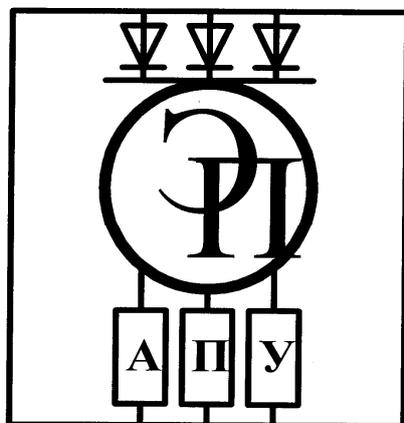


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов специальности  
6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов  
и производств»  
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2025

УДК 621.315.6  
ББК 31.2  
Э45

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и АПУ» «28» ноября 2024 г.,  
протокол № 1

Составитель ст. преподаватель Г. В. Лабкович

Рецензент канд. техн. наук С. О. Парашков

В методических рекомендациях приводятся краткие сведения о диэлектриках, проводниковых, полупроводниковых и магнитных материалах и сплавах, а также методика выполнения лабораторных работ по определению электрических и магнитных свойств. Рекомендованы для студентов специальности 6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов и производств» очной и заочной форм обучения.

Учебное издание

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Ответственный за выпуск	А. С. Коваль
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 26 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2025

## Содержание

Введение .....	4
1 Лабораторная работа № 1. Правила техники безопасности. Изучение устройства и принципа работы аппарата испытательного АВ-50/70-1 .....	5
2 Лабораторная работа № 2. Определение электрической прочности воздуха в постоянном электрическом поле.....	9
3 Лабораторная работа № 3. Определение электрической прочности жидких диэлектриков .....	16
4 Лабораторная работа № 4. Определение электрической прочности твёрдых диэлектриков .....	22
5 Лабораторная работа № 5. Исследование зависимости удельного электрического сопротивления сплавов от состава, строения, механиче- ской и термической обработки .....	25
6 Лабораторная работа № 6. Исследование электрических свойств ма- териалов высокой проводимости и высокого сопротивления .....	30
7 Лабораторная работа № 7. Исследование магнитных свойств ферро- магнитных материалов с помощью осциллографа .....	35
8 Лабораторная работа № 8. Исследование электрических свойств по- лупроводников.....	44
Список литературы .....	47

## Введение

Развитие электроэнергетической отрасли требует применения новейших материалов, обладающих рядом особенностей характеристик, которые ранее не могли быть получены при использовании традиционных материалов. От правильного выбора соответствующих электротехнических материалов зависит надёжность, долговечность, качество работы, условия эксплуатации электрического оборудования. При решении конкретных инженерных задач часто приходится учитывать целый набор свойств материала (электропроводность, термическую стойкость, механическую прочность, коррозионную стойкость, особенности взаимодействия с магнитным полем и т. д.).

Современное предприятие, оснащённое электрооборудованием и различной аппаратурой, характеризуется непрерывно растущей энергонапряжённостью, а также тяжёлыми условиями эксплуатации машин (высокий вакуум, низкие или высокие температуры, агрессивные среды, высокая радиация и т. д.), которые предъявляют к материалам особые требования. Для удовлетворения этих условий создано много сплавов на основе различных металлов. Свойства материала определяются его внутренним строением, которое, в свою очередь, зависит от состава и характера предварительной обработки.

При выполнении лабораторных работ студенты изучают электрические характеристики диэлектрических и проводниковых материалов и методики их измерения, приобретают навыки для правильного использования проводников и сплавов при проектировании, ремонте, производстве, эксплуатации, испытаниях электротехнического оборудования. Устанавливают взаимосвязь между составом, строением и свойствами материалов. Изучают основные группы современных материалов, их свойства и область применения.

Результаты испытаний, их обработка и выводы оформляются в виде отчёта самостоятельно каждым студентом согласно предъявляемым к нему требованиям и обязательно представляются преподавателю к началу следующего занятия. В каждой работе имеются указания по содержанию отчёта. В отчёт по своему усмотрению студент может включить и дополнительный материал. Приводимые теоретические сведения по объёму содержащейся в них информации пригодны лишь для предварительного ознакомления с исследуемым вопросом и сознательного выполнения работы. Для фундаментального изучения явления или процесса необходимо пользоваться конспектом лекций или учебником.

Все измеренные и рассчитываемые данные (сопротивление, удельное электрическое сопротивление, длина и сечение образца и др.) в отчёте должны быть представлены в единицах системы СИ.

# 1 Лабораторная работа № 1. Правила техника безопасности. Изучение устройства и принципа работы аппарата испытательного АВ-50/70-1

## *Цель работы*

- 1 Ознакомиться с правилами техники безопасности при работе на установках высокого напряжения.
- 2 Изучить устройство и принцип работы аппарата АВ-50/70-1.

## *1.1 Правила техники безопасности*

1 К установкам высокого напряжения относятся те устройства, в которых напряжение относительно земли превышает 1000 В.

2 Все лица, работающие и обучающиеся в лаборатории на установках высокого напряжения, обязаны твёрдо знать и строго соблюдать требования техники безопасности к установкам высокого напряжения, инструкции по технике безопасности, а также правила освобождения пострадавшего от действия электрического тока и оказания ему первой помощи.

**3 Внимание! При выполнении всех лабораторных работ по данным методическим рекомендациям первый опыт проводится при непосредственном участии преподавателя.**

4 Без разрешения преподавателя запрещается включать лабораторное оборудование в сеть.

5 Перед проведением *всех лабораторных работ по данным методическим рекомендациям* необходимо проверить состояние и исправность заземления.

6 **Запрещается** выполнять лабораторные работы без прохождения инструктажа по технике безопасности.

7 Выполнять лабораторные работы разрешается в составе подгруппы. Количество студентов в подгруппе — не менее двух человек.

8 **Запрещается** во время выполнения *всех лабораторных работ* находиться внутри ограждения высоковольтной установки.

9 **Запрещается** во время выполнения *всех лабораторных работ* открывать дверь ограждения высоковольтной испытательной установки.

10 **Запрещается** во время выполнения *всех лабораторных работ «включать-выключать»* высоковольтную испытательную установку, за исключением тех операций, что предусмотрены данными методическими рекомендациями.

11 **Запрещается** во время выполнения *всех лабораторных работ* и непосредственно проведения высоковольтных испытаний *громко разговаривать и ходить по лаборатории.*

12 Если во время выполнения *всех лабораторных работ* и непосредственно проведения высоковольтных испытаний возникает и (или) возникнет аварийная ситуация, **необходимо немедленно отключить от питающей сети**

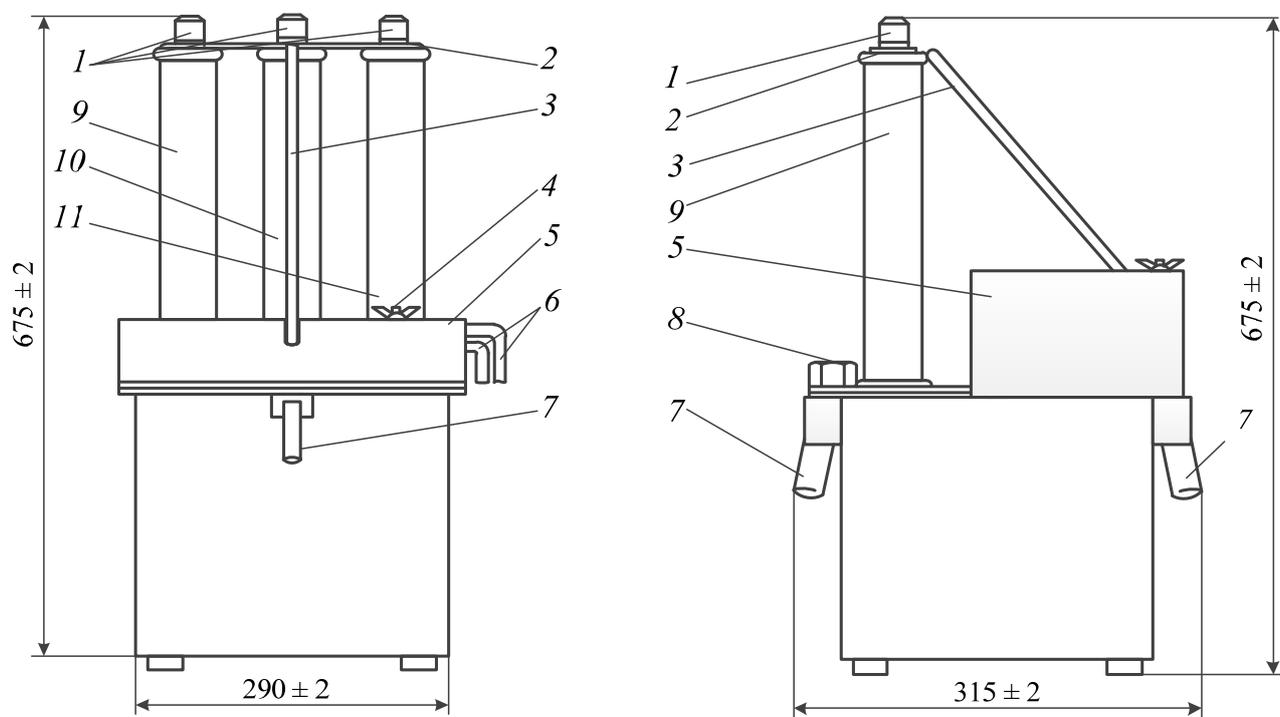
высоковольтную испытательную установку. Для этого использовать выключатель автоматический QF1 и сетевую вилку со шнуром XP1 и сетевую розетку XS1, установленные на стене лаборатории.

### 1.2 Назначение, устройство и принцип работы аппарата АВ-50/70-1

Исследование характеристик газообразных, жидких и твердых диэлектриков проводится в специализированной испытательной лабораторной электротехнической установке на базе аппарата испытательного АВ-50/70-1.

Аппарат испытательный АВ-50/70-1 предназначен для испытания изоляции силовых кабелей и твердых диэлектриков выпрямленным электрическим напряжением, а также твердых диэлектриков синусоидальным электрическим напряжением частотой 50 Гц.

Аппарат выполнен в виде двух переносных блоков, соединённых кабелем: блока высокого напряжения (БВН) и блока управления (БУ) (рисунки 1.1 и 1.2).



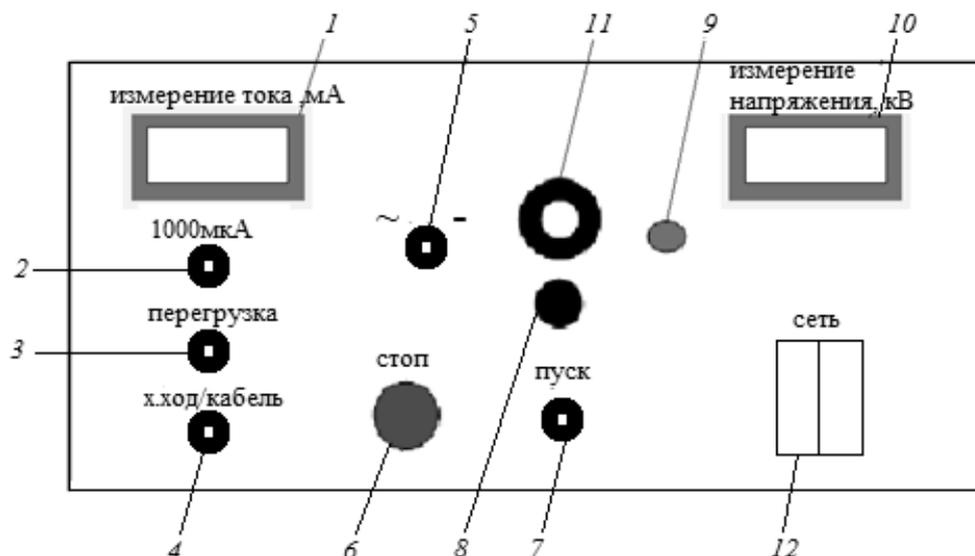
1 – клеммы для подключения высокого напряжения; 2 – перемычка; 3 – штанга заземлителя; 4 – клемма для подключения заземлителя; 5 – кожух; 6 – подключающие кабели; 7 – откидывающиеся ручки; 8 – пробка для залива масла; 9 – выпрямительные столбы А1–А7; 10 – делитель; 11 – перемычка

Рисунок 1.1 – Блок высокого напряжения АВ-50/70-1

БВН включает в себя трансформатор высоковольтный TV1, переключатель высоковольтный Q1, резисторы высоковольтные R3–R9, выпрямительные столбы А1–А7, заземлитель Q2 и другие элементы.

БУ включает в себя регулятор испытательного напряжения TV1, разъёмы для подключения сетевого кабеля и кабеля БВН, электромагнитный пускатель и

другие элементы электрической схемы, расположенные в блоке и на печатной плате.



1 – миллиамперметр PA1; 2 – кнопка переключения пределов измерения SB5; 3 – светодиод «перегрузка»; 4 – переключатель SB4 «х.ход/кабель»; 5 – переключатель SB6 «~/-»; 6 – кнопка S3 «стоп»; 7 – кнопка S2 «пуск»; 8 – красная сигнальная лампа HL2; 9 – зелёная сигнальная лампа HL1; 10 – киловольтметр PV1; 11 – регулятор напряжения TV1; 12 – сетевые автоматы

Рисунок 1.2 – Внешний вид передней панели блока управления АВ-50/70-1

Схема соединения высоковольтного блока и блока управления представлена на рисунке 1.3.

Напряжение питающей сети подводится к БУ посредством сетевого кабеля, снабжённого разъёмом, далее через автоматы QS1 оно подаётся на схему аппарата. При включении автоматов QS1 загорается зелёная сигнальная лампа HL1.

