

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Электрические станции»

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (ПРАКТИКУМ)

по дисциплине «Электротехнические материалы»

для студентов специальностей

1-43 01 01 «Электрические станции»,

1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,

1-43 01 03 «Электроснабжение»,

1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»

Минск 2004

УДК 621.3.002.3 (076.5)

ББК 31.23

Л 12

Составители:

А.Н. Герасимович, А.Г. Губанович,

П.И. Климович, А.С. Красько,

И.А. Прима, С.П. Ржевская

Рецензенты:

Г.С. Климович, А.А. Гончар

Лабораторные работы содержат краткие теоретические сведения, описание и порядок выполнения восьми лабораторных работ по курсу «Электротехнические материалы» и предназначены для студентов специальностей 1-43 01 01 «Электрические станции», 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение», 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы».

ISBN 985-479-138-6

© Герасимович А.Н., Губанович А.Г.,
Климович П.И. и др.,
составление, 2004

Введение

Лабораторный практикум является пособием для выполнения лабораторных работ по курсу «Электротехнические материалы».

Приступая к выполнению лабораторной работы, студент должен иметь чёткое представление о поставленной перед ним задаче и о тех физических явлениях, которые предстоит исследовать. Он должен также понимать, какими способами производятся эти исследования, и хорошо знать устройство приборов и аппаратов, которыми предстоит пользоваться при выполнении работы. Всё это является свидетельством необходимости заблаговременной подготовки студента к занятиям в лаборатории.

Для облегчения этой подготовки описанию каждой лабораторной работы предшествуют краткие теоретические сведения по рассматриваемому явлению или процессу. Однако 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.

Описание каждой лабораторной работы заканчивается контрольными вопросами. Ответы на вопросы помогут студенту лучше усвоить учебный материал, на котором построена данная работа, и уяснить, достаточно ли глубоко изучены соответствующие разделы курса.

В каждой работе имеются указания по содержанию отчёта. В отчёт по своему усмотрению студент может включить и дополнительный материал. Отчёт по лабораторной работе выполняется каждым студентом индивидуально, аккуратно, согласно предъявляемым к нему требованиям и обязательно представляется преподавателю к началу следующего занятия.

Так как часть работ выполняется на установках высокого напряжения, то студенты перед началом работы в лаборатории должны изучить основные правила техники безопасности.

ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТАХ НА УСТАНОВКАХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

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. Студенты не имеют права самостоятельно работать на установках высокого напряжения и допускаются к работе в лаборатории только в сопровождении преподавателя.

4. Работа на установках высокого напряжения должна производиться не менее, чем двумя лицами, из которых одно должно иметь квалификацию, дающую право на самостоятельное производство работы на установках высокого напряжения.

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

6. Каждая высоковольтная установка должна иметь свою специально составленную инструкцию по технике безопасности.

Инструкция должна содержать:

- а) порядок включения и выключения установки;
- б) перечень запрещённых действий;
- в) краткое перечисление защитных средств и норм (ограждения, заземление, блокировка и т.п.) и правил их использования;
- г) описания действий в аварийных случаях.

7. Часто меняющаяся обстановка в лаборатории обязывает не полагаться на защитные устройства, и всякий раз, прежде чем приступить к работе, необходимо убедиться в:

- а) наличии инструкций по технике безопасности для данной установки;

б) исправности схемы блокировки, переносных заземлителей, постоянного заземления;

в) исправности ограждений и правильности их установки;

г) наличии предупреждающих плакатов;

д) отсутствии за ограждением людей.

8. Включая высокое напряжение, необходимо предварительно громко предупредить: «ВКЛЮЧАЮ ВЫСОКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ».

9. В процессе работы при включенной установке категорически запрещается:

а) заходить за ограждение;

б) передвигать ограждение;

в) протягивать руки за ограждение;

г) закорачивать или отключать блокировочные устройства;

д) снимать предупреждающие и предупреждающие плакаты;

е) оставлять установку, находящуюся под напряжением, без присмотра.

10. После выключения напряжения, прежде чем подойти к оборудованию, необходимо заземлить части установки, бывшие или могущие быть под высоким напряжением.

11. Напряжение должно быть снято и установка заземлена, если возникают сомнения в исправности установки или защитных средств.

12. При временном прекращении работы, переключениях в схеме и ремонтных работах установка должна быть отключена от источника питания и на рубильнике вывешен плакат «НЕ ВКЛЮЧАТЬ, РАБОТАЮТ ЛЮДИ».

13. После окончания работ необходимо:

а) заземлить участки установки, бывшие или могущие быть под высоким напряжением;

б) снять предупреждающие и запрещающие плакаты;

в) принять меры к предупреждению возможности случайного (ошибочного) включения.

14. При работе с высоковольтными установками недопустимо присутствие в помещении лаборатории посторонних лиц.

