температуре, записать их значения в табл. 7.3 и 7.4 соответственно. Включить термостат и по мере роста температуры записывать значение сопротивлений резистора, а затем термистора, переключая поочередно выводы В7-16 с одного прибора на другой. Измерять сопротивление через каждые 10 до температуры 80 °С. Результаты записывать в таблицы 6.3 и 6.4 для резистора и термистора соответственно.

Таблица 6.3 – Значения сопротивления терморезистора

Температура, °С	Исходная	30	40	.....	80
R резистора, Ом					

Результаты определения зависимости сопротивления терморезистора от температуры записывают в таблицу 6.4

Таблица 6.4 – Данные для расчета зависимости сопротивления терморезистора от температуры

№ п/п	t, °С	T, К	1/T, К <sup>-1</sup>	R <sub>t</sub> , Ом	γ, См	ln γ	Примечание
1							
2							
3							
...							
n							

### 6.5. Производство вычислений

1. Расчет прямого ( $R_a$ ) и обратного ( $R_b$ ) сопротивлений диода и варистора. Пользуясь данными таблицами 7.1 и 7.2, рассчитать прямое и обратное сопротивление диода и варистора по формулам

$$R_a = \frac{U_a}{I_a} \text{ (Ом)} \text{ и } R_b = \frac{U_b}{I_b} \text{ (кОм)}.$$

2. Вычисление зависимости электропроводности терморезистора от температуры. По полученным значениям сопротивления  $R_t$  терморезистора (табл. 7.4) рассчитать электропроводность  $\gamma$  при различных температурах по формуле:

$$\gamma = 1 / R T, C M$$

Построить зависимость  $\ln \gamma = f(1/T)$ .

По полученной кривой определить работу переброса электрона в зону проводимости (энергия активации)  $\phi_a$ . Для этого в уравнение (7.2) из построенного графика подставляют два значения  $\ln \gamma$  и соответствующие им значения  $1/T$  и по системе двух уравнений с двумя неизвестными находят  $\phi_a$ .

### 6.6. Содержание отчета

1. Схема испытаний (см. рис. 7.6).
2. Результаты испытаний и вычислений в виде таблиц и отдельных записей, а также формулы, по которым производились расчеты.
3. Расчет прямого ( $R_a$ ) и обратного ( $R_b$ ) сопротивлений диода и варистора.
4. Графические зависимости  $\ln \gamma = f(1/T)$
5. Ответы на контрольные вопросы

### 7.7. Контрольные вопросы

1. Какие материалы называются полупроводниками?
2. В чем заключается отличие полупроводников от проводников и диэлектриков?
3. Что такое собственная и примесная проводимость полупроводниковых материалов?
4. Объясните влияние температуры на проводимость полупроводников.
5. Как влияет ширина запрещенной зоны на предельно допустимую рабочую температуру полупроводника?
6. Как определить энергию активации для терморезисторов?
7. На основе каких материалов целесообразно изготавливать терморезисторы, полупроводниковые диоды, варисторы?

8. Начертите и объясните вольтамперную характеристику варистора. В чем ее отличие от аналогичной характеристики для полупроводникового диода.

9. Начертите и объясните зависимость  $R = f(U)$  для варистора.

### ***Лабораторная работа № 7***

## **ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОПРОВОДОВ**

**Цель работы:** изучение свойств магнитопроводов из магнитомягких материалов.

### **7.1. Краткие теоретические сведения**

Теорию магнетизма можно условно разделить на *магнетизм вещества* (изучение магнитных свойств групп атомов и молекул) и *атомный магнетизм* (изучение магнитных свойств изолированных микрочастиц).

К магнетикам можно отнести абсолютно все вещества в природе, так как они обладают определенными магнитными свойствами и соответствующим образом взаимодействуют с внешним магнитным полем. В зависимости от природы микроносителей магнетизма и характера взаимодействий их между собой и с внешним магнитным полем различают несколько основных типов магнетиков (магнитных явлений):

**1. Диамагнетики (диамагнетизм)**, в которых под воздействием внешнего магнитного поля молекулярные токи вещества создают магнитный момент, направленный в сторону, обратную внешнему полю, т.е. обладают отрицательной магнитной восприимчивостью.

К диамагнетикам относятся все инертные газы, водород, азот, хлор, ряд металлов (цинк, золото, ртуть и др.), неметаллы (кремний, фосфор, сера и т.д.), а также дерево, мрамор, стекло, воск, вода и т.п.

**2. Парамагнетики (парамагнетизм)**, в которых при отсутствии внешнего поля векторы магнитных моментов атомов под действием тепловой энергии располагаются равновероятно, в результате чего результирующий магнитный момент равен нулю. Под действием внешнего магнитного поля магнитные моменты преимущественно ориентируются с направлением внешнего поля, т.е. появляется положительная намагниченность (магнитная восприимчивость). К парамагнетикам относятся отдельные газы (кислород, окиси азота и др.), ряд металлов (щелочные металлы, титан, цирконий и т.п.) и др.