При установке переключателя SB6 «~/-» в положение «~» напряжение на электромагниты высоковольтного переключателя не подаётся, выпрямленные столбы А1–А7 шунтируются и на выходе БВН появляется переменное напряжение. В том случае, когда переключатель SB6 «~/-» находится в положении «-», срабатывают электромагниты высоковольтного переключателя Q1 и на выходе БВН будет получено постоянное напряжение.

Включение испытательного напряжения производится нажатием кнопки S2 «пуск» при условии, что щётка регулятора напряжения находится в нулевом положении (контакт SB2 замкнут), при этом загорается красная сигнальная лампа HL2. Величина испытательного напряжения устанавливается при помощи ручки регулятора напряжения TV1, а контролируется киловольтметром PV1.

Трансформатор Т1 совместно с резисторами и диодом предназначен для компенсации токов утечки источника испытательного напряжения. Ток нагрузки измеряется цифровым измерителем PA1 в диапазоне измерения 0...1 мА (1000 мкА) – при нажатой кнопке SB5 «1000 мкА» и в диапазоне 0...40 мА – при ненажатой.

Высоковольтные резисторы в БВН служат для измерения испытательного напряжения.

Измерительный прибор PV1 (киловольтметр) применяется для измерения выпрямленного напряжения. Киловольтметр градуируется при помощи резистора R22 «U~» при работе на переменном напряжении; при работе на выпрямленном напряжении: на холостом ходу – резистором R21 «Uхх», а при испытании силовых кабелей или ёмкостной нагрузки на выпрямленном напряжении – сопротивлением R20 «Uкаб».

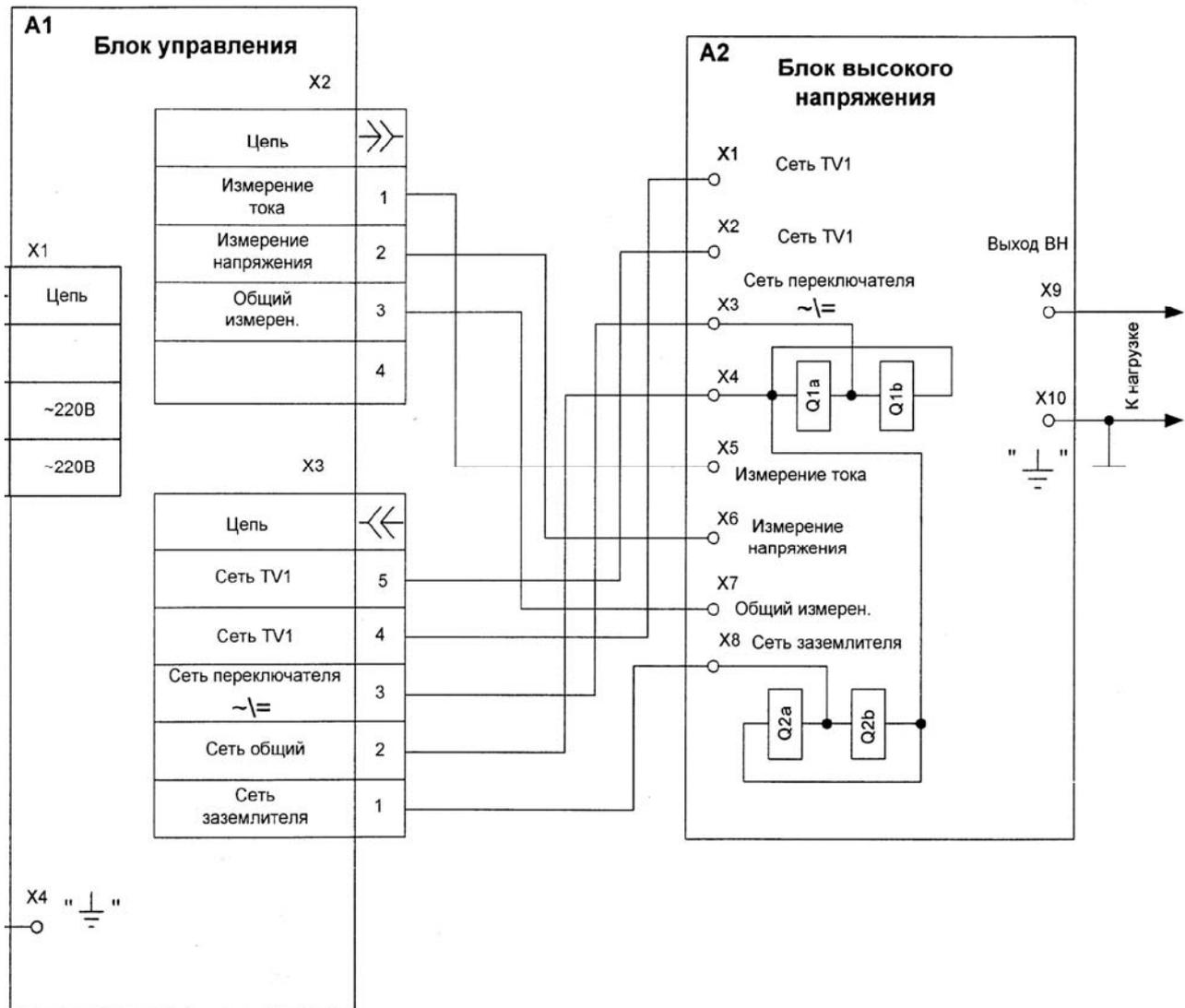


Рисунок 1.3 – Схема соединения аппарата испытательного АВ-50/70-1

В случае подключения на выпрямленное напряжение ёмкостной нагрузки (например, силового кабеля, имеющего ёмкость более 750 пФ), переключатель SB4 должен находиться в положении «кабель». Ориентировочная ёмкость 1 км кабеля – 1 мкФ. При испытании изоляции диэлектриков (ёмкость объекта до 100 пФ) переключатель S2 должен быть в положении «х.ход».

В аппарате предусмотрена защита от токов перегрузки, которая отключает

его при токе нагрузки ( $32 \pm 2$ ) мА.

По окончании испытания силового кабеля для снятия остаточного заряда регулятор напряжения выводится в нулевое положение, переключатель SB4 переводится в положение «~». При этом остаточный ёмкостный заряд испытуемого объекта разряжается через вторичную обмотку трансформатора TV1 (БВН) на землю. Отсутствие остаточного заряда можно контролировать киловольтметром PV1. После этого аппарат отключается кнопкой S3 «стоп».

Время срабатывания устройства АВ-50/70-1 при внезапном прекращении сетевого питания (или случайном нажатии кнопки «стоп») подобрано так, что сначала замкнётся переключатель Q1 и разрядит объект через обмотку трансформатора TV1, а затем через 0,3...1 с сработает заземлитель Q2. Этим достигается уменьшение амплитуды разрядного тока через заземлитель Q2 в аварийных ситуациях.

### ***1.3 Содержание отчёта***

Отчет о работе должен содержать:

- цель работы;
- схему соединения установки испытательного аппарата АВ-50/70-1;
- назначение элементов.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Для каких испытаний предназначен испытательный аппарат АВ-50/70-1?
- 2 Какие блоки входят в состав испытательного аппарата АВ-50/70-1?
- 3 Какие элементы входят в состав блока высокого напряжения?
- 4 Из чего состоит блок высокого напряжения?

## **2 Лабораторная работа № 2. Определение электрической прочности воздуха в постоянном электрическом поле**

### ***Цель работы***

1 Изучить физические процессы, протекающие при пробое газообразных диэлектриков в переменном электрическом поле.

2 Ознакомиться с особенностями протекания пробоя в условиях резконеоднородного электрического поля при различных полярностях электродов в постоянном электрическом поле.

3 Определить зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами в однородном и неоднородном электрических полях.

## 2.1 Краткие теоретические сведения

Во многих электротехнических конструкциях газообразные диэлектрики выполняют роль естественной внешней изоляции. В качестве газообразных изоляционных материалов в зависимости от условий эксплуатации и требований, предъявляемых к данной конструкции, могут использоваться воздух, азот, водород, вакуум, элегаз, инертные газы и углекислый газ.

В высоковольтной аппаратуре используются газообразные диэлектрики, в составе которых содержатся электроотрицательные элементы, такие как фтор или хлор. Положительной стороной воздуха, как диэлектрика, является восстановление электрической прочности после пробоя, незначительное изменение диэлектрической проницаемости при изменении температуры и давления и малые диэлектрические потери.

К отрицательным свойствам относятся низкая теплопроводность, низкая электрическая прочность, способность увлажняться, образовывать окислы, поддерживать горение.

В зависимости от приложенного напряжения в диэлектрике может возникнуть полный, неполный или частичный пробой. На границе раздела фаз на поверхности твердого диэлектрика и воздуха происходит поверхностный пробой.

Пробой газообразных диэлектриков всегда начинается с ударной ионизации и имеет чисто электрическую форму. Кроме механизма электронной ударной ионизации, при различных условиях возможно возникновение фотоионизации, термоионизации и поверхностной ионизации.

Для возникновения ударной ионизации необходимо, чтобы энергия движущихся зарядов (электронов)  $W$  была выше энергии ионизации  $W_u$  молекулы. При выполнении условия  $W \geq W_u$  произойдет расщепление молекулы на положительный ион и электрон. С каждым последующим актом ионизации количество свободных электронов удваивается. В направлении анода со скоростью примерно  $(1 \dots 3) \cdot 10^6$  м/с движется электронная лавина. Электронная ударная ионизация для каждого газообразного диэлектрика начинается при определённой напряжённости поля, величина которой зависит от температуры, давления и частоты напряжения.

Если  $W \leq W_u$ , то молекула не распадается на ион и электрон, а переходит в возбужденное состояние, т. е. один из ее электронов перейдет на более высокий энергетический уровень. Это состояние молекулы является неустойчивым, и спустя примерно  $10^{-8}$  с электрон вернется на прежний энергетический уровень, а молекула испустит квант света (фотон). Сталкиваясь с нейтральной молекулой, фотон также может ее ионизировать, вызывая новую лавину, расположенную далеко впереди фронта родительского участка лавины. Этот процесс называется фотоионизацией. В направлении анода прямолинейно движутся основная лавина и дочерние лавины, которые, сливаясь, образуют зигзагообразный стример, и одновременно в сторону катода движется электроположительный стример.

Электрическая прочность – это минимальная напряженность однородного электрического поля, при которой происходит пробой диэлектрика, а напряжение, при котором возникает пробой, – пробивное напряжение.

$$E_{np} = U_{np} / h, \quad (2.1)$$

где  $E_{np}$  – электрическая прочность, В/м (кВ/см, МВ/м);

$U_{np}$  – пробивное напряжение, В;

$h$  – толщина диэлектрика в месте пробоя, м.

Электрическая прочность воздуха не является величиной постоянной, а зависит от давления, относительной влажности, формы электродов и расстояния между ними, от вида напряжения, а также от полярности электродов (рисунки 2.1 и 2.2). При малых расстояниях между электродами электрическая прочность значительно увеличивается, что объясняется трудностью формирования разряда. Электроны не успевают набрать необходимую для ионизации энергию до столкновения с анодом (см. рисунок 2.1). При достаточно больших расстояниях между электродами (от 1 см и выше) влияние расстояния сильно снижается.

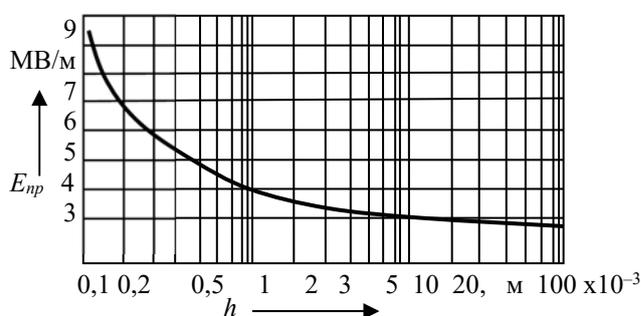


Рисунок 2.1 – Зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами в однородном поле при нормальных условиях  $f = 50$  Гц,  $t = 20$  °С,  $p \approx 0,1$  МПа

Электрическая прочность газов зависит от давления (см. рисунок 2.2). В правой части графика рост электрической прочности объясняется уменьшением длины свободного пробега электронов, а в левой – снижением вероятности столкновения электронов с молекулами газа.

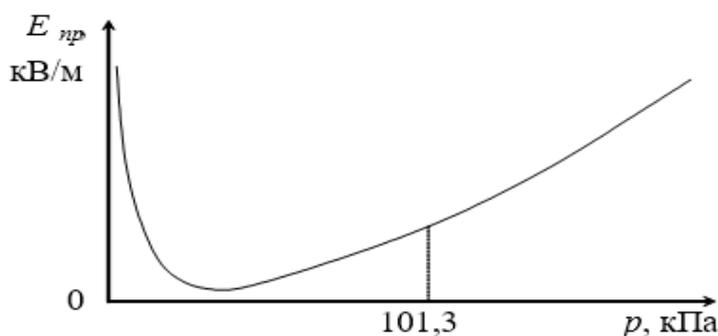


Рисунок 2.2 – Зависимость электрической прочности воздуха от давления

Неоднородное электрическое поле возникает между электродами типа «стержень – плоскость» и «стержень – стержень», в газоразрядных приборах, между контактами реле, между проводами линий электропередачи.

Пробой газа в неоднородном электрическом поле отличается от пробоя в однородном электрическом поле по величине пробивного напряжения и по характеру развития самого процесса пробоя. Пробой газа в неоднородном поле, как правило, происходит при меньшем пробивном напряжении по сравнению с пробоем того же слоя газа в однородном электрическом поле.

Области с высокой напряженностью электрического поля часто образуются вследствие неоднородности электрического поля, возникающей:

- при выборе неверных параметров в процессе конструирования;
- в результате загрязнений, возникающих в процессе работы;
- в результате механических повреждений и износа оборудования.

Пробойю газа в неоднородном поле предшествует возникновение коронного разряда, который сопровождается свечением и разрушением молекул и является фактически неполным пробоем.