Настоящие правила составлены на основании типовых правил безопасности при работе студентов в учебных лабораториях и мастерских Министерства образования Республики Беларусь.

Лабораторная работа № 1

ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

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

1.1. Задание на подготовку

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

1.2. Краткие теоретические сведения

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

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

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

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

Перенапряжения возникают как в результате атмосферных явлений (грозовые перенапряжения), так и при переходных процессах:

аварийных и несимметричных режимах в электрических сетях (внутренние перенапряжения). Перенапряжения могут иметь кратковременный (импульсный) или длительный характер.

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

1.3. Генераторы импульсного напряжения (ГИН)

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

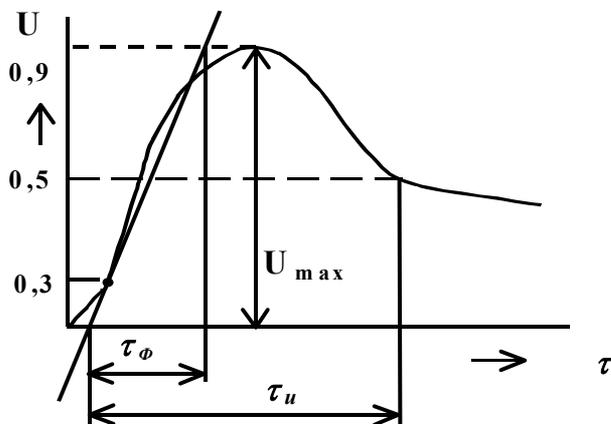


Рис. 1.1

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

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

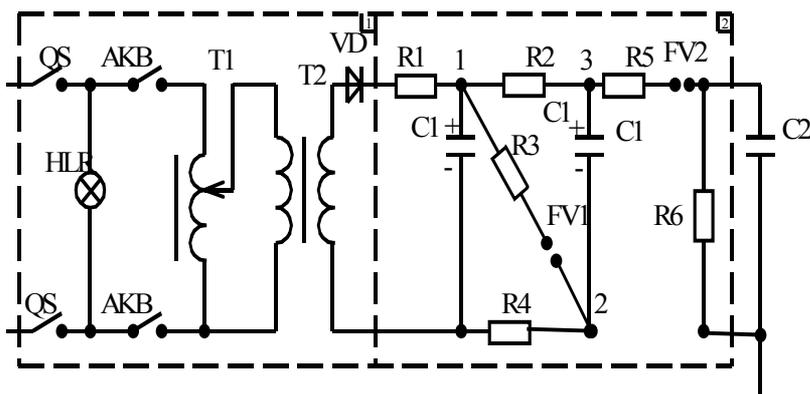


Рис. 1.2

Зарядное устройство 1 включает регулировочный автотрансформатор T1, повышающий трансформатор T2 и высоковольтный выпрямитель VD, т. е. ЗУ представляет собой однополупериодный высоковольтный регулируемый выпрямитель. В качестве вентиля VD на напряжение 100 кВ используют выпрямительные столбики на полупроводниковых диодах.

Умножитель напряжения 2 включает конденсаторы C1, резисторы R1 – R5 и разрядные промежутки FV1, FV2. На рис. 1.2 приведена схема удвоения напряжения.

Принцип работы ГИН заключается в следующем: на первой стадии, в режиме заряда конденсаторы C1 соединены параллельно и заряжаются от ЗУ через резисторы R1, R2, R4 с полярностью, указанной на схеме (см. рис. 1.2). Защитный резистор $R_1 = 3 \cdot 10^6$ Ом предназначен для ограничения тока заряда в момент включения, т.е. защищает вентиль VD и трансформатор T2 от перегрузки.

Величина напряжения, до которого заряжаются конденсаторы C1, определяется электрической прочностью искрового промежутка FV1, но не должна превышать амплитуду выпрямленного напряжения U_{2m} .

Когда напряжение в точке 1 превысит электрическую прочность промежутка FV1, происходит пробой этого промежутка и конденсаторы C1 соединяются последовательно: точка 2 будет соединена с точкой 1 через демпфирующий резистор R3 и сопротивление искрового промежутка FV1.

Благодаря тому что сопротивление резисторов R2, R4 велико ($R_2 = R_4 = 5 \cdot 10^4$ Ом), а сопротивление резистора R3 мало ($R_3 = 10 - 20$ Ом), конденсаторы не успевают разрядиться, потенциал точки 2 повышается до потенциала точки 1, а потенциал точки 3 увеличивается примерно в два раза.

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

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

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

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

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

Как видно из выражений (1.1) и (1.2) параметры напряжения на объекте (длительность фронта и длительность импульса) в основном определяются величиной сопротивления фронтового резистора R5 и разрядного резистора R6. Поэтому чтобы получить импульс с заданными значениями τ_{ϕ} и $\tau_{и}$, необходимо определить значения R5 и R6 по выражениям (1.1), (1.2). Плавное регулирование амплитуды импульса осуществляется за счет изменения расстояния искрового промежутка FV1.