**3. Ферромагнетики (ферромагнетизм)**, в которых при температуре не выше точки Кюри даже в отсутствие внешнего магнитного поля вещество находится в состоянии технического насыщения (самопроизвольного или спонтанного намагничивания). Температура фазового перехода II рода, связанного со скачкообразным изменением свойств симметрии вещества (например, магнитной— в ферромагнетиках, электрической — в сегнетоэлектриках, кристаллохимической— в упорядоченных сплавах). Его магнитная восприимчивость имеет очень большое положительное значение и существенно зависит от напряженности магнитного поля и температуры.

К ферромагнетикам относятся железо, никель, кобальт, их соединения и сплавы, а также некоторые сплавы марганца, серебра, алюминия и др. При очень низких температурах ферромагнитны некоторые редкоземельные элементы (гадолиний, тербий, эрбий, тулий и т.п.)

**4. Антиферромагнетики (антиферромагнетизм)**, в которых при отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты одинаковых соседних атомов вследствие взаимодействия ориентированы антипараллельно, т.е. результирующий магнитный момент равен нулю. Под воздействием внешнего поля моменты стремятся установиться вдоль поля, т.е. появляется незначительная положительная намагниченность. К антиферромагнетикам относятся редкоземельные элементы, хром, марганец,

многие окислы, хлориды, фториды, сульфиды, карбонаты переходных элементов (на основе

марганца, железа, кобальта, никеля, хрома, меди и др.).

**5. Ферромагнетики (ферромагнетизм)**, в которых существует нескомпенсированный антиферромагнетизм. Они получили свое название от ферритов. В настоящее время используются типы марок ферритов, отличающихся по химическому составу, кристаллической структуре, магнитным и другим свойствам. Ферриты получают на основе соединений окиси железа с окислами других металлов.

Магнитные материалы, применяемые в технике, общепринято разделять на две основные группы: магнитомягкие и магнитотвердые. Оба термина не относятся к характеристике механических свойств материала.

Характерной особенностью магнитомягких материалов является их способность намагничиваться до насыщения даже в слабых полях. Эти материалы подразделяют на технически чистое железо (низкоуглеродистая электротехническая сталь), электротехнические (кремнистые) стали, пермаллой (сплав железа с никелем или кобальтом), магнитомягкие ферриты и магнитодиэлектрики. Магнитомягкие материалы имеют узкую петлю гистерезиса с небольшой коэрцитивной силой, а магнитотвердые – широкую. Это свойство иногда используют для классификации материала. Однако оно весьма условно. По мере прогресса техники производства материалов петли гистерезиса сближаются в обе стороны.

Процессы намагничивания (перемагничивания) магнитомягких и магнитотвердых материалов протекают аналогично и их сущность объясняется наличием в ферромагнетиках доменной структуры (доменов). Последние представляют собой намагниченные до насыщения отдельные макроскопические области ферромагнетика, векторы магнитных моментов которых расположены равновероятно по отношению друг к другу, вследствие чего результирующий магнитный момент тела оказывается равным нулю.

Магнитные свойства магнитомягких материалов характеризуются зависимостями магнитной индукции ( $B$ ) или намагниченности ( $J$ ) от напряженности магнитного поля ( $H$ ). Зависимость вида  $B = f(H)$  называют кривой намагничивания. Эта характеристика зависит не только от  $H$ , но и от температуры, механических напряжений и предшествующего магнитного состояния. В качестве исходного для получения кривой намагничивания принимают размагниченное состояние образца.

Различают кривые намагничивания на постоянном (статические) и переменном (динамические) токах.

*При намагничивании образца различают следующие зависимости:*

а) начальную (нулевую) кривую намагничивания, которую получают при монотонном увеличении  $H$ ;

б) безгистерезисную (идеальную) кривую намагничивания, получаемую при одновременном действии постоянного поля и переменного поля с убывающей до нуля амплитудой;

в) основную (коммутационную или динамическую) кривую намагничивания, представляющую собой геометрическое место вершин симметричных петель гистерезиса, получающихся при циклическом перемагничивании.

Магнитные свойства стали характеризует статическая кривая намагничивания, так как в данном случае все сечение листов магнитопровода равномерно заполнено магнитной индукцией. Динамическая кривая намагничивания характеризует свойства данного конкретного магнитопровода в силу неравномерного распределения индукции по сечению стальных листов.

Основная динамическая кривая намагничивания магнитопроводов из тонких листов обычно мало отличается от начальной. На основной кривой намагничивания принято различать три участка: начальный, соответствующий нижнему колену кривой, участок быстрого возрастания

индукции (намагниченности) и участок насыщения (выше верхнего колена кривой).