Коронный разряд – это явление, связанное с ионизацией воздуха в электрическом поле с высокой напряженностью (свечение газов в неоднородном электрическом поле высокой напряженности). При дальнейшем повышении напряжения корона перерастает в кистевой разряд, который затем переходит в искровой, а далее – в дуговой.

На линиях электропередачи возникновение коронного разряда нежелательно, т. к. вызывает значительные потери передаваемой энергии. С целью уменьшения относительной кривизны электродов применяются многопроводные линии (три, пять или более определенным образом расположенных проводов).

Условия возникновения короны и пробоя газа в неоднородном поле зависят от полярности напряжения, приложенного к стержневому электроду. В случае электродов типа «игла – плоскость», создающих резко неоднородное поле,  $U_{пр}$  газов будет наименьшим при положительной полярности иглы и наибольшим – при отрицательной полярности иглы (рисунок 2.3). Такая зависимость объясняется тем, что ионизация газа при любой полярности на электродах происходит в районе иглы, где существуют наибольшие напряженности электрического поля. В результате ионизации образуются электроны и ионы, причём электроны быстро нейтрализуются на аноде, а вблизи иглы остаются малоподвижные положительно заряженные ионы. «Облако» объёмного заряда изменяет первоначальное распределение потенциала. При положительной полярности на игле (см. рисунок 2.3, б) объёмный заряд ослабляет напряжённость поля вблизи иглы и, наоборот, усиливает ее в неионизированной области. Создаются благоприятные условия для дальнейшей ионизации газа, т. е. дальнейшего прорастания объёмного заряда в направлении к катоду. При отрицательной полярности на игле (см. рисунок 2.3, в) облако положительного заряда уменьшает напряжённость поля в неионизированной области. Поэтому дальнейшая ионизация газа возможна лишь при более высоком напряжении на электродах. Для повышения пробивного напряжения газообразного диэлектрика и во избежание возникновения электрической короны острые края электродов необходимо закруглить. При увеличении влажности пробивное напряжение воздушного промежутка возрастает.

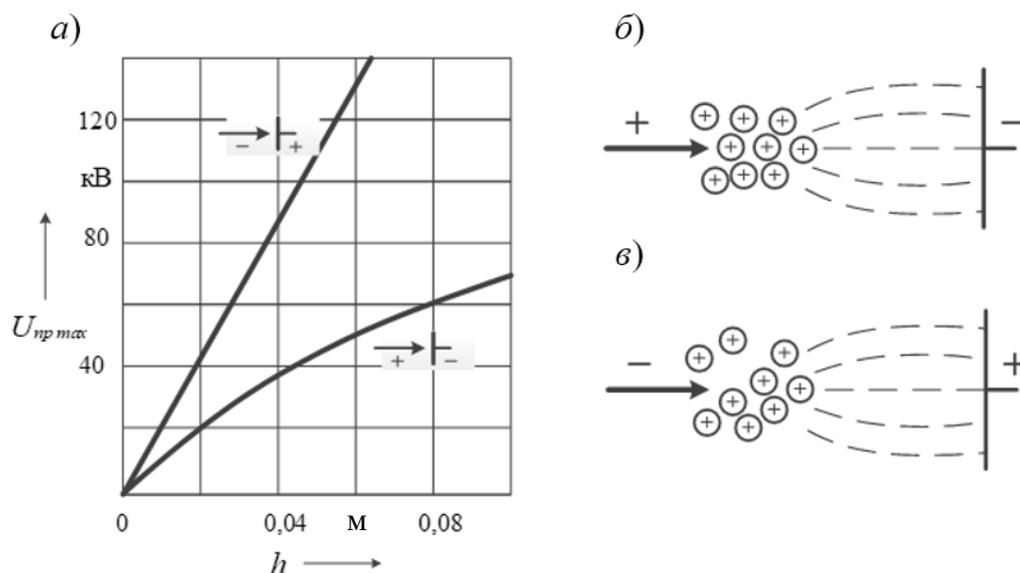
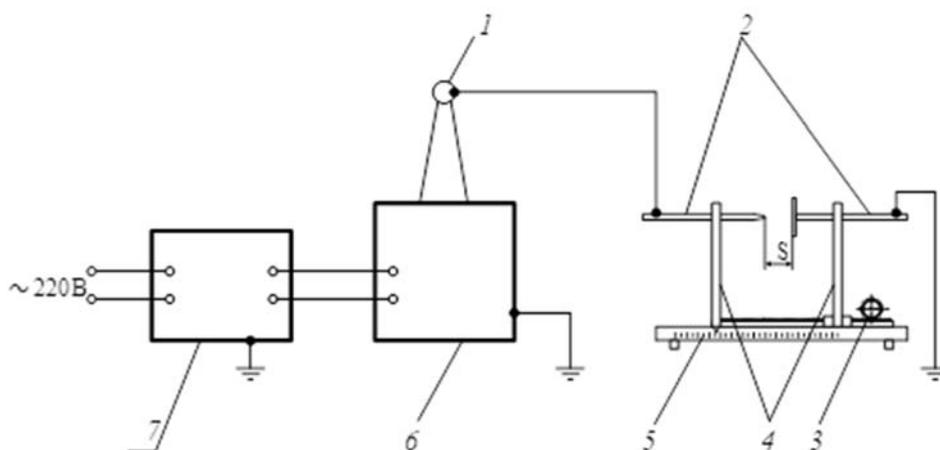


Рисунок 2.3 – Зависимости пробивного напряжения воздуха от расстояния между электродами в неоднородном поле (а) и модель объемного заряда в разрядном промежутке при положительной (б) и отрицательной (в) полярности на игле

## 2.2 Описание испытательной установки

Исследование разрядных напряжений воздушных промежутков производится с помощью стенда, схема которого показана на рисунке 2.4.



1 – высоковольтный вывод; 2 – электрод; 3 – шестерня; 4 – стойки; 5 – мерная линейка; 6 – источник испытательного напряжения; 7 – блок управления

Рисунок 2.4 – Схема стенда для определения разрядных напряжений воздушных промежутков

К высоковольтному выводу 1 источника испытательного напряжения 6 присоединяется один из электродов 2, изготовленных из нержавеющей стали и закреплённых в стойках 4 из диэлектрического материала; другой электрод заземляется. Расстояние между электродами определяется мерной линейкой 5 и изменяется вращением шестерни 3 посредством изолирующего стержня. Включение

и отключение испытательного напряжения, а также регулирование его величины производится с помощью блока управления 7, установленного снаружи ограждённой зоны испытаний. В качестве источника испытательного напряжения применяется аппарат АВ-50/70-1.

### **2.3 Содержание и объём выполнения работы**

- 1 Ознакомиться со схемой испытательной установки.
- 2 Изучить меры по технике безопасности.
- 3 Подготовить таблицы для внесения результатов измерений.

Объём проводимых на лабораторных занятиях испытаний определяет преподаватель. Для испытаний используют сменные наборы электродов («плоскость – плоскость», «сфера – плоскость», «игла – плоскость»), позволяющие создавать различные формы электрических полей для испытания диэлектриков, на напряжении переменного и постоянного тока.

### **2.4 Порядок выполнения работы**

1 При выключенной установке закрепить электроды на разряднике и установить необходимое расстояние между ними.

2 Вращая ручку регулятора испытательного напряжения против часовой стрелки, установить ее в исходное положение до упора.

3 Включить сетевые автоматы. Тумблером «~/-» включить необходимый вид испытательного напряжения.

4 Включить испытательное напряжение кнопкой «пуск», при этом должна загореться красная сигнальная лампочка.

5 Приступить к эксперименту, плавно повышая напряжение со скоростью не более 1...2 кВ/с; в момент пробоя воздушного промежутка и после пробоя заметить показания киловольтметра. После пробоя записать показания вольтметра PV1 (при необходимости PA1) в таблицу 2.1.

**Внимание! Первый опыт проводится при непосредственном участии преподавателя.**

6 По окончании испытания, вращая ручку регулятора испытательного напряжения против движения часовой стрелки, установить её в исходное положение до упора.

7 Для каждого расстояния опыт повторить 3 раза и пробивное напряжение определить как среднеарифметическое результата трёх измерений. Результаты испытаний занести в таблицу 2.1.

Полученные значения пробивных напряжений  $U_{np}$ , кВ, привести к нормальным атмосферным условиям (давление 760 мм рт. ст., температура 20 °С) по формуле

$$U_{np} = U_{np.0} \cdot \delta, \quad (2.2)$$

где  $U_{np}$  – пробивное напряжение в условиях опыта, кВ;

$U_{np.0}$  – пробивное напряжение при нормальных условиях, кВ;

$\delta$  – относительная плотность воздуха,

$$\delta = \frac{0,386 p}{t + 273}; \quad (2.3)$$

$p$  – барометрическое давление в условиях опыта, мм рт. ст.;

$t$  – температура воздуха в условиях опыта, °С.

Далее рассчитать средние значения электрической прочности  $E_{np}$ . Результаты измерений и расчетов свести в таблицы 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1 – Результаты исследования электрической прочности воздуха в однородном и слабооднородном электрических полях

Номер опыта	Тип электрода	$h$ , м	$U_{np}$ , кВ				$U_{np.0}$ , кВ	$E_{np}$ , МВ/м
			1	2	3	Среднее		
	«Плоскость – плоскость»	0,01						
		0,02						
		0,03						
		0,04						
	«Шар – плоскость»	0,01						
		0,015						
		0,02						
		0,025						

Таблица 2.2 – Результаты исследования электрической прочности воздуха в неоднородном электрическом поле («игла – плоскость»)

Номер опыта	Игла отрицательная					$h$ , м	Игла положительная				$E_{np}$ , МВ/м
	$U_{np}$ , кВ				$E_{np}$ , МВ/м		$U_{np}$ , кВ				
	1	2	3	Среднее			1	2	3	Среднее	
						0,01					
						0,02					
						0,03					
						0,04					

## 2.5 Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- цель работы;
- электрическую схему и описание установки АВ-50/70-1;
- основные расчётные формулы и примеры вычислений с указанием размерности определяемых величин;
- таблицы результатов измерений, графики зависимостей  $U_{np} = f(h)$  и  $E_{np} = f(h)$ ;
- выводы о влиянии расстояния между электродами, формы и полярности электродов на величину пробивного напряжения и электрической прочности.

### ***Контрольные вопросы***

- 1 Какая форма электродов и при каких условиях даёт максимальную стабильность электрической прочности воздуха?
- 2 Почему диэлектрики теряют электрическую прочность? Какие параметры характеризуют пробой? Поясните механизм пробоя воздуха.
- 3 Дайте определение электрического пробоя и электрической прочности диэлектрика.
- 4 Как зависит электрическая прочность газообразных диэлектриков от давления?
- 5 Каковы преимущества газообразных диэлектриков перед остальными видами электроизоляционных материалов?
- 6 В каких электротехнических устройствах в качестве диэлектрика используется воздух? Объясните, почему в качестве электроизоляционных материалов используются другие газы. Приведите примеры.
- 7 Как влияет полярность электродов на величину пробивного напряжения в резко неоднородном электрическом поле?
- 8 Что собой представляет коронный разряд?
- 9 Почему при развитии разряда образовывается облако положительных ионов?
- 10 Какое влияние оказывает барьер на электрическую прочность промежутка при различных полярностях электродов?

## **3 Лабораторная работа № 3. Определение электрической прочности жидких диэлектриков**

### ***Цель работы***

- 1 Ознакомиться с основными физическими и электрическими характеристиками жидких диэлектриков.
- 2 Изучить методику измерения и экспериментальное исследование электрической прочности жидких диэлектриков.

### ***3.1 Краткие теоретические сведения***

Жидкие диэлектрики используют для пропитки кабелей высокого напряжения, конденсаторов, для заливки трансформаторов, выключателей и вводов. Кроме этого, они выполняют функции теплоносителя в трансформаторах, дугогасителя в выключателях и др. В качестве жидких диэлектриков наибольшее распространение получили нефтяные электроизоляционные масла и синтетические диэлектрики.

Нефтяные масла состоят в основном из сложной смеси углеводородов разного строения: нафтеновых, ароматических и парафиновых, сернистых соединений, небольшого количества кислород- и азотсодержащих соединений, а также

следов металлоорганических соединений. От процентного состава этих углеводородов зависит стойкость масел к окислению, газостойкость, а также вязкостно-температурные, физико-химические и электрические характеристики масел.

К основным характеристикам жидких диэлектриков относятся следующие:

– электрическая прочность. Определяется по пробивному напряжению. Для свежего масла пробивное напряжение должно быть не менее 30 кВ. Снижение пробивного напряжения свидетельствует, как правило, о загрязнении масла водой, воздухом, волокнами и другими примесями;

– тангенс угла диэлектрических потерь. Характеризует свойство трансформаторного масла как диэлектрика. Диэлектрические потери характеризуют качество и степень очистки свежего масла, а в процессе эксплуатации – степень его загрязнения и старения;

– влагосодержание. Ухудшение этого показателя свидетельствует о потере герметичности трансформатора или его работе в недопустимом нагрузочном режиме;

– температура вспышки масла. Характеризует степень его испаряемости. Температура вспышки для обычных трансформаторных масел колеблется в пределах 130 °С...150 °С. В отношении пожарной безопасности большую роль играет температура самовоспламенения – это температура, при которой масло при наличии воздуха над поверхностью загорается самопроизвольно без поднесения пламени и составляет 350 °С...400 °С;

– температура застывания – это наибольшая температура, при которой масло застывает настолько, что при наклоне пробирки под углом 45° его уровень в течение 1 мин не изменяется;

– газосодержание масла. Повышенное содержание газа в масле приводит к ухудшению его свойств: возрастанию интенсивности окисления, снижению электрической прочности изоляции активной части трансформатора;

– плотность. Характеризует восприимчивость масел к присадкам, их гигроскопичность, сопротивляемость воздействию электрического поля;

– вязкость. Характеризует подвижность масла при температурных колебаниях в трансформаторе. Ухудшение вязкости нарушает теплообмен, ускоряет старение изоляции;

– кислотное число – это количество едкого калия (КОН), выраженного в миллиграммах, необходимое для нейтрализации свободных кислот в 1 г масла. Данный показатель характеризует старение масла. Кислотное число не должно превышать 0,25 мг КОН на 1 г масла;

– цвет масла у большинства масел светло-желтый. Темный цвет свежего масла характеризует отклонения в технологии его изготовления на заводе;

– механические примеси – нерастворенные вещества, содержащиеся в масле в виде осадка или взвешенном состоянии. Это волокна, пыль, продукты растворения в масле компонентов, применяемых в конструкции трансформатора;

– водорастворимые кислоты и щелочи, содержащиеся в масле, свидетельствуют о его низком качестве. Они могут образовываться в процессе изготовления при нарушении технологии производства, а также при эксплуатации в результате его окисления. Эти кислоты вызывают коррозию металла и ускоряют старение изоляции;

– стабильность проверяется в эксплуатации при получении партий свежего масла путем проведения его искусственного старения. Стабильность масла характеризует его срок службы и определяется двумя показателями – процентным содержанием осадка и кислотным числом;

– показатель преломления отражает содержание в масле нефтеноароматических углеводородов.