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

1.4. Источники высокого напряжения промышленной частоты

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

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

Для испытательных установок промышленной частоты широкое применение получили каскадные схемы с заземленной средней точкой обмотки высокого напряжения и двумя изолированными высоковольтными выводами. Соединение средней точки высоковольтной обмотки с сердечником и баком трансформатора позволяет выполнить изоляцию высоковольтной обмотки и выводов на половину напряжения. Запас прочности по изоляции не превышает 20 – 30 %. Так как один из высоковольтных выводов может быть заземлен, то в этом случае сам трансформатор должен быть изолирован от земли и заземленного оборудования.

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

Как видно из рис. 1.3, один из выводов обмотки ВН первого каскада соединен с землей. Следовательно, относительно земли его бак имеет потенциал $0,5U_2$, а напряжение на втором выводе равно U_2 . Бак второго трансформатора имеет потенциал $1,5U_2$, а напряжение на выходе относительно земли $2U_2$.

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

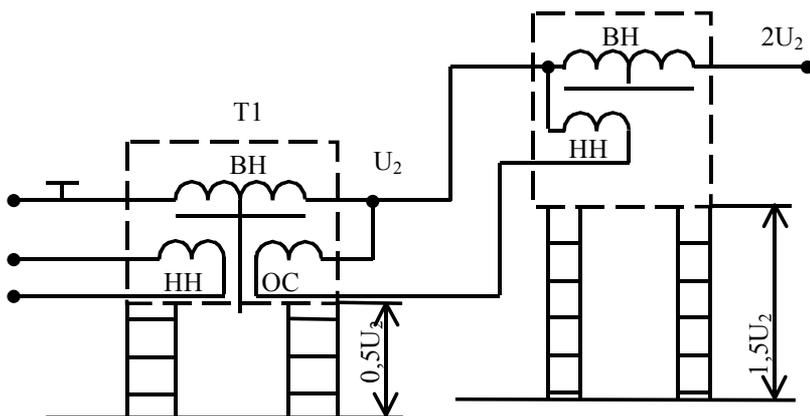


Рис. 1.3

Недостатком таких установок является значительная площадь, занимаемая ими.

1.5. Содержание работы и порядок ее выполнения

1. Детально ознакомиться с инструкцией по ТБ к данной установке.
2. Ознакомиться со схемой двухкаскадного ГИН и конструктивным ее выполнением.
3. Под руководством преподавателя включить ГИН в работу и добиться устойчивой генерации импульсов.
4. Измерить амплитуду импульса.
5. Отключить ГИН и заземлить.

1.6. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема ГИН и его параметры.
3. Результаты измерения $U_{2 \max}$.

1.7. Контрольные вопросы

1. Необходимость высоковольтных испытаний электротехнических материалов.

2. Основные испытательные установки.
3. Параметры стандартных импульсов.

Литература: [1], с. 53 – 72;
[2], с. 196 – 198.

Лабораторная работа № 2

ИЗМЕРЕНИЕ ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ($\operatorname{tg} \delta$) ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Цель работы: освоение методики измерения $\operatorname{tg} \delta$ изоляции электрооборудования мостом переменного тока.

2.1. Задание на подготовку

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями, приведенными в настоящей работе.
2. Изучить схему моста Р-252 и методику измерения $\operatorname{tg} \delta$ изоляции.
3. Ознакомиться с правилами безопасности при работе на этой установке.

2.2. Краткие теоретические сведения

Электрические машины, аппараты и приборы представляют собой конструкцию, содержащую проводники, находящиеся под различным напряжением, и диэлектрики, изолирующие между собой и относительно заземлённых конструкций проводники. Следовательно, всякое электрическое устройство обладает ёмкостью. Поэтому процессы, протекающие в диэлектриках (изоляции), правомерно рассмотреть на примере плоскопараллельного конденсатора (рис. 2.1).

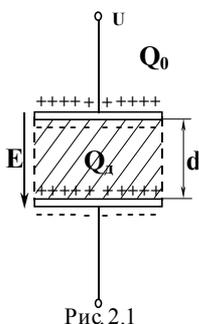


Рис. 2.1

При наличии разности потенциалов между обкладками конденсатора в диэлектрике возникает электрическое поле напряжённостью E .

$$E = U/d, \quad (2.1)$$

где U – напряжение, приложенное к обкладкам конденсатора,
 d – толщина диэлектрика.

Под действием электрического поля находящиеся в диэлектрике носители зарядов (электроны и ионы) перемещаются к обкладкам конденсатора, образуя ток сквозной проводимости $I_{скв}$, протекающий в объёме и по поверхности диэлектрика.