При циклическом перемагничивании (в переменном магнитном поле) кривая намагничивания образует петлю гистерезиса. Для получения установившейся (симметричной) петли производят магнитную подготовку, состоящую в многократном (5 – 10 раз) коммутировании тока в намагничивающей обмотке после установления его величины. Такая симметричная петля гистерезиса (в дальнейшем называется просто петля гистерезиса) представлена рисунке 7.1.

Характер хода кривой намагничивания на разных участках объясняется явлениями обратимого и необратимого смещения границ доменов и процессами вращения векторов намагниченности в кристаллах вещества. Причинами гистерезиса в настоящее время принято считать необратимые процессы смещения границ доменов и процессы вращения.

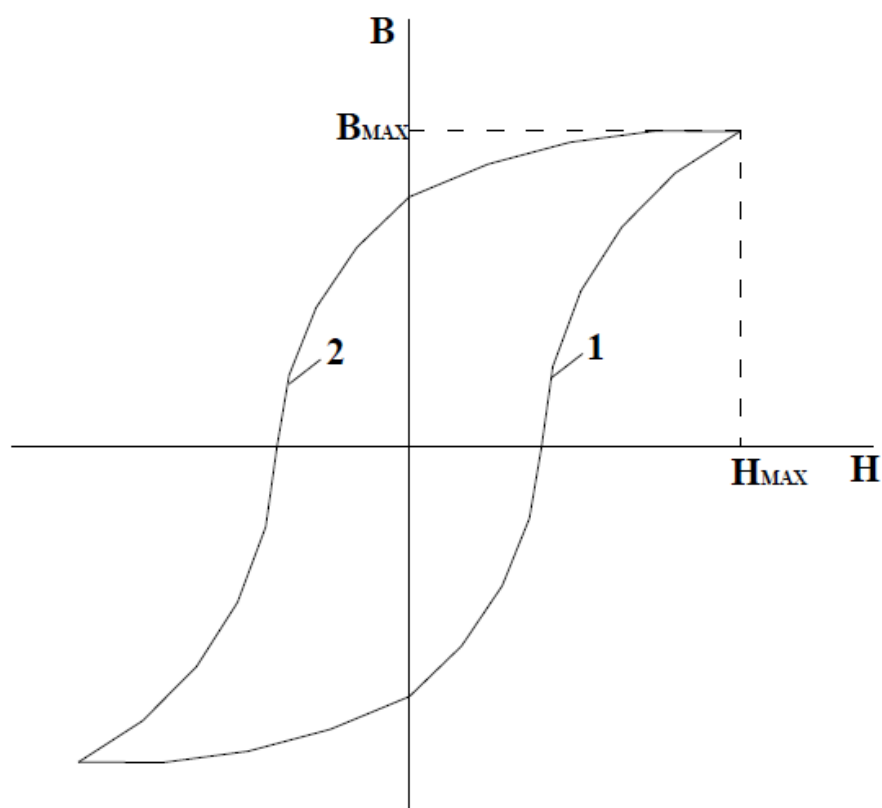


Рисунок 7.1 - Петля гистерезиса



По кривым намагничивания определяют магнитные проницаемости вещества. Различают абсолютную магнитную проницаемость –  $\mu = B/H$ , относительную (по отношению к вакууму) –  $\mu^* = B/(\mu_0 H)$ , дифференциальную –  $\mu_g = dB/dH$ , амплитудную, импульсную проницаемости и др. Подставляя в приведенные отношения конкретные значения  $B$  и  $H$  для различных участков и ветвей петли гистерезиса, получают различные виды магнитной проницаемости.

Другой не менее важной характеристикой материалов при намагничивании их переменным полем являются потери мощности, обусловленные протеканием в материале вихревых токов (токов проводимости материалов). Величина этих токов зависит от магнитных характеристик, петли гистерезиса, электропроводности вещества и напряженности внешнего магнитного поля. Их величина может быть определена через значение вектора Пойнтинга. Последний получают путем решения задачи диффузии переменного электромагнитного поля намагничивающий образец. Потери мощности за один цикл перемагничивания будут также пропорциональны

площади динамической петли перемагничивания (петли на переменном токе), представляющей зависимость средней индукции (магнитного потока) от напряженности магнитного поля на поверхности образца (намагничиваемого тока).

Магнитные материалы нашли широкое применение в изделиях электротехнической промышленности. В первую очередь это относится к электротехнической стали, представляющей собой сплав железа с кремнием. Примерно половина всех электротехнических сталей в мире приходится на марки с небольшим содержанием кремния, четвертая часть – на среднелегированные, а оставшиеся – на высоколегированные (включая и текстурованную сталь). Две четверти объема производства стали расходуется на изготовление генераторов и электродвигателей и одна треть – на

трансформаторы и другие электротехнические устройства. Рабочая индукция электротехнических сталей составляет для маломощных машин 1,2...1,5 Тл, более крупных – 1,5...1,7 Тл, а текстурованные стали имеют индукцию порядка 1,8...2,0 Тл.