Механизм пробоя жидких диэлектриков и значения электрической прочности зависят от вида жидкого диэлектрика, степени его очистки, наличия в нём влаги и газа.

Электрический пробой в «чистом» виде возможен только в тщательно очищенных жидких диэлектриках и происходит за счет сочетания двух процессов: ударной ионизации электронами и холодной эмиссии с катода.

В технически чистых диэлектриках имеет место электротепловой пробой.

Электрическая прочность жидких диэлектриков зависит от температуры, давления, частоты и формы напряжения, формы и материала электродов, а также от наличия примесей.

Электрическая прочность увлажнённого трансформаторного масла имеет сложную температурную зависимость. Это объясняется различным состоянием влаги при разных температурах. В области невысоких положительных температур около 0 °С влага находится в эмульсионном состоянии и обуславливает наиболее низкие значения электрической прочности трансформаторного масла. При понижении температуры за счёт перехода воды в кристаллическое состояние (в лёд) её влияние уменьшается и электрическая прочность увеличивается. С повышением температуры вода переходит в молекулярно-растворённое состояние, снижается вероятность образования водяных мостиков, вследствие чего  $E_{np}$  масла возрастает. При дальнейшем увеличении температуры начинается испарение влаги и наблюдается рост диссоциации молекул воды на ионы. Увеличение количества носителей зарядов приводит к повышению плотности тока и дополнительному разогреву жидкости, что способствует усилению испарения влаги с образованием пузырьков водяного пара. За счёт этого развитие разряда облегчается, и электрическая прочность уменьшается.

Электрическая прочность жидких диэлектриков зависит от однородности электрического поля: с увеличением неоднородности электрического поля пробивное напряжение снижается. В неоднородном поле в жидкости может возникнуть неполный пробой (корона). Под действием короны происходят процессы интенсивного разложения и образования продуктов распада (горючих газов и сажи), которые резко снижают электрическую прочность. При переходе коронного разряда в дуговой процессы разложения резко ускоряются.

### **3.2 Описание испытательной установки**

Исследование электрической прочности трансформаторного масла в однородном электрическом поле производится с помощью стенда, схема которого показана на рисунке 3.1.

В соответствии с Правилами технической эксплуатации (ПТЭ)

электрические свойства чистого сухого и эксплуатационного масел оцениваются по пробивному напряжению. Испытание масла на пробой производится между латунными дисковыми плоскими электродами диаметром 25 мм, расположенными внутри стандартного фарфорового сосуда на расстоянии 2,5 мм. Поверхность жидкого диэлектрика должна отстоять от верхнего края электродов не менее чем на 15 мм. Края электродов закруглены (см. рисунок 3.1).

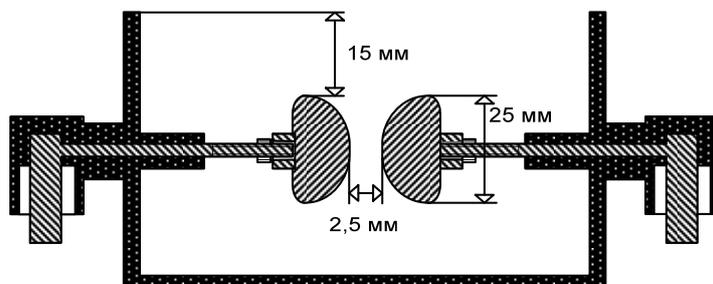


Рисунок 3.1 – Схема стандартного разрядника

### **3.3 Содержание и объём выполнения работы**

1 Ознакомиться со схемой испытательной установки. Описание устройства и принципа работы аппарата АВ-50/70-1 представлено в лабораторной работе № 1.

2 Изучить меры по технике безопасности.

3 Подготовить таблицу для внесения результатов измерений.

Объём проводимых на лабораторных занятиях испытаний определяет преподаватель.

### **3.4 Порядок выполнения работы**

1 Залить в сосуд необходимое для испытания количество жидкого диэлектрика. Дать отстояться жидкому диэлектрику в течение 5...10 мин, для того чтобы из него вышли пузырьки воздуха. Подключить электроды к высоковольтным шинам.

2 Вращая ручку регулятора испытательного напряжения против часовой стрелки, установить ее в исходное положение до упора.

3 Включить сетевые автоматы. Тумблером «~/-» включить необходимый вид испытательного напряжения.

4 Включить испытательное напряжение кнопкой «пуск», при этом должна загореться красная сигнальная лампочка.

5 Приступить к эксперименту, плавно повышая напряжение со скоростью не более 1...2 кВ/с; в момент пробоя заметить показания киловольтметра. После пробоя записать показания вольтметра PV1 (при необходимости PA1) в таблицу 3.1.

6 По окончании испытания, вращая ручку регулятора испытательного напряжения против движения часовой стрелки, установить её в исходное положение до упора. Затем отключить аппарат, нажав кнопку «стоп».

7 Повторить 6 раз опыт определения  $U_{np}$ . После каждого пробоя жидкому диэлектрику дать отстояться в течение 5 мин. Результаты опытов занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Определение электрической прочности жидкого диэлектрика

Номер опыта	Расстояние между электродами $h$ , мм	Пробивное напряжение $U_{np}$ , кВ	Среднее значение $U_{np. ср}$ , кВ	Электрическая прочность $E_{np}$ , МВ/м
1				
2				
3				
4				
5				

Среднее арифметическое значение пробивного напряжения  $\bar{U}_{np}$ , кВ, рассчитать по формуле

$$\bar{U}_{np} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{np.i}, \quad (3.1)$$

где  $U_{np.i}$  – величина пробивного напряжения в  $i$ -м опыте (напряжение первого пробоя в расчет не принимается), кВ;

$n$  – число опытов.

Значение коэффициента вариации  $\sigma_u$  вычислить по формуле

$$\sigma_u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (U_{np.i} - \bar{U}_{np})^2}{n(n-1)}}. \quad (3.2)$$

Значение пробивного напряжения должно отвечать нормированному значению коэффициента вариации  $V$ , вычисленного по формуле

$$V = \frac{\sigma_u \cdot 100}{U_{np}}. \quad (3.3)$$

Если значение коэффициента вариации превышает 20 %, то в этом случае дополнительно производят еще одно заполнение испытательной ячейки порцией жидкости из того же сосуда с пробой жидкости, проводят еще шесть определенных пробивного напряжения и для расчета по формулам (3.1)–(3.3) число пробоев  $n$  берут равным 12. Если и в этом случае коэффициент вариации превышает 20 %, качество диэлектрика следует считать неудовлетворительным.

Электрическая прочность трансформаторного масла рассчитывается по формуле

$$E_{np} = \frac{\bar{U}_{np}}{h}, \quad (3.4)$$

где  $h$  – расстояние между электродами, м.

Результаты испытания масла занести в таблицу 3.1.

После подсчета среднего значения пробивного напряжения на основании предельных допустимых значений показателей качества трансформаторного масла сделать вывод о пригодности масла для использования в электроустановках различных классов напряжения.

### **3.5 Содержание отчёта**

Отчёт должен содержать:

- цель работы;
- электрическую схему и описание установки АВ-50/70-1;
- основные расчетные формулы и примеры вычислений с указанием размерности определяемых величин;
- таблицу результатов испытаний;
- график разброса значений пробивного напряжения от порядкового номера опыта, построенного по данным таблицы 3.1;
- выводы о пригодности испытанного жидкого диэлектрика.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Какие параметры трансформаторного масла изменяются в процессе старения? Какие факторы ускоряют или замедляют процесс старения?
- 2 Как влияет температура на пробивное напряжение трансформаторного масла?
- 3 Как влияют характер примесей и степень очистки жидких диэлектриков на их электрическую прочность?
- 4 Каковы объём и нормы испытаний для изоляционного масла?
- 5 Как производится очистка и сушка масла?
- 6 Какое влияние оказывает процентное содержание различных рядов углеводородов на электрические и физико-химические характеристики трансформаторного масла?
- 7 Какова зависимость  $\text{tg}\delta$  от частоты и температуры для полярных и неполярных жидкостей?
- 8 Какие функции выполняют жидкие диэлектрики в электроустановках?
- 9 От каких факторов зависит электрическая прочность жидких диэлектриков?

## 4 Лабораторная работа № 4. Определение электрической прочности твердых диэлектриков

### *Цель работы*

1 Исследовать зависимость электрической прочности твердых диэлектриков от толщины диэлектрика.

2 Изучить явления образования и развития разряда вдоль поверхности твердого диэлектрика в воздухе.

### *4.1 Основные теоретические сведения*

В твёрдых диэлектриках может возникнуть четыре вида пробоя: электрический, электротепловой, ионизационный и электрохимический, которые могут проявляться у одного и того же диэлектрика в зависимости от его состояния и внешних условий – наличия дефектов, в том числе пор, охлаждения, времени воздействия напряжения, характера электрического поля (постоянное, переменное или импульсное, низкой или высокой частоты) и т. п.

Электрический пробой имеет место, когда исключено влияние электропроводности и диэлектрических потерь, обуславливающих нагрев материала, а также отсутствует ионизация газовых включений. Он наблюдается у большинства диэлектриков при кратковременном (импульсном) воздействии напряжения. На практике электрический пробой твердых диэлектриков обычно происходит при попадании в электроустановку грозового разряда (молнии) или в результате коммутационных перенапряжений.

Электротепловой (тепловой) пробой возможен, когда выделяющееся в диэлектрике за счёт электропроводности и диэлектрических потерь тепло становится больше отводимой в окружающую среду теплоты. В результате в месте пробоя происходит разогрев диэлектрика, сопровождающийся образованием узкого проплавленного канала высокой проводимости. Пробивное напряжение при тепловом пробое зависит от ряда факторов: частоты поля, условий охлаждения, температуры окружающей среды и др. Кроме того, напряжение теплового пробоя связано с нагревостойкостью материала.

Ионизационный пробой – это пробой, обусловленный ионизационными процессами вследствие частичных разрядов в диэлектрике. Он наиболее характерен для диэлектриков с воздушными включениями. При больших напряженностях поля в воздушных порах происходит ионизация воздуха, образование озона, ускоренных ионов, выделение тепла. Все эти процессы приводят к постепенному разрушению изоляции и снижению электрической прочности. По форме такой разряд похож на ствол дерева с ветвями, поэтому он носит название ветвистого или дендритного разряда.

Электрохимический пробой происходит при напряжениях, меньших электрической прочности диэлектрика. Вызывается изменением химического состава и структуры диэлектрика в результате электрического старения. Имеет

существенное значение при повышенных температурах и высокой влажности воздуха. Этот вид пробоя наблюдается при постоянном и переменном напряжении низкой частоты.

Поверхностный пробой – это пробой через слой газа или жидкости, обычно покрывающих поверхность твёрдого диэлектрика. Электрическая прочность диэлектрика при поверхностном пробое в основном не превышает 3...100 МВ/м, поскольку электрическая прочность газов и жидкостей ниже, чем соответствующая величина для твёрдых диэлектриков. Для повышения напряжения поверхностного пробоя в высоковольтных радиотехнических устройствах применяется ряд эффективных методов, таких как увеличение длины разрядного пути вдоль поверхности твёрдого диэлектрика за счёт её гофрирования, нанесение на поверхность диэлектрических плёнок с высокой диэлектрической проницаемостью, погружение изоляторов в жидкий диэлектрик.

## ***4.2 Содержание и объём выполнения работы***

Схема подключения оборудования для проведения лабораторной работы показана на рисунке 1.3.

Изучить меры по технике безопасности.

Объём проводимых на лабораторных занятиях испытаний определяет преподаватель.

Испытуемым твёрдым диэлектриком служит бумага, пропитанная трансформаторным маслом, а также сухая бумага (непропитанная). Число листов (толщина) испытуемого диэлектрика задается преподавателем.

## ***4.3 Порядок выполнения работы***

1 При выключенной установке зафиксировать между электродами испытуемый диэлектрик. Образцы испытуемых материалов помещают в горизонтальной плоскости между двумя электродами, причём размеры образцов должны быть больше размера электродов, чтобы избежать поверхностного перекрытия.

2 В соответствии с заданием преподавателя установить необходимое количество слоев испытуемого диэлектрика.

3 Вращая ручку регулятора испытательного напряжения против часовой стрелки, установить ее в исходное положение до упора.

4 Включить сетевые автоматы. Тумблером «~/–» включить необходимый вид испытательного напряжения.

5 Включить испытательное напряжение кнопкой «пуск», при этом должна загореться красная сигнальная лампочка.

6 Приступить к эксперименту, плавно повышая напряжение со скоростью не более 1...2 кВ/с; в момент пробоя образца и после пробоя заметить показания киловольтметра. После пробоя записать показания вольтметра PV1 (при необходимости PA1) в таблицу 4.1.