Связанные заряды под действием электрического поля смещаются ограниченно, образуя ток смещения (ток абсорбции $I_{абс}$).

Смещение связанных зарядов под действием электрического поля называется поляризацией диэлектрика.

В общем случае в диэлектрике могут быть два вида поляризации: упругая поляризация, возникающая мгновенно без рассеяния энергии; поляризация, протекающая замедленно и сопровождаемая рассеянием энергии в диэлектрике. Такой вид поляризации называется релаксационной. К ней относится дипольно-релаксационная поляризация, электронно-релаксационная и ионно-релаксационная поляризация, миграционная и спонтанная поляризации.

В результате смещения связанных зарядов в объёме диэлектрика образуется дополнительный заряд Q_d (см. рис. 2.1).

Заряд конденсатора Q равен

$$Q = C \cdot U, \quad (2.2)$$

где C – емкость конденсатора;

U – напряжение, приложенное к обкладкам конденсатора.

При наличии поляризации диэлектрика заряд конденсатора

$$Q = Q_0 + Q_d, \quad (2.3)$$

где Q_0 – заряд, который присутствовал бы на электродах, если бы их разделял вакуум;

Q_d – заряд, обусловленный поляризацией диэлектрика.

Количественно явление поляризации оценивается относительной диэлектрической проницаемостью:

$$E_\tau = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0}. \quad (2.4)$$

Как видно из (2.4), относительная диэлектрическая проницаемость любого вещества больше единицы и равна единице только для вакуума. Абсолютное значение диэлектрической проницаемости материала равно

$$E = E_{\tau} \cdot E_0, \quad (2.5)$$

где $E_0 = 10^{-9}/36 \cdot \pi$ – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м.

На основании вышеизложенного электрическую схему замещения реального диэлектрика можно представить, как показано на рис 2.2, а. Цепь C_0 обусловлена геометрическими размерами конденсатора (оборудования), если бы его изоляция представляла собой вакуум, и всеми видами упругой поляризации. Цепь $C_{абс}$ и $R_{абс}$ отражает все виды поляризации, связанные с потерями энергии. Цепь $R_{скв}$ отражает сквозную проводимость, обусловленную перемещением свободных носителей зарядов.

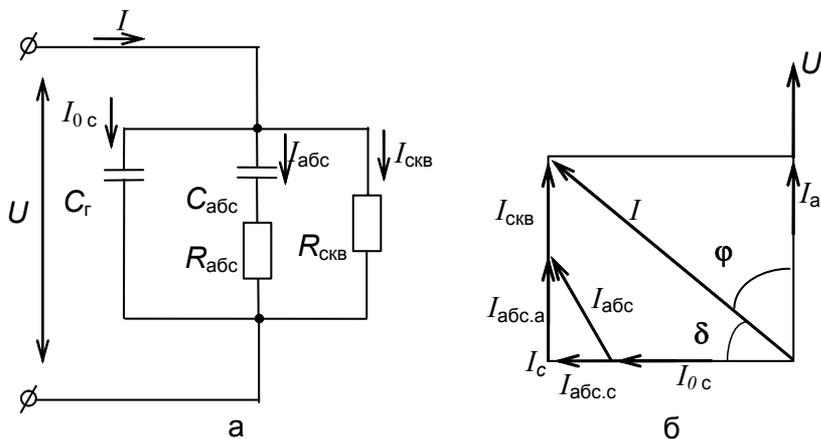


Рис. 2.2

Векторная диаграмма токов для данной схемы замещения приведена на рис. 2.2, б. Как видно, ток опережает напряжение на угол φ , дополняющий угол фазового сдвига между током и напряжением φ до 90° . Называется он углом диэлектрических потерь δ .

Суммарный ток, протекающий через диэлектрик, равен геометрической сумме токов:

$$\dot{I} = \dot{I}_{0c} + \dot{I}_{абс} + \dot{I}_{скв}, \quad (2.6)$$

где $I_{скв}$ – ток сквозной проводимости;

I_{0c} – ток, обусловленный геометрическими размерами конструкции и упругой поляризацией;

$I_{абс}$ – ток, обусловленный релаксационной поляризацией.

Числовое значение суммарного тока равно

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_c^2}, \quad (2.7)$$

где $I_a = I_{скв} + I_{абс.а}$ – активная составляющая тока;

$I_c = I_{0c} + I_{абс.с}$ – ёмкостная составляющая тока.

Используя известные выражения электротехники $\cos\varphi = I_a/I$ и $\text{tg}\delta = I_a/I_c$ и пренебрегая величинами второго порядка малости (например, $\text{tg}^2\delta \cong 0$) можно показать, что активная мощность, рассеиваемая в диэлектрике, равна

$$P_a = U \cdot I_a \cong U^2 \cdot \omega \cdot c \cdot \text{tg}\delta, \quad (2.8)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота;

c – эквивалентная ёмкость диэлектрика.