Для работы в слабых магнитных полях (аппаратура передачи и приема информации) используются металлические листовые порошкообразные (магнитодиэлектрики) и оксидные (ферриты) материалы с широким диапазоном электрических и магнитных характеристик.

Для измерительных трансформаторов тока и напряжения, трансформаторов в цепях управления и регулирования, реле разработаны материалы на основе сплава железа и никеля. Сердечники высококачественных измерительных трансформаторов изготавливаются из высокопроницаемых пермаллоев (муметалл, ультраперм, муниперм, пермакс и т.п.). Наряду с ними находят применение текстурованная сталь.

В элементах вычислительной техники широкое распространение получили материалы на основе железа и никеля (50 % Fe – 50 % Ni), пермаллои, металлические пленки на основе пермаллоев, изотропные ферриты и др.

### **Контрольные вопросы**

1. Укажите основное отличие магнитомягких материалов от магнитотвердых.
2. Что характеризуют статические и динамические магнитные характеристики? Чем они отличаются между собой?
3. Какие известны способы получения статических и динамических магнитных характеристик?
4. Объясните сущность получения гистерезисного цикла по схеме (см. рис. 7.1).
5. Объясните изменение площади гистерезисного цикла при наложении на магнитопровод короткозамкнутых витков.

6. Объясните природу потерь в магнитных материалах в переменных полях и зависимость их от частоты?
7. Чем отличается абсолютная магнитная проницаемость от относительной и дифференциальной?
8. Как влияет химический состав электротехнической стали на ее магнитные свойства?
9. Какие составные части основного электротехнического оборудования изготавливаются из листовой электротехнической стали?

## Литература

1. Аксенов, А.А. Материаловедение : учебное пособие / А.А. Аксенов. — Воронеж : ВГЛТУ, 2018. — 99 с.
2. Александров, С.Е. Технология полупроводниковых материалов : учебное пособие / С.Е. Александров, Ф.Ф. Греков. — 2-е изд., испр. — Санкт-Петербург : Лань, 2012. — 240 с.
3. Богородицкий Н.П. Электроматериаловедение. Электротехнические материалы / Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. — Челябинск, ЮУрГУ, 2010. — 458 с.
4. Бялик, А.Д. Материалы электронной техники. Полупроводники. Проводниковые материалы. Магнитные материалы : учебное пособие / А.Д. Бялик, Р.П. Дикарева, Т.С. Романова. — Новосибирск : НГТУ, 2017. — 99 с.
5. Галимов, Э.Р. Современные конструкционные материалы для машиностроения : учебное пособие / Э.Р. Галимов, А.Л. Абдуллин. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — 268 с.
6. Гермогенов, В.П. Материалы, структуры и приборы полупроводниковой оптоэлектроники : учебное пособие / В.П. Гермогенов. — Томск : ТГУ, 2015. — 272 с.
7. Грибенченко, А.В. Материаловедение и технология конструкционных материалов : учебное пособие / А.В. Грибенченко. — Волгоград : Волгоградский ГАУ, [б. г.]. — Часть 2 — 2017. — 84 с.
8. Дудкин, А.Н. Электротехническое материаловедение : учебное пособие / А.Н. Дудкин, В. Ким. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 200 с.
9. Евтушенко, Ю.М. Электроизоляционные материалы и системы изоляции для электрических машин: книга 1 : монография / Ю.М. Евтушенко, Г.А. Крушевский, В.И. Лебедев ; под редакцией В.Г. Огонькова, С.В. Серебрянникова. — Москва : МЭИ, 2012. — 272 с.

10. Журавлёва Л. В. Электроматериаловедение / Л.В. Журавлёва. – М.: ИЦ «Академия», 2012. – 312 с.
11. Земсков, Ю.П. Материаловедение : учебное пособие / Ю.П. Земсков. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — 188 с.
12. Солнцев, Ю.П. Специальные материалы в машиностроении : учебник / Ю.П. Солнцев, Е.И. Пряхин, В.Ю. Пирирайнен. — 2-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — 664 с.
13. Тимофеев, И.А. Электротехнические материалы и изделия : учебное пособие / И.А. Тимофеев. — Санкт-Петербург : Лань, 2012. — 272 с.
14. Филяк, М.М. Основные физические процессы в проводниках, полупроводниках и диэлектриках : учебное пособие / М.М. Филяк. — Оренбург : ОГУ, 2015. — 133 с.
15. Эксплуатационные материалы : учебник / А.П. Уханов, Д.А. Уханов, А.А. Глущенко, А.Л. Хохлов. — Санкт-Петербург : Лань, 2019. — 528 с.