7 По окончании испытания, вращая ручку регулятора испытательного напряжения против движения часовой стрелки, установить её в исходное

положение до упора.

Полученные значения пробивных напряжений  $U_{np}$ , кВ, привести к нормальным атмосферным условиям по формулам (2.2) и (2.3).

Далее рассчитать электрическую прочность образца  $E_{np}$ , МВ/м, по формуле (2.1). Результаты измерений и расчетов сводятся в таблицу 4.1.

Выполнить пп. 1–7 для всех заданных преподавателем диэлектрических материалов и количества слоёв.

Таблица 4.1 – Результаты исследования электрической прочности твёрдого диэлектрика от толщины

Наименование диэлектрика	Число листов	Толщина $h$ , м	$U_{np}$ , кВ	$U_{np.0}$ , кВ	$E_{np}$ , МВ/м
Бумага непропитанная	1				
	2				
	4				
	6				
Бумага пропитанная	1				
	2				
	4				
	6				

#### 4.4 Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- описание цели работы;
- краткое описание установки АВ-50/70-1, используемой в работе, ее электрическую схему;
- основные расчетные формулы;
- таблицы результатов измерений и вычислений, графики зависимостей  $U_{np} = f(h)$  и  $E_{np} = f(h)$ ;
- выводы о влиянии пропитки на электрическую прочность бумаги.

#### Контрольные вопросы

- 1 Назовите виды пробоев твердых диэлектриков и их характеристики.
- 2 Объясните влияние толщины твердого диэлектрика на его электрическую прочность.
- 3 Объясните влияние времени приложения напряжения к диэлектрику на его электрическую прочность.
- 4 Для чего осуществляют пропитку пористых изоляционных материалов жидкими диэлектриками?
- 5 Почему напряженность электрического поля, вызывающего перекрытие по поверхности диэлектрика, меньше электрической прочности среды между

теми же электродами?

6 Какие виды твердых диэлектриков Вы знаете? В чем их существенное отличие друг от друга?

7 Почему напряженность электрического поля, вызывающего перекрытие по поверхности диэлектрика, меньше электрической прочности среды между теми же электродами?

## **5 Лабораторная работа № 5. Исследование зависимости удельного электрического сопротивления сплавов от состава, строения, механической и термической обработки**

### ***Цель работы***

1 Экспериментально определить зависимость удельного электрического сопротивления двухкомпонентных сплавов от соотношения содержания компонентов в сплаве.

2 Экспериментально определить удельное электрическое сопротивление меди от температуры отжига.

### ***5.1 Краткие теоретические сведения***

Проводниками называются вещества, удельное электрическое сопротивление которых лежит в пределах от 0,01 до 10 мкОм·м. По удельному электрическому сопротивлению металлические проводниковые материалы делятся на две основные группы:

1) металлы высокой проводимости:  $\rho$  при  $t = 20^\circ\text{C}$  составляет не более 0,05 мкОм·м;

2) материалы и сплавы высокого удельного сопротивления, имеющие при тех же условиях  $\rho$  не менее 0,3 мкОм·м.

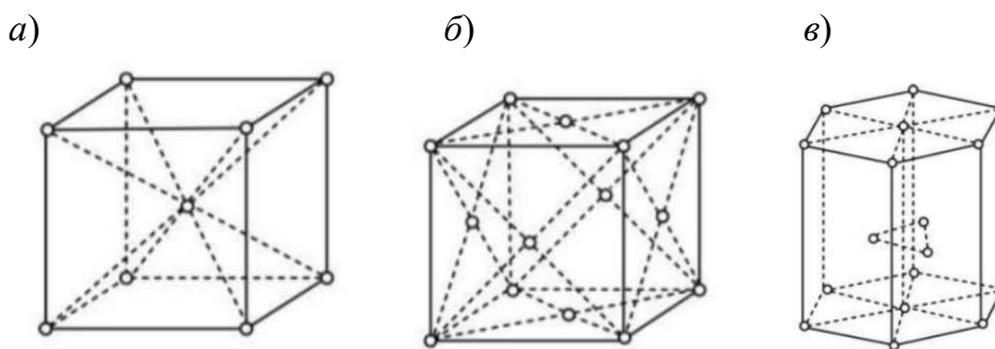
К первой группе относятся преимущественно чистые металлы (медь, алюминий, серебро и др.), применяемые для изготовления обмоточных и монтажных проводов, шнуров, жил кабелей различного напряжения, шин, распределительных устройств, обмоток трансформаторов и электрических машин (электродвигатели, стартеры, генераторы).

Проводниковые материалы второй группы – это сплавы на основе меди, никеля, железа, хрома и других металлов. Эти материалы используются для изготовления резисторов, шунтов, электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания.

Процесс образования в металлах кристаллической решетки называется кристаллизацией. Кристаллизация металла происходит постепенно. Она объединяет два процесса, происходящих одновременно: возникновение центров кристаллизации и рост кристаллов. В процессе кристаллизации, когда растущий кристалл окружен жидкостью, он имеет правильную геометрическую форму. При столкновении растущих кристаллов их правильная форма нарушается.

В твёрдом состоянии металлы имеют кристаллическое строение. Кристаллическая решетка – это воображаемая пространственная сетка, в узлах которой расположены атомы. Наименьшая часть кристаллической решетки, определяющая структуру металла, называется элементарной кристаллической ячейкой.

Наиболее типичными формами кристаллических решёток для металлов являются: кубическая гранецентрированная (алюминий, медь, никель, свинец, золото,  $\gamma$ -железо и другие металлы), кубическая объёмно-центрированная ( $\alpha$ -железо, хром, вольфрам, молибден и др.) и гексагональная плотноупакованная (кадмий, цинк, магний, бериллий, титан и др.) (рисунок 5.1). В узлах кристаллических решёток находятся положительные ионы.



*a* – кубическая объёмно-центрированная ОЦК; *б* – кубическая гранецентрированная ГЦК; *в* – гексагональная плотноупакованная

Рисунок 5.1 – Типы кристаллических решёток

Показателями кристаллической решётки являются параметр решётки, число атомов в каждой элементарной ячейке, координационное число и плотность упаковки.

Параметр решётки – это расстояние между атомами по ребру элементарной ячейки. Параметры решётки измеряются в нанометрах или ангстремах ( $1 \text{ нм} = 10 \text{ \AA} = 10^{-9} \text{ м}$ ). Параметры кубических решёток характеризуются длиной ребра куба и обозначаются буквой *a*.

Координационное число – количество ближайших соседей данного атома.

Плотность упаковки – это отношение суммарного объёма, занимаемого собственно атомами в кристаллической решётке, к её полному объёму. Компактность решётки зависит от особенностей электронной структуры металлов и характера связи между их атомами.

Металлические сплавы – это вещества, обладающие металлическими свойствами и состоящие из двух или более элементов, из которых хотя бы один является металлом. Их получают охлаждением расплавленных смесей, совместным осаждением из газовой фазы, электроосаждением из растворов и расплавов, диффузионным насыщением. Сплавы (кроме сплавов с неорганической растворимостью компонентов в твёрдом состоянии) представляют системы, состоящие из нескольких фаз, находящихся в равновесии при определенных внешних условиях (температуре, давлении).

У сплавов более высокая механическая прочность, удельное электрическое сопротивление, стойкость к коррозии и т. д. Электрическое сопротивление сплава всегда выше, чем сопротивление любого его компонента.

Большинство металлов, находясь в расплавленном состоянии, растворяются друг в друге, образуя жидкий раствор. При кристаллизации могут образовываться однофазные сплавы (твёрдые растворы), механические смеси и химические соединения (интерметаллиды).

Твёрдые растворы возникают в том случае, если атомы одного компонента могут встраиваться в кристаллическую решётку другого компонента, из которых один является растворителем, а другой – растворимым веществом.

В случае образования механических смесей компоненты взаимно растворяются только в жидком состоянии. В твёрдом состоянии сплавы этой системы состоят из зерен чистых компонентов, не растворяются и не вступают в химическое взаимодействие.

Химическое соединение возникает, если компоненты могут вступать в химическую реакцию друг с другом и образовывать устойчивое сложное вещество со строго определенным соотношением одного и другого компонента. Для них присуща кристаллическая решетка, отличная от решеток исходных компонентов.

Медь, как основной проводниковый материал, применяется в электроэнергетическом оборудовании. К достоинствам меди относятся: малое удельное сопротивление (из всех металлов только серебро имеет несколько меньшее удельное сопротивление, чем медь); достаточно высокая механическая прочность; стойкость к коррозии. Для получения мягкой (отожженной) меди ее нагревают до нескольких сотен градусов, а затем охлаждают. При отжиге изменение механических свойств выражается сильнее, чем электрических. Отожженная медь марки ММ имеет более высокую удельную проводимость и удлинение при разрыве, т. е. она сравнительно пластична, но меньшую механическую прочность и твердость, чем твердотянутая медь марки МТ. Область применения той или иной марки меди формируется в соответствии с механическими и электрическими свойствами. Мягкая медь применяется для изготовления токопроводящих жил кабелей различного назначения, обмоточных и монтажных проводов и т. д. Твердотянутая медь применяется там, где требуется обеспечить высокую механическую прочность, твердость, сопротивляемость истирающим нагрузкам и упругость: для контактных проводов, шин распределительных устройств, коллекторных пластин электрических машин т. д.

## ***5.2 Содержание и объём выполнения работы***

Подготовить таблицы для внесения результатов измерений.

Объём проводимых испытаний определяет преподаватель, проводящий лабораторные занятия. Максимальный объём испытаний – наборы опытных образцов сплавов с известным содержанием компонентов (10 шт.) и набор опытного образца термической обработки меди (10 шт.).

### 5.3 Порядок выполнения работы

1 Для измерения электрического сопротивления при выполнении лабораторной работы используется комбинированный измерительный прибор типа Щ4311 (*или другой с аналогичными характеристиками*).

2 Измерить электрическое сопротивление при комнатной температуре опытных образцов сплавов с известным содержанием компонентов (планшет № 1).

3 Образец подключить к зажимам комбинированного прибора и измерить электрическое сопротивление при комнатной температуре опытного образца. Результаты измерений внести в таблицу 5.1 (в таблице 10 строк).

4 Выполнить пп. 2–3 для остальных опытных образцов сплавов с известным содержанием компонентов, номера планшетов задает преподаватель. Результаты расчётов внести в соответствующие таблицы.

Геометрические размеры образцов, химический состав и другие необходимые сведения представлены на планшетах.

**Внимание!** В работе производится исследование трех типов сплавов, поэтому таблицу 5.1 необходимо выполнить, соответственно, 3 раза.

Таблица 5.1 – Результаты исследований сплава

Геометрический размер			Приближенный химический состав		R, Ом	ρ, мкОм·м
l, м	S, м <sup>2</sup>	D, м	A, %	B, %		

5 Рассчитать удельное электрическое сопротивление материала для каждого образца.

$$\rho = R \cdot S / l, \quad (5.1)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление, Ом · м;

R – сопротивление проводника, Ом;

S – поперечное сечение проводника, м<sup>2</sup>;

l – длина проводника, м.

6 Измерить электрическое сопротивление твёрдотянутой меди от режима обработки, планшет № 4. Результаты измерений занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты исследований твёрдотянутой меди от режима обработки

Геометрический размер			Температура отжига, °С	Время отжига, ч	R, Ом	ρ, мкОм·м
l, м	S, м <sup>2</sup>	d, м				

7 Результаты исследований оформить в виде таблиц и графиков зависимостей удельного сопротивления от процентного соотношения компонентов сплава.

8 Сравнить полученные графики зависимостей сплавов с теоретическим и определить тип сплава.

#### **5.4 Содержание отчёта**

Определить:

- тип кристаллической решётки исходных металлов;
- тип образованного сплава;
- влияние структуры и фазового состава на электропроводность проводниковых материалов;
- область применения исследуемых сплавов в электротехнике.

Отчёт должен содержать:

- цель работы;
- основные расчётные формулы и примеры вычислений с указанием размерности определяемых величин;
- таблицы результатов испытаний;
- графики зависимости удельного электрического сопротивления от процентного состава компонентов сплава  $\rho = f(\%AB)$ ;
- сравнительную оценку полученных данных в сопоставлении со справочными данными;
- график зависимости удельного электрического сопротивления от температуры отжига;
- выводы.

#### **Контрольные вопросы**

1 Как классифицируются проводниковые материалы по значению удельного сопротивления? Где применяются металлы высокой проводимости и сплавы высокого сопротивления?

2 Какое строение имеют металлы? Какими показателями характеризуется кристаллическая решётка?

3 Назовите основные виды кристаллических решёток для металлов, дефекты их строения.

4 Объясните, почему у чистых металлов электропроводность больше, чем у сплавов.

5 Как образуются сплавы? Виды сплавов.

6 Какое влияние на электропроводность медных сплавов оказывает наличие в них примесей и почему?

7 Как изменяется удельное электрическое сопротивление сплавов, компоненты которых образуют неограниченные твёрдые растворы?

8 Какое влияние и почему оказывает пластическая деформация, сопровождающаяся наклёпом, на электропроводность металлических проводников?

9 Как изменяются электрические и механические свойства сплавов, образующих при сплавлении механическую смесь? Приведите пример применения такого сплава.

## **6 Лабораторная работа № 6. Исследование электрических свойств материалов высокой проводимости и высокого сопротивления**

### ***Цель работы***

1 Изучить физико-химические и механические свойства материалов высокой проводимости и сплавов высокого сопротивления.

2 Экспериментально определить зависимости электрического сопротивления, удельного электрического сопротивления и его температурного коэффициента проводниковых материалов от температуры.

3 Экспериментально определить зависимости электрического сопротивления, удельного электрического сопротивления и его температурного коэффициента резистивных сплавов от температуры.