В процессе эксплуатации изоляция стареет. Следовательно, увеличиваются активная составляющая тока, $\text{tg}\delta$ и потери в диэлектриках. Увеличение $\text{tg}\delta$ свидетельствует об ухудшении изоляции по всему объёму. Поэтому измерение $\text{tg}\delta$ даёт возможность наиболее полно оценить состояние изоляции.

2.3. Описание лабораторной установки для измерения $\text{tg}\delta$

На практике измерение $\text{tg}\delta$ и ёмкости изоляции электрооборудования осуществляется с помощью мостов переменного тока Р-525, Р-5026 и других, выполненных по схеме Шеринга.

В данной работе используется мост типа Р-525.

Мостом называется электрическая схема, содержащая 4 ветви, соединённые, как показано на рис. 2.3. Ветви *АС*, *АД*, *ВС*, *ВД* называются плечами моста. Плечо *АД* представляет магазин сопротивлений R_3 (6 декад), а плечо *ВД* – магазин конденсаторов C_4 (5 декад) и постоянный резистор R_4 . Элементы мостовой схемы выполнены в одном корпусе и представляют собой прибор (мост) *Р-525*. Две другие ветви моста *АС* и *СВ* представляют соответственно исследуемую изоляцию (C_x, R_x) и образцовый конденсатор C_0 , ёмкостью 100 пФ, $U_p = 10\,000$ В.

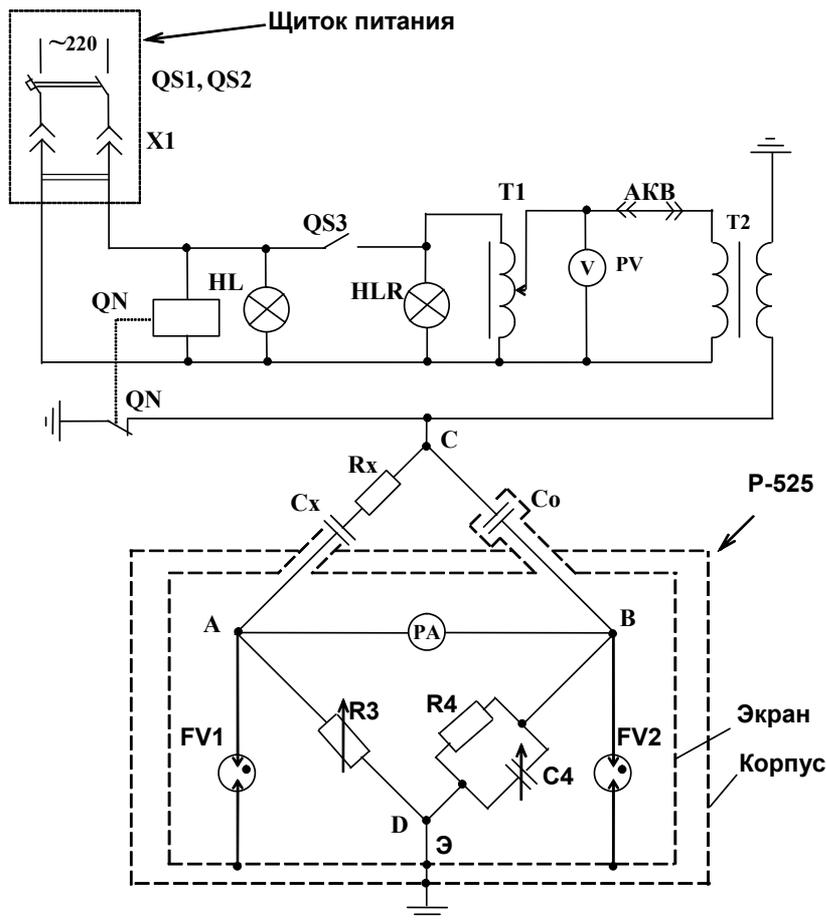


Рис. 2.3

Если в одну диагональ моста, например CD , подать напряжение, а во вторую диагональ AB включить индикатор напряжения (тока), то при определённом соотношении сопротивлений плеч моста разность потенциалов между точками A, B будет равна нулю.

Условие равновесия моста определяется уравнением

$$\dot{Z}_x \cdot \dot{Z}_4 = \dot{Z}_0 \cdot \dot{Z}_3, \quad (2.9)$$

где Z_x, Z_4, Z_0, Z_3 – полные сопротивления плеч моста.