### ***6.1 Краткие теоретические сведения***

Проводники – материалы, хорошо проводящие электрический ток. Сопротивление, а следовательно, и удельное электрическое сопротивление металлов зависит от температуры. Высокая электропроводность металлов обусловлена значительной концентрацией свободных электронов и их подвижностью. Особенностью металлов является то, что носителями заряда в них являются только электроны, причем у разных металлов их концентрация практически одинакова:  $n = 10^{22} \dots 10^{23} \text{ см}^{-3}$ . Концентрация электронов в металлических проводниках от температуры не зависит, но от температуры зависит их подвижность, меняя время свободного пробега. С ростом температуры скорость теплового движения возрастает, а длина свободного пробега электрона уменьшается и уменьшается электропроводность.

В качестве резистивных материалов применяют металлы и сплавы с высоким удельным электрическим сопротивлением, окислы металлов, углерод, композиционные материалы. Выбор материала зависит от номинального сопротивления резистора, его назначения и условий эксплуатации. Применяться резистивный материал может в виде объемного элемента, проволоки различного диаметра или пленки, осажденной на поверхности диэлектрика.

Для электронагревательных приборов и элементов применяются жаростойкие сплавы высокого сопротивления, длительно работающие в воздушной среде при температурах свыше плюс 1000 °С и выше, а также проволочные или ленточные резисторы. Кроме стойкости к окислению, при высоких температурах под воздействием воздуха или других газообразных сред, жаростойкие сплавы должны обладать высоким удельным сопротивлением и его малым температурным коэффициентом. В состав жаростойких сплавов входят металлы, которые при работе на воздухе могут образовывать на своей поверхности сплошную оксидную пленку, способную защитить оставшийся металл от дальнейшего окисления. Металлами, обладающими способностью образовывать оксидную пленку,

являются никель, алюминий, хром. Эти металлы входят в состав сплавов системы Fe–Ni–Cr (нихромы) или системы Fe–Cr–Al (фехрали и хромали).

Температурный коэффициент сопротивления  $TK_R$  или  $\alpha_R$ ,  $K^{-1}$ , – величина, равная отношению относительного изменения сопротивления проводника к изменению его температуры. Температурный коэффициент сопротивления численно равен относительному изменению сопротивления проводника при нагревании на 1 К (на 1 °С).

$$\alpha_R = TK_R = \frac{1}{R_0} \cdot \frac{R_1 - R_0}{T_1 - T_0} \quad (6.1)$$

или через удельное сопротивление

$$\alpha_\rho = TK_\rho = \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\rho_1 - \rho_0}{T_1 - T_0}, \quad (6.2)$$

где  $\alpha_\rho$  – средний температурный коэффициент удельного электрического сопротивления, °С<sup>-1</sup> (K<sup>-1</sup>);

$\rho_0$  – удельное электрическое сопротивление при температуре  $T_0$ , принятой за начальную (обычно принимают  $T_0 = 20$  °С), мкОм·м;

$\rho_1$  – удельное электрическое сопротивление при температуре  $T_1$ , мкОм·м.

Для всех металлических проводников коэффициент  $\alpha_R > 0$  и незначительно меняется с изменением температуры. Если интервал изменения температуры невелик, то температурный коэффициент можно считать постоянным и равным его среднему значению на этом интервале температур. Для чистых металлов температурный коэффициент сопротивления  $\alpha_R \approx 1/273$  K<sup>-1</sup>.

Металлы имеют большой температурный коэффициент удельного электрического сопротивления (у большинства  $40 \cdot 10^{-4}$  °С<sup>-1</sup> и более), так что их электрическое сопротивление с температурой изменяется очень заметно. Для сплавов значение  $\alpha_\rho$  значительно меньше ( $10^{-4} \dots 10^{-6}$  °С<sup>-1</sup>). При оценке температурного коэффициента удельного электрического сопротивления следует также учитывать  $TK_R$  и  $TK_l$ . Эти температурные коэффициенты связаны между собой формулой

$$\alpha_\rho = TK_\rho = TK_R + TK_l, \quad (6.3)$$

где  $TK_R$  – измеренный температурный коэффициент сопротивления, °С<sup>-1</sup>;

$TK_l$  – коэффициент линейного расширения металла, °С<sup>-1</sup>.

Для чистых металлов  $TK_\rho \gg TK_l$  и можно считать  $TK_\rho \approx TK_R$ . Но для резистивных сплавов с особо малым значением  $TK_\rho$  значением  $TK_l$  пренебрегать нельзя.

## 6.2 Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рисунок 6.1) состоит из нагревательного устройства А1 1, в котором размещены исследуемые изделия 2 и 3 из различных проводниковых материалов. Они закреплены на панели из диэлектрика. На коммутационную панель 4 через соединение разъёмное (розетка XS1 – вилка XP1) подключены исследуемые образцы. Для измерения температуры внутри нагревательного устройства используется термопара ЕК1.

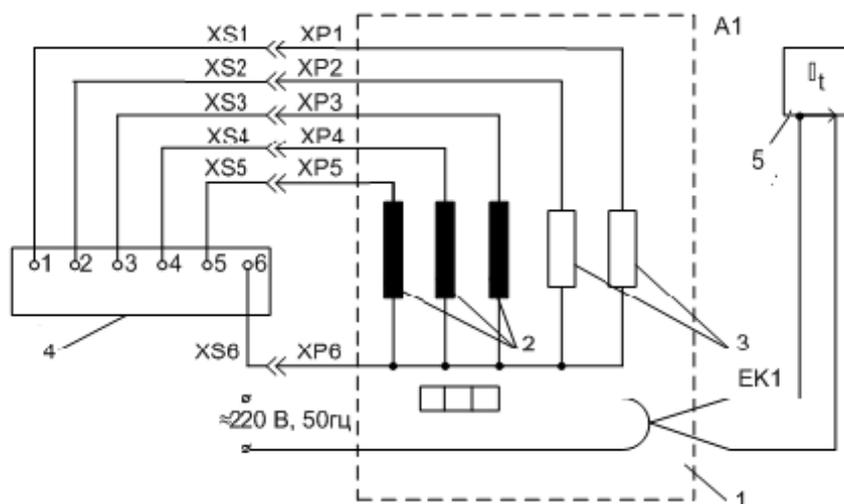


Рисунок 6.1 – Схема лабораторной установки

## 6.3 Содержание и объём выполнения работы

- 1 Ознакомиться с порядком выполнения работы.
- 2 Подготовить таблицы для внесения результатов измерений.

Объём проводимых испытаний определяет преподаватель, проводящий лабораторные занятия. Наборы опытных образцов, выполненных из металлов и сплавов, – 5 шт.

## 6.4 Порядок выполнения работы

1 Для измерения электрического сопротивления при выполнении лабораторной работы используется комбинированный измерительный прибор типа Щ4311 (или другой с аналогичными характеристиками).

2 Поочередно измерить сопротивление  $R_0$  исследуемых опытных образцов при комнатной температуре  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (планшет № 1). Длина и диаметр исследуемых образцов приведены в таблице, расположенной на стенде. Результаты измерений занести в таблицу 6.1.

3 По измеренному сопротивлению  $R_0$  рассчитать удельное электрическое сопротивление  $\rho$ , пользуясь формулой (6.1) и используя справочные данные [1], определить название материалов, из которых они изготовлены. В данной работе используются металлы высокой проводимости и сплавы высокого сопротивления.

Таблица 6.1 – Результаты измерения сопротивления исследуемых образцов

Номер образца	Наименование материала	$R_0$ , Ом	$\rho_0$ , мкОм·м	$l$ , м	$D$ , м	$S$ , м <sup>2</sup>
1						
2						
3						
4						
5						

**Внимание!** В работе производится исследование электротехнических изделий на высокой температуре до 200 °С.

4 Включить нагревательное устройство А1 в сеть. При достижении температуры 110 °С отключить нагревательное устройство А1 от сети. Далее нагрев происходит «по инерции». Когда начинается процесс остывания и температура достигнет значения 120 °С, выполнить поочерёдное измерение образцов; измерения произвести через каждые 20 °С. Результаты измерений занести в таблицу 6.2.

**Внимание!** В работе производится исследование пяти электротехнических изделий, поэтому таблицу 6.2 необходимо выполнить, соответственно, 5 раз.

5 По результатам измерений и данным таблиц 6.1 и 6.2 рассчитать по формуле (5.1) для металлов и сплавов удельное электрическое сопротивление (экспериментальное значение) при различных температурах. Результаты расчётов занести в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – Результаты измерения сопротивления исследуемых материалов при изменении температуры

Исследуемый образец	Температура, °С					
	20	40	60	80	100	120
$R$ , Ом						
$\rho$ , мкОм·м (экспер.)						
$\rho$ , мкОм·м (теорет. для металлов)						
$\alpha_R$ , С <sup>-1</sup> (для сплавов)						
$\alpha_\rho$ , С <sup>-1</sup> (теорет. для металлов)						
$\alpha_\rho$ , С <sup>-1</sup> (экспер.)						

6 Для металлов рассчитать теоретическое удельное сопротивление для различных температур (значение коэффициента теплопроводности  $\lambda$  взять из [1]). Результаты расчётов занести в таблицу 6.2.

$$\rho = \frac{L_0 \cdot T}{\lambda}, \quad (6.4)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление металлов, Ом·м;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$L_0$  – число Лоренца,  $L_0 = 2,443 \cdot 10^{-8}$  В<sup>2</sup>/К<sup>2</sup>;

$T$  – абсолютная температура, К.

7 Используя формулу (6.1), рассчитать температурный коэффициент удельного электрического сопротивления  $\alpha_\rho$  для металлов и сплавов. Результаты расчётов занести в таблицу 6.2.

8 Используя формулу (6.2), рассчитать температурный коэффициент электрического сопротивления  $\alpha_R$  для сплавов. Результаты расчётов занести в таблицу 6.2.

9 По данным таблицы 6.2 и расчетов в пп. 5–8 построить для металлов и сплавов графики зависимости удельного сопротивления от температуры  $\rho = f(T)$ , графики зависимости температурного коэффициента удельного сопротивления от температуры  $TK_\rho = f(T)$  по экспериментальным и теоретическим данным.

### 6.5 Содержание отчета

Отчет о работе должен содержать:

- цель работы;
- схему лабораторной установки;
- основные расчётные формулы и примеры вычислений с указанием размерности определяемых величин для каждой таблицы;
- график зависимости удельного сопротивления от температуры  $\rho = f(T)$  и график зависимости температурного коэффициента удельного сопротивления от температуры  $TK_\rho = f(T)$  по экспериментальным и теоретическим данным для металлов высокой проводимости;
- график зависимости удельного сопротивления от температуры  $\rho = f(T)$  и график зависимости температурного коэффициента удельного сопротивления от температуры  $TK_\rho = f(T)$  по экспериментальным данным для сплавов высокого сопротивления;
- сравнительную оценку полученных данных в сопоставлении со справочными данными;
- выводы.

### Контрольные вопросы

1 Что собой представляет температурный коэффициент удельного электрического сопротивления? Является ли он константой для данного металла? Чем он отличается от температурного коэффициента сопротивления?

2 Объясните зависимость удельного электрического сопротивления тонких металлических пленок от их толщины.

3 Объясните, почему удельное сопротивление металлов растет с повышением температуры.

4 Почему тонкие металлические пленки имеют отрицательный температурный коэффициент удельного сопротивления?

5 Какие медные и алюминиевые сплавы применяются в электротехнике? Область их применения и основные свойства.

6 Сравните электрические и физические свойства меди и алюминия.

7 Что представляют собой жаростойкие проводниковые материалы и где они применяются?

8 Что собой представляют бронзы? Маркировка и применение бронз в электротехнике.

9 Из каких материалов изготавливаются образцовые резисторы, шунты и добавочные сопротивления? Какие требования предъявляются к этим материалам?

10 Какие металлы могут образовывать оксидную пленку? Дайте определение коэффициенту оксидирования.

## **7 Лабораторная работа № 7. Исследование магнитных свойств ферромагнитных материалов с помощью осциллографа**

### ***Цель работы***

1 Изучить магнитные свойства магнитомягких материалов.

2 Определить основные характеристики магнитомягких материалов: снятие кривой намагничивания и гистерезисных циклов на переменном токе промышленной частоты и определить потери на гистерезис и вихревые токи.

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

Магнитные свойства имеются у любых материалов. Глобально, по отношению к магнитному полю, материалы можно разделить на три класса – диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики. Последние делятся на ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики. Ферро- и ферримагнетики относятся к сильномагнитным материалам, остальные группы к слабомагнитным веществам.

Диамагнетики – материалы, атомы, молекулы которых под воздействием внешнего магнитного поля создают магнитный момент, направленный в сторону, обратную внешнему полю, т. е. обладающие 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.

У парамагнетиков 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 ориенти-

руются с направлением внешнего поля, т. е. появляется положительная намагниченность.

К парамагнетикам относятся отдельные газы (кислород, окиси азота и др.), ряд металлов (щелочные металлы, титан, цирконий и т. п.) и др.

Ферромагнетики – материалы, находящиеся при температуре не выше точки Кюри даже в отсутствие внешнего магнитного поля в состоянии технического насыщения. Магнитная восприимчивость их 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.

Антиферромагнетики – материалы, в которых в результате обменного взаимодействия соседних атомов происходит антипараллельная ориентация равных по величине магнитных моментов, т. е. результирующий магнитный момент равен нулю. К антиферромагнетикам относятся хром, марганец, цезий, неодим, самарий и др.

Ферримагнетики – вещества с нескомпенсированным антиферромагнетизмом. К ферримагнетикам относятся некоторые упорядоченные металлические и различные оксидные соединения. В настоящее время используются типы марок ферритов, отличающихся по химическому составу, кристаллической структуре, магнитным и другим свойствам.

Возникновение магнитных свойств у ферромагнетиков связано с их доменным строением. Домены – это области самопроизвольной намагниченности, возникающие даже в отсутствие внешнего магнитного поля, в которых магнитные моменты атомов ориентированы параллельно. Размеры доменов зависят от неметаллических включений, границ зерен, скоплений дислокаций и других неоднородностей. Установление оптимального размера магнитных доменов обусловлено противоборством магнитной анизотропии и магнитострикции.

Магнитострикция – изменение линейных размеров, т. е. увеличение или уменьшение их длины с одновременным уменьшением или увеличением поперечного сечения, при намагничивании ферромагнетиков. Магнитострикция зависит от строения кристаллической решетки ферромагнетика

Магнитная анизотропия – неодинаковость намагничивания монокристалла в различных направлениях. Существуют кристаллические направления лёгкого и трудного намагничивания. Магнитная анизотропия проявляется в монокристаллах, в поликристаллических образцах она не обнаруживается. При намагничивании монокристалла вдоль направления лёгкого намагничивания затраты энергии намагничивания уменьшаются в несколько раз. Поэтому для поликристаллических металлов методом прокатки создают преимущественную ориентацию отдельных зёрен, при этом поликристаллический металл приобретает магнитную текстуру. При ребровой текстуре наилучшие магнитные свойства получаются в направлении прокатки, наихудшие – под углом  $55^\circ$  к направлению прокатки. При кубической текстуре наилучшие магнитные свойства обеспечиваются в направлении всех ребер куба элементарных ячеек.

Магнитные материалы, применяемые в технике, разделяют 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, пермаллои (сплав железа с никелем или кобальтом), магнитомягкие ферриты и магнитодиэлектрики. Магнитомягкие материалы имеют узкую петлю гистерезиса с небольшой коэрцитивной силой, а магнитотвердые – широкую, но эта классификация условная.

Магнитные свойства магнитомягких материалов характеризуются зависимостью магнитной индукции  $B$  от напряженности магнитного поля  $H$ , которую называют кривой намагничивания. Эта характеристика зависит от  $H$ , температуры и механических напряжений предшествующего магнитного состояния. В качестве исходного для получения кривой намагничивания принимают размагниченное состояние образца.

Различают кривые намагничивания на постоянном (статические) и переменном (динамические) токах. Статическая кривая намагничивания характеризует магнитные свойства стали, т. к. 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.

При циклическом перемагничивании (в переменном магнитном поле) кривая намагничивания образует петлю гистерезиса. Причинами гистерезиса являются необратимые процессы смещения границ доменов и процессы вращения. По кривым намагничивания определяют магнитные проницаемости вещества.

Основными параметрами петли гистерезиса являются остаточная индукция  $B_r$ , коэрцитивная сила  $H_c$  и площадь петли гистерезиса, характеризующая удельные потери на гистерезис  $P$  за один цикл перемагничивания.

Площадь петли гистерезиса характеризует затраты энергии на перемагничивание материала за один цикл.

Остаточной индукцией  $B_r$  называют индукцию, которая остается в предварительно намагниченном образце после снятия внешнего намагничивающего поля.

Коэрцитивной силой  $H_c$  называют напряженность поля, которую надо создать, чтобы ранее намагниченный до насыщения образец полностью размагнитить.

По механизму возникновения различают потери на гистерезис и на вихревые токи.

Потери на гистерезис связаны с явлением магнитного гистерезиса и с необратимым перемещением границ доменов. Они пропорциональны площади петли гистерезиса и частоте переменного поля.

Потери на вихревые токи вызываются электрическими токами, которые магнитный поток индуцируют в магнитном материале. Они зависят от удельного

электрического сопротивления материала: чем оно больше, тем меньше потери на вихревые токи, и формы сердечника.

Для изготовления магнитопроводов электрических машин, трансформаторов, дросселей и других устройств, рассчитанных на работу при частоте до 400...500 Гц в области малых, средних и сильных полей, иногда в постоянных полях и при повышенных частотах (до 10 кГц) применяются электротехнические стали.

Электротехническая кремнистая сталь классифицируется по следующим параметрам: структурному состоянию, содержанию кремния, основной нормирующей единице. Первая цифра в марке электротехнической стали показывает структурное состояние: 1 – горячекатаная изотропная; 2 – холоднокатаная изотропная; 3 – холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой; 5 – холоднокатаная сталь с плоскостной текстурой. Вторая цифра в марке показывает содержание кремния в процентах: 0 – до 0,4 %; 1 – от 0,4 % до 0,8 %; 2 – от 0,8 % до 1,8 %; 3 – от 1,8 % до 2,8 %; 4 – от 2,8 % до 3,8 %. Третья цифра в марке показывает группу стали по основной нормируемой характеристике: 0 – удельные потери при магнитной индукции  $B = 1,7$  Тл и частоте поля 50 Гц; 1 – удельные потери при магнитной индукции  $B = 1,5$  Тл и частоте поля 50 Гц; 2 – удельные потери при магнитной индукции  $B = 1,0$  Тл и частоте поля 400 Гц; 4 – удельные потери при магнитной индукции  $B = 0,5$  Тл и частоте поля 3000 Гц; 6 – магнитная индукция в слабых полях при напряженности магнитного поля  $H = 0,4$  А/м; 7 – магнитная индукция в средних полях при  $H = 10$  А/м. Четвертая цифра – порядковый номер типа стали. Различные марки электротехнической стали обозначают четырехзначными числами (например, 1211; 2013; 2212; 3413; 3416 и т. п.).

Сталь выпускается в виде рулонов, листов и резаной ленты. Она может быть без электроизоляционного покрытия или иметь его. Горячекатаная изотропная сталь поставляется в виде листов толщиной 0,1...1,0 мм, холоднокатаная изотропная – толщиной 0,28...0,65 мм, холоднокатаная анизотропная – толщиной 0,27...0,65 мм. Применение ленточных сердечников из текстурованной стали в силовых трансформаторах позволяет уменьшить их массу и габаритные размеры на 20 %...25 %, а в радиотрансформаторах – на 40 %. Листы тонкого проката предназначены в основном для использования в полях повышенной частоты (до 1 кГц).

## ***7.2 Описание испытательной установки***

При испытаниях магнитных материалов в большинстве случаев необходимо измерять напряжённость магнитного поля, магнитную индукцию и потери перемагничивания. Для этих целей используют различные методы, приборы и образцы магнитных материалов. При снятии на переменном токе получают динамические кривые намагничивания и динамическую петлю гистерезиса. При низких частотах и малой толщине магнитного материала динамическая кривая намагничивания совпадает со статической. Одним из распространенных методов измерения магнитных свойств ферромагнитных веществ является осциллографический метод

Схема лабораторной установки для испытания магнитомягких материалов приведена на рисунке 7.1, а сведения об образцах и параметрах элементов схемы – в таблице, представленной на стенде.

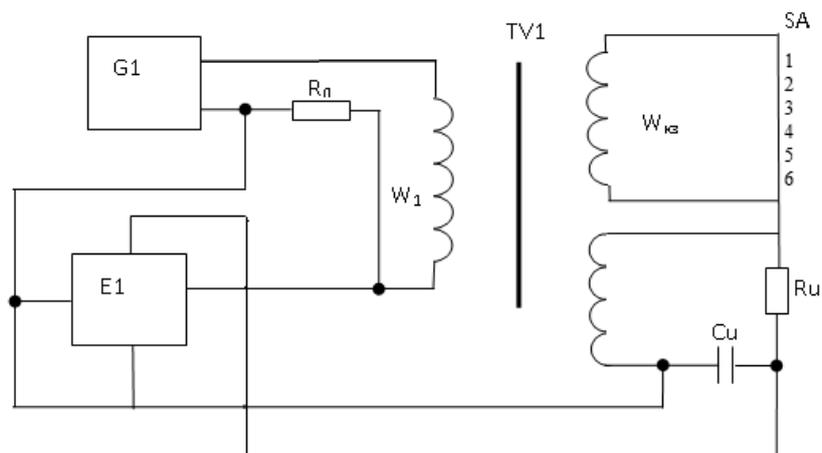


Рисунок 7.1 – Схема лабораторной установки для исследования магнитных свойств ферромагнитных материалов

Лабораторная установка содержит:

$G_1$  – генератор переменного напряжения звуковой частоты типа ГЗ-18;

$TV_1$  – трансформатор с тороидальным магнитным сердечником, изготовленный из исследуемого материала;

$R_0$  – образцовый резистор;

$C_u, R_u$  – интегрирующая цепочка;

$W_{кз}$  – короткозамкнутые витки;

$S$  – переключатель для подключения короткозамкнутых витков;

$E_1$  – осциллограф.

На каждый из образцов намотаны три обмотки:  $W_1$  – намагничивающая обмотка,  $W_2$  – измерительная и  $W_3$  – короткозамкнутая.

Для получения на экране осциллографа записи петли гистерезиса необходимо подать на вертикально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки напряжение, пропорциональное индукции в исследуемом образце, на горизонтально отклоняющие пластины – напряжение, пропорциональное намагничивающему полю.

На пластины горизонтального отклонения осциллографа  $E_1$  подаётся напряжение с  $R_0$ . Оно пропорционально току в намагничивающей обмотке  $W_1$ . Отклонение луча в горизонтальном направлении пропорционально амплитудному значению тока, а значит, и амплитудному значению напряженности поля. Ось  $X$  называется осью напряженности магнитного поля. В измерительной обмотке  $W_2$  образца под действием магнитного поля возникает вторичная ЭДС. К пластинам вертикального отклонения осциллографа  $E_1$  приложено напряжение  $U_c$ , снимаемое с конденсатора  $C_u$  интегрирующей цепочки. На вертикальную ось осциллографа подается напряжение пропорционально индукции в образце магнитного материала. При одновременном приложении этих напря-

жений к пластинам осциллографа на экране возникает неподвижное изображение петли гистерезиса.

### 7.3 Содержание и объём выполнения работы

1 Собрать схему лабораторной установки для исследования магнитных свойств.

2 Изучить расположение и назначение переключателей установки, выходов сигналов напряженности и средней индукции магнитного поля, а также входных зажимов осциллографа.

3 Подготовить таблицы для внесения результатов измерений.

4 Получить семейство гистерезисных циклов и динамическую кривую намагничивания электротехнической стали.

5 Составить отчет по лабораторной работе.

### 7.4 Порядок выполнения работы

1 Собрать схему лабораторной установки по рисунку 7.1, соединить зажимы  $X$  и  $3$  (земля) пульта с зажимами горизонтального входа осциллографа  $E1$ , а зажимы  $Y$  и  $3$  (земля) – с зажимами вертикального входа. Для исследования образца переключатель  $SA$  на установке поставить в положение 0. Установить предел шкалы ослабления генератора  $G1$  –  $+30 dV$ , предел шкалы вольтметра –  $60 V$ .

Получить разрешение преподавателя на включение установки под напряжение.

2 Включить осциллограф  $E1$  и генератор  $G1$ , установить частоту  $50$  Гц. Установить напряжение  $60 V$  с таким расчетом, чтобы довести образец до насыщения и ручками смещения осциллографа откорректировать изображение цикла гистерезиса так, чтобы положения вершин цикла были удобны для отсчета. Зарисовать цикл магнитного гистерезиса с соблюдением масштаба и записать полное отклонение луча на экране осциллографа по горизонтали  $X$  и вертикали  $Y$  в миллиметрах.

**Внимание! При всех дальнейших измерениях ручки горизонтального и вертикального усиления не трогать.**

3 С помощью регулятора выходного напряжения уменьшить ступенями через  $6 V$  напряжение на выходе ГЗ-18 от  $60 V$  до нуля. Получить семейство петель гистерезиса. При каждом новом значении напряжения записать величины  $X$  и  $Y$  в таблицу 7.1. Таблица 7.1 состоит из 10 строк.

Таблица 7.1 – Основная кривая намагничивания ферромагнетика

Материал	$f$ , Гц	$X$ , мм	$H$ , А/м	$Y$ , мм	$B$ , Тл	$\mu$

4 Влияние короткозамкнутых витков на петлю гистерезиса. Получить на экране осциллографа изображение цикла магнитного гистерезиса так, как это указано в п. 2, и зарисовать его. Затем переключателем SA увеличивать число короткозамкнутых витков, наблюдая за изменением гистерезисного цикла. На том же графике зарисовать цикл гистерезиса при шести короткозамкнутых витках. Рассчитать площадь для каждого гистерезисного цикла. Рассчитанные результаты занести в таблицу 8.2. Перевести переключатель SA в положение 0. Оценить качественное влияние короткозамкнутых витков на ширину и высоту гистерезисного цикла.

5 Влияние частоты приложенного напряжения на гистерезисный цикл. Установить частоту 100 Гц. При напряженности магнитного поля, соответствующей первоначальному гистерезисному циклу, зарисовать на кальку или сфотографировать полученный гистерезисный цикл. То же самое повторяют для частот 200, 300, 400, 500, 600, 800 и 1000 Гц. Рассчитать площадь для каждого гистерезисного цикла и результаты занести в таблицу 7.2. Таблица 7.2 состоит из 15 строк.

Таблица 7.2 – Результаты определения потерь в образце ферромагнетика

Материал	$f$ , Гц	$W_{кз}$	$S_n$ , м <sup>2</sup>	$\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup>	$P_{уд}$ , Вт/кг

6 Градуировка осей горизонтального и вертикального отклонений осциллографа. Градуировка проводится для определения истинных значений магнитной индукции и напряжённости магнитного поля. Установить выходное напряжение генератора G1 равным 0, частоту – 50 Гц. Отсоединить осциллограф и генератор от пульта с образцом материала. Соединить выход генератора ГЗ-18 с горизонтальным входом X осциллографа Е1, зажимы вертикального входа осциллографа закоротить. Далее с помощью регулятора повысить выходное напряжение генератора так, чтобы максимальное отклонение луча точно соответствовало отклонению по горизонтальной оси, полученному при наблюдении гистерезисного цикла на частоте 50 Гц. Полученное значение напряжения  $U_H$  занести в таблицу 7.3.