Выполнив соответствующее преобразование и приравняв отдельно действительные и мнимые части равенства (2.9), получим:

$$R_x = R_3 \frac{C_4}{C_0}, \quad (2.10)$$

$$C_x = C_0 \frac{R_4}{R_3}. \quad (2.11)$$

Поскольку $\operatorname{tg} \delta$ плеча AC , как вытекает из схемы замещения диэлектрика, определяется выражением

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_x \cdot R_x, \quad (2.12)$$

то, подставив значения R_x и C_x в (2.12), получим:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega \cdot C_4 \cdot R_4, \quad (2.13)$$

Обычно R_4 принимают равным $10000/\pi$, а C_4 численно выражают в микрофарадах. Тогда при частоте 50 Гц ($\omega = 314$), $\operatorname{tg} \delta = C_4$.

Следовательно, шкалу магазина ёмкостей C_4 можно проградуировать в относительных единицах ($\operatorname{tg} \delta$). Ёмкость изоляции C_x может быть рассчитана по выражению

$$C_x = C_0 \frac{R_4}{R_3} \left(\frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} \right). \quad (2.14)$$

При значениях $\operatorname{tg} \delta \leq 0,03$ можно принять, что $C_x = C_0 \frac{R_4}{R_3}$.

Питание мостовой схемы осуществляется на напряжении 10 кВ независимо от номинального напряжения испытываемого электрооборудования. Поэтому лабораторная установка, приведенная на рис. 2.3, включает повышающий трансформатор Т2 типа НОМ-10 и регулировочный трансформатор Т1 типа ЛАТР-2, а также измерительные приборы, коммутационные, защитные аппараты и приборы сигнализации наличия напряжения. Лабораторная установка включает лабораторный стенд (стол) и испытательное поле, огражденное сеткой. На лабораторном столе установлены: мост переменного тока Р-525, вибрационный гальванометр РА с усилителем, регулировочный трансформатор Т1, вольтметр контроля регулируемого напряжения РV и лампа сигнализации наличия напряжения на стенде НLR. На испытательном поле размещены: высоковольтный трансформатор Т2, образцовый конденсатор C_0 , образец кабеля (C_x, R_x) длиной 1,5 м марки ААШУ-3х120, $U_n = 10$ кВ, автоматический заземлитель ОН вывода высокого напряжения трансформатора Т2. Входная дверь испытательного поля оборудована блокирующим разъемом АКВ и лампой сигнализации наличия напряжения НЛ. Автоматы включения питания QS1 и QS2 и штепсельный разъем X1 смонтированы на питающей щитке. Лабораторная установка выполнена стационарной в соответствии с рис. 2.3. Предусматривается только возможность переключения объекта измерения (кабеля) для измерения $\text{tg}\delta$ междуфазной или поясной изоляции. Конструкция кабеля и его эквивалентная схема замещения приведены соответственно на рис. 2.4, а, б, где 1 – поливинилхлоридный шланг; 2 – защитная алюминиевая оболочка; 3 – поясная изоляция; 4 – изоляция жил (междуфазная изоляция); 5 – алюминиевая жила.

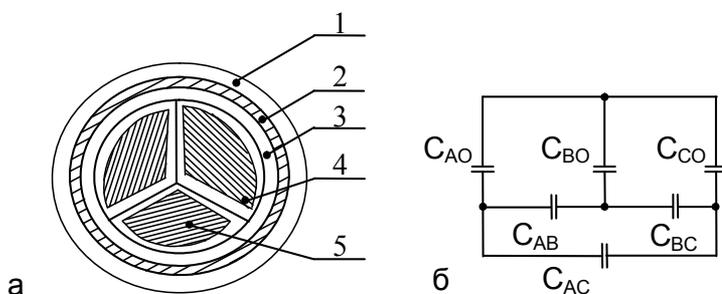


Рис. 2.4

2.4. Методика выполнения работы

Лабораторная работа выполняется на высоком напряжении (до 10 кВ). В этой связи необходимо соблюдать правила техники безопасности при работе на высоковольтных установках.

После изучения теоретической части работы перед ее выполнением необходимо убедиться, что на установке отсутствует напряжение (штыревой разъем Х1 на щитке питания разомкнут) и высоковольтный вывод испытательного трансформатора Т2 заземлен ножом автоматического заземлителя QN. После этого войти на испытательное поле, ознакомиться с размещением элементов установки и проверить соответствие ее схемы, той, что на рис. 2.3.

Далее работу выполнять в следующей очередности:

1. Проверить, что провод от высоковольтного вывода испытательного трансформатора Т2 подключен к выводу ВП образцового конденсатора и к одной жиле исследуемого кабеля. Две другие жилы должны быть соединены между собой и заземлены. Провод, подключенный к оболочке кабеля, должен быть другим концом присоединен к выводу А моста. Провод с вывода НП образцового конденсатора должен быть подключен к выводу В моста.

2. Выйти с испытательного поля, закрыть дверь и установить вилку в разъем АКВ двери.