Таблица 7.3 – Результаты градуировки горизонтальной оси осциллографа

Материал	$W_1$	$U_H$ , В	$R_0$ , Ом	$r_{cp}$ , м	$X$ , мм	$h_1$ , (А/м)/мм
	250		50	0,03		

Вычислить масштаб горизонтальной оси осциллографа по формуле

$$h_1 = \frac{0,22 \cdot W_1 \cdot U_n}{R_0 \cdot r_{cp} \cdot X}, \quad (7.1)$$

где  $h_1$  – масштаб горизонтальной оси, (А/м)/мм;

$W_1$  – число витков первичной обмотки на образце испытуемого ферромагнитного материала;

$U_n$  – напряжение, В;

$R_0$  – образцовое сопротивление, Ом;

$r_{cp}$  – средний радиус образца, м;

$X$  – число миллиметров, на которое отклоняется луч под воздействием напряжения  $U_n$  при градуировке, мм.

7 Установить выходное напряжение генератора G1 на отметке 0. Произвести градуировку вертикальной оси осциллографа E1 аналогичным образом, с тем отличием, что закорачивают горизонтальный вход осциллографа. Полученное значение напряжения  $U_v$  генератора записать в таблицу 7.4.

Таблица 7.4 – Результаты градуировки вертикальной оси осциллографа

Материал	$W_2$	$U_v$ , В	$C_u$ , мкФ	$R_u$ , кОм	$S$ , м <sup>2</sup>	$Y$ , мм	$b_1$ , Тл/мм
	850		1	20	$10^{-4}$		

Вычислить масштаб вертикальной оси осциллографа по формуле

$$b_1 = (1,41 \cdot U_v \cdot C_u \cdot R_u) / (W_2 \cdot S \cdot Y), \quad (7.2)$$

где  $b_1$  – масштаб вертикальной оси, Тл/мм;

$U_v$  – напряжение, В;

$C_u$  – значение емкости конденсатора интегрирующей цепочки, Ф;

$R_u$  – сопротивление интегрирующей цепочки, Ом;

$W_2$  – число витков вторичной обмотке на образце испытуемого ферромагнитного материала;

$S$  – площадь сечения испытуемого образца, м<sup>2</sup>;

$Y$  – число миллиметров, на которое отклоняется луч осциллографа под воздействием напряжения  $U_v$  при градуировке, мм.

8 По данным таблиц 7.1–7.4 определить значения  $B$  и  $H$  по следующим формулам:

$$B = Y \cdot b_1; \quad (7.3)$$

$$H = X \cdot h_1, \quad (7.4)$$

где  $B$  – магнитная индукция, Тл;

$H$  – напряженность магнитного поля, А/м.

9 Рассчитать относительную магнитную проницаемость:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 \cdot H}; \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}. \quad (7.5)$$

10 По полученным данным построить зависимость  $B = f(H)$ ,  $\mu = f(H)$ .

11 Определить потери на гистерезис и вихревые токи.

Удельные потери в образце за один период вычисляют по формуле

$$P_{y\delta} = \frac{S_n \cdot h_1 \cdot b_1}{\rho \cdot 10^{-6}} f, \quad (7.6)$$

где  $P_{y\delta}$  – удельные потери за один период, Дж/кг;

$S_n$  – площадь гистерезисной петли, м<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность материала образца, кг/м<sup>3</sup>;

$f$  – частота питающего напряжения, Гц.

Удельные потери в образце определяются для каждой петли гистерезиса, а по полученным данным строят зависимость  $P_{y\delta} = f(B)$ .

### 7.5 Содержание отчёта

Отчет о работе должен содержать:

- цель работы;
- схему установки;
- рисунки предельных циклов гистерезиса;
- результаты наблюдений и вычислений в виде таблиц, отдельных записей, а также формулы и расчеты;
- описание материала (электротехническая сталь, легированная кремнием: маркировка, состав, применение);
- графики зависимости  $B = f(H)$ ,  $\mu = f(H)$  и  $P_{y\delta} = f(B)$ .

### Контрольные вопросы

- 1 Назовите основные характеристики магнитомягких материалов.
- 2 Как в данной работе получают основную кривую намагничивания?
- 3 Чем отличаются статические кривые намагничивания от динамических? Какие кривые снимались в данной работе?
- 4 Почему для испытания берут образец в виде тора?
- 5 Назовите состав, свойства и область применения ферритов.
- 6 Назовите магнитомягкие ферромагнетики. Какова технология изготовления изделий из этих материалов?
- 7 Назовите основные механизмы намагничивания ферромагнетика, приводящие к нелинейной зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля.
- 8 Как определяются потери по снятой петле гистерезиса? Как зависит форма петли гистерезиса от частоты?
- 9 Какие виды потерь возникают в магнитных материалах? Укажите способы их уменьшения.
- 10 Какие материалы применяют на повышенных частотах?

## 8 Лабораторная работа № 8. Исследование электрических свойств полупроводников

### *Цель работы*

- 1 Изучение электрических характеристик и свойств полупроводниковых материалов при различной температуре.
- 2 Определение запрещённой зоны полупроводника.

### *8.1 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. Удельное сопротивление полупроводников при комнатной температуре находится в пределах от  $10^{-3}$  до  $10^7$  Ом·м. При низких температурах чистые полупроводники ведут себя как диэлектрики, а при высоких температурах проявляют повышенную электропроводность.

В полупроводниках имеются носители тока двух видов: отрицательно заряженные электроны и положительно заряженные дырки с одинаковыми по абсолютной величине зарядами. Чистый полупроводник, обладающий собственной проводимостью, имеет одинаковую концентрацию электронов и дырок. Проводимость, обусловленная наличием примесей в полупроводнике, называется примесной. Полупроводники, в зависимости от валентности введенной примеси, делятся на полупроводники *p*- и *n*-типа.

В полупроводниках носители заряда возникают лишь при повышении температуры или поглощении энергии от другого источника.

На зависимость сопротивления полупроводников от температуры влияют несколько факторов:

- при повышении температуры по экспоненциальному закону растет концентрация свободных носителей заряда – электронов и дырок;
- при повышении температуры уменьшается время релаксации.

Электрические свойства полупроводников объясняются зонной теорией твердого тела. Согласно этой теории из отдельных энергетических уровней отдельных атомов в твердом теле образуются зоны энергетических уровней: валентная зона, запрещенная зона и зона проводимости. В полупроводнике между валентной и зоной проводимости имеется запрещенная зона небольшой величины:  $W \approx 0,01 \dots 3$  эВ.

### *8.2 Описание лабораторной установки*

Лабораторная установка (см. рисунок 6.1) состоит из нагревательного устройства А1 1, в котором размещены исследуемые изделия 2, 3 из различных полупроводниковых материалов. Они закреплены на панели из диэлектрика. На

коммутационную панель 4 через соединение разъёмное (розетка XS1 – вилка XR1) подключены исследуемые образцы. Для измерения температуры внутри нагревательного устройства используется термопара ЕК1.

### 8.3 Содержание и объём выполнения работы

1 Ознакомиться с порядком выполнения работы.

2 Подготовить таблицы для внесения результатов измерений.

Объём проводимых испытаний определяет преподаватель, проводящий лабораторные занятия. Наборы опытных образцов, выполненных из полупроводников, – 5 шт.

### 8.4 Порядок выполнения работы

1 Для измерения электрического сопротивления при выполнении лабораторной работы используется комбинированный измерительный прибор типа Щ4311 (или другой с аналогичными характеристиками).

2 Поочередно измерить сопротивление  $R_0$  исследуемых опытных образцов при комнатной температуре  $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$  (планшет № 1). Результаты измерений занести в таблицу 8.1.

3 Включите нагреватель и доведите температуру образца до  $60\text{ }^\circ\text{C} \dots 70\text{ }^\circ\text{C}$ . Затем выключите его и дождитесь, пока температура начнет снижаться. Измерения следует проводить при остывании, т.к. нагрев происходит слишком быстро и образец не успевает прийти в состояние термодинамического равновесия.

4 Проведите шесть измерений сопротивления образца при различных температурах через  $5\text{ }^\circ\text{C}$  в зависимости от скорости остывания. Занесите результаты измерений в таблицу 8.1.

**Внимание! В работе производится исследование пяти электротехнических изделий, поэтому таблицу 8.1 необходимо выполнить, соответственно, 5 раз.**

Таблица 8.1 – Результаты измерения сопротивления исследуемых материалов при изменении температуры

Исследуемый образец	Температура, $^\circ\text{C}$					
	20	30	40	50	60	70
$R$ , Ом						
$T$ , К						
$1/T$ , $\text{K}^{-1}$						
$\ln R$ , Ом						

5 По полученным данным построить график зависимости логарифма сопротивления полупроводника  $\ln R$  от обратной абсолютной температуры  $1/T$ . Интервалы величин  $\ln R$  и  $1/T(\text{K} - 1)$  на осях выберите в соответствии с диапазонами изменения этих величин в проведенных измерениях. При нанесении

экспериментальных точек на график не соединяйте соседние точки линиями. Так как предполагается, что зависимость  $\ln R$  от  $1/T$  является примерно линейной, проведите через все экспериментальные данные на графике общую прямую линию.

6 Рассчитать угловой коэффициент прямой по формуле

$$b = \operatorname{tg}\alpha = \frac{\ln R_2 - \ln R_1}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}}. \quad (8.1)$$

Для определения углового коэффициента прямой следует выбрать две точки, лежащие на прямой подальше друг от друга, но в пределах измерений (эти точки обозначены кружками) и построить треугольник, как показано на рисунке 8.1. Угловой коэффициент прямой может быть определен из этого треугольника как тангенс угла наклона прямой  $\operatorname{tg}\alpha$ .

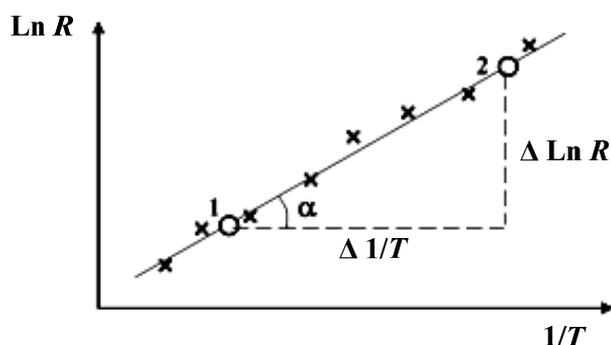


Рисунок 8.1 – График зависимости логарифма сопротивления от обратной температуры

7 Рассчитать ширину запрещенной зоны  $\Delta W$  по формуле и определить какому материалу она соответствует.

$$b = \frac{\Delta W}{2k}, \quad (8.2)$$

где  $\Delta W$  – ширина запрещенной зоны;

$k$  – константа Больцмана,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К =  $8,62 \cdot 10^{-5}$  эВ/К.

8 Сделать выводы относительно характера температурной зависимости сопротивления полупроводника.

### 8.5 Содержание отчёта

Отчет о работе должен содержать:

- цель работы;
- схему установки;
- результаты наблюдений и вычислений в виде таблиц, отдельных записей,

а также формулы и расчеты;

- график зависимости  $\ln R = f(1/T)$ ;
- анализ полученных данных и сопоставление их со справочным материалом и данными литературы.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Какие материалы называются полупроводниками?
- 2 Чем отличаются зонные модели металлов, диэлектриков и полупроводников?
- 3 Опишите механизм образования свободных носителей заряда в собственных полупроводниках.
- 4 Опишите механизм образования свободных носителей заряда в донорных и акцепторных полупроводниках, используя их зонные модели.
- 5 Как образовывается полупроводник *n*-типа и *p*-типа?
- 6 Как зависит сопротивление полупроводников от температуры?
- 7 Как влияет ширина запрещенной зоны на предельно допустимую рабочую температуру полупроводника?
- 8 Как определить энергию активации для терморезисторов?
- 9 На основе каких материалов целесообразно изготавливать терморезисторы, полупроводниковые диоды, варисторы?
- 10 Что такое примесная проводимость полупроводника? Каковы механизмы примесной проводимости?

### **Список литературы**

- 1 **Мороз, Н. К.** Электротехническое материаловедение : учебник / Н. К. Мороз. – М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 148 с.
- 2 **Хазиева, Р. Т.** Электротехническое и конструкционное материаловедение: учеб. пособие / Р. Т. Хазиева. – М. ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 124 с.
- 3 **Черепяхин, А. А.** Электротехническое и конструкционное материаловедение: учебник / А. А. Черепяхин, Т. И. Балькова, А. А. Смолькин. – Ростов н/Д: Феникс, 2017. – 349 с.
- 4 **Колесов, С. Н.** Материаловедение и технология конструкционных материалов / С. Н. Колесов, И. С. Колесов. – М. : Высш. шк., 2005. – 520 с.: ил.
- 5 **Пасынков, В. В.** Материалы электронной техники / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – 3-е изд. – СПб. : Лань, 2001. – 368 с.
- 6 **Привалов, Е. Е.** Электротехническое материаловедение: учеб. пособие / Е. Е. Привалов. – М.; Берлин: Директ-Медиа, 2015. – 234 с.
- 7 **Богородицкий, Н. П.** Электротехнические материалы / Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
- 8 Электротехнические и конструкционные материалы : учеб. пособие / Под ред. В. А. Филикова. – 7-е изд., испр. – М.: Академия, 2012. – 280 с.

9 **Петрова, Л. Г.** Электротехнические материалы: учеб. пособие / Л. Г. Петрова, М. А. Потапов, О. В. Чудина. – М. : МАДИ (ГТУ), 2008. – 198 с.

10 **Антипов, Б. Л.** Материалы электронной техники. Задачи и вопросы / Б. Л. Антипов, В. С. Сорокин, В. А. Терехов. – М. : Высш. шк., 1990. – 208 с.

11 Справочник по электротехническим материалам: в 3 т. / Под ред. Ю. В. Корицкого. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – Т. 1–3.