3. Проверить, что точка Э моста заземлена. Проверить, что декады сопротивлений R_3 и емкости C_4 установлены в нулевое положение; что в нулевое положение установлена ручка усиления усилителя гальванометра; что регулировочный автотрансформатор выведен; что вилки шнуров питания моста, усилителя и освещения гальванометра включены в розетки питания, а выключатель QS3 на стенде отключен.

4. Установить в розетку вилку штыревого разъема Х1 на щитке питания. Включить оба автоматических выключателя на щитке питания QS1, QS2. При этом загорится сигнальная лампа HL и отключится нож автоматического заземлителя QN.

5. Включить выключатель QS3 на лабораторном стенде. При этом загорится лампа HLR стенда. Установить автотрансформатором напряжение 3 кВ и поворотом ручки усиления усилителя добиться, чтобы световая полоса на вибрационном гальванометре занимала 20 – 30 делений шкалы.

6. Провести уравнивание моста, регулируя сопротивление R_3 вращением рукояток декад (в пределах 700 – 1000 Ом) до минимального схождения луча. После этого регулируя емкость C_4 вращением рукояток декад (в пределах 0,03 – 0,08) и увеличивая усиление усилителя, добиться схождения луча в возможно меньшую полосу. Записать положение рукояток декад R_3 и C_4 в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Испытательное напряжение, кВ	3	4	5	6	7
R_3 , Ом					
$tg\delta$					

7. Уменьшить испытательное напряжение до нуля, перевести ручку усиления усилителя в минимальное положение и, установив следующее значение испытательного напряжения согласно табл. 2.1, снова уравновесить мост, как описано в позиции 6, и т.д.

8. По окончании измерений уменьшить до нуля испытательное напряжение, отключить выключатели QS1, QS2 на щитке питания, вытащить вилку штыревого разъема X1, отключить выключатель QS3 на лабораторном стенде. Вытащить вилку штыревого разъема АКВ на двери камеры. Проверить, что нож автоматического заземлителя QN включен, и войти в камеру. Пересоединить провод, подключенный к оболочке кабеля, на одну из соединенных вместе жил. Оставшуюся свободной жилу соединить с оболочкой кабеля и заземлить.

9. Закрыть дверь огражденной камеры, установить вилки разъемов АКВ и X1, включить автоматы щитка питания QS1, QS2. Включить выключатель QS3, установить автотрансформатором напряжение 5 кВ и уравновесить мост, как это описано в пункте 6. Записать значение R_3 и $tg\delta$ в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Вид изоляции	$U_{исп}$, кВ	R_3 , Ом	$tg\delta$	C_x , пФ	P_a , Вт	$P_{уд}$, Вт/кМ
Междуфазная	5					
Фазная	5					

10. Уменьшить до нуля испытательное напряжение, отключить установку, как описано в пункте 8. По результатам измерений построить зависимость $\operatorname{tg} \delta = f(U)$. Рассчитать диэлектрические потери в кабеле и удельные потери, считая, что кабель симметричный, т.е. что $C_{AO} = C_{BO} = C_{CO}$; $C_{AB} = C_{CB} = C_{BC}$.

2.5. Содержание отчета

В отчете должны быть приведены: наименование работы и ее цель; схема испытательной установки; результаты испытаний в виде таблиц; графическая зависимость $\operatorname{tg} \delta = f(U)$.

2.6. Контрольные вопросы

1. Какие процессы протекают в диэлектрике, находящемся в электромагнитном поле?
2. Как определяется относительная диэлектрическая проницаемость диэлектриков и как она зависит от температуры?
3. Что понимают под тангенсом угла диэлектрических потерь?
4. Как определяются и от чего зависят потери мощности в изоляции?
5. Как контролируется состояние изоляции электрооборудования?

Литература: [1], с. 169 – 172;
[2], с. 16 – 56.

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ОБЪЕМНОГО И УДЕЛЬНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучение методов определения удельного объемного и удельного поверхностного электрических сопротивлений диэлектриков и опытное исследование электропроводности характерных твердых электроизоляционных материалов.

3.1. Задание на подготовку

Ознакомиться с теоретическими сведениями, приведенными в настоящей работе.

3.2. Краткие теоретические сведения

В практической электротехнике диэлектрики применяются в качестве электрической изоляции токоведущих элементов. "Идеальная" изоляция должна иметь бесконечное электрическое сопротивление или нулевую электрическую проводимость. Технические диэлектрики обеспечивают, однако, конечное, хотя и очень большое электрическое сопротивление изоляции (обычно порядка МОм). Сопротивление любой изоляционной конструкции определяется материалом, размерами и условиями, при которых производится измерения. Поэтому методы и условия измерения сопротивлений нормированы ГОСТ 6433.2-71.

При постоянном напряжении установившийся ток протекает в объеме и по поверхности диэлектрика (рис. 3.1). Различают объемное (R_V) и поверхностное (R_S) сопротивления исследуемого образца:

$$I_{\Sigma} = I_V + I_S = U/R_V + U/R_S .$$

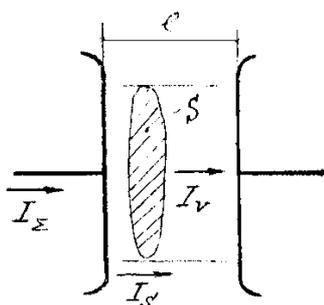


Рис. 3.1

Объемное сопротивление зависит от материала и размеров конструкции. Удельное объемное сопротивление ρ_v и удельная объемная проводимость $\gamma_v = 1/\rho_v$ характеризуют собственно материал и явля-

ются его параметрами. В системе СИ удельное объемное сопротивление численно равно сопротивлению куба материала с ребром, равным 1 м, если ток протекает между противоположными гранями куба. Параметр ρ_v относится к определенной температуре, например 293 К, и ограниченной напряженности электрического поля.

Для плоского образца в однородном поле $R_v = \rho_v l/S$ и $\rho_v = R_v S/l$, Ом · м ($\rho_v = R_v$ при $S = 1 \text{ м}^2$ и $l = 1 \text{ м}$); $\gamma_v = 1/\rho_v$, Ом/м. Удельные объемные сопротивления твердых диэлектриков лежат в пределах $10^8 - 10^{16}$ Ом · м.

Температурная зависимость ρ_v в пределах температур, встречающихся на практике, может быть записана в виде $\rho_{vT} = \rho_{vT_0} \exp[-\alpha(T - T_0)]$, т.е. с повышением температуры ρ_{vT} уменьшается по экспоненциальному закону; ρ_{vT_0} – удельное объемное сопротивление при начальной температуре T_0 , α – температурный коэффициент, зависящий от вида материала.

Поверхностное сопротивление R_s зависит от материала, состояния и размеров поверхности, по которой протекает ток. Удельное поверхностное сопротивление ρ_s (Ом) равно сопротивлению правильного квадрата диэлектрика, если ток протекает между противоположными сторонами квадрата. В поле вдоль поверхности между параллельными электродами протяженностью a , отстоящими друг от друга на расстоянии l (рис. 3.1) $R_s = \rho_s l/a$ и $\rho_s = R_s$ при $l = a$; $\gamma_s = 1/\rho_s$, см.

Поверхностная проводимость обусловлена в основном присутствием влаги на поверхности диэлектрика. Однако поскольку сопротивление адсорбированной пленки влаги связано с природой материала, то поверхностную проводимость при нормированных условиях рассматривают как свойство самого диэлектрика. Удельная поверхностная электрическая проводимость тем ниже, чем меньше полярность диэлектрика и влажность окружающего воздуха, чем чище поверхность материала и чем лучше она отполирована.

Параметры ρ_v и ρ_s (γ_v и γ_s) относятся к установившемуся значению постоянного тока. Физически прохождение этого тока обусловлено перемещением свободных зарядов (ионов, электронов). У диэлектриков при обычных условиях (ограниченной температуре и напряженности электрического поля), ток этот весьма мал и назы-

вается сквозным током утечки ($I_{\text{СКВ}}$). При включении образца под напряжение или при меняющемся во времени напряжении возникают абсорбционные токи ($I_{\text{абс}}$), обусловленные смещением связанных зарядов. Поэтому при определении ρ_v и ρ_s необходимо исключить абсорбционные токи и производить измерения спустя некоторое время (например, 1 мин.) после включения образца под напряжение.

3.3. Методы определения удельных сопротивлений диэлектриков

Измерение ρ_v и ρ_s диэлектрических материалов сводится к измерению R_v и R_s образцов заведомо известных размеров. Измеряются токи $I = U/R$ при заданном напряжении U . Так как U при измерениях невелико (100 – 1000 В), а R образцов электроизоляционных материалов большие (МОм, ТОм), то измеряемые токи малы и необходимо использовать высокочувствительные приборы.

Удельное объемное электрическое сопротивление порядка $10^8 - 10^{16}$ Ом · м широко применяемых электроизоляционных материалов определяется в лабораторных условиях с помощью зеркального гальванометра одним из следующих методов: непосредственного отклонения, заряда конденсатора, методом сравнения. В данной работе применяется метод непосредственного отклонения,

Схема измерительной установки (рис. 3.2) включает: универсальный регулируемый источник постоянного тока (УИП); переключатель SB1 для изменения полярности приложенного к образцу напряжения; образцовый и защитный резистор R1 сопротивлением 10^6 Ом, необходимый для градуировки гальванометра РА, а также для ограничения тока в цепи при КЗ на образце; переключатель SB2 для подачи напряжения на образец; зажимы К, Л, Э для подключения испытуемого образца R_x ; гальванометр РА, переключатель шунта S для расширения пределов измерения гальванометра (n изменяется в пределах $1 - 10^4$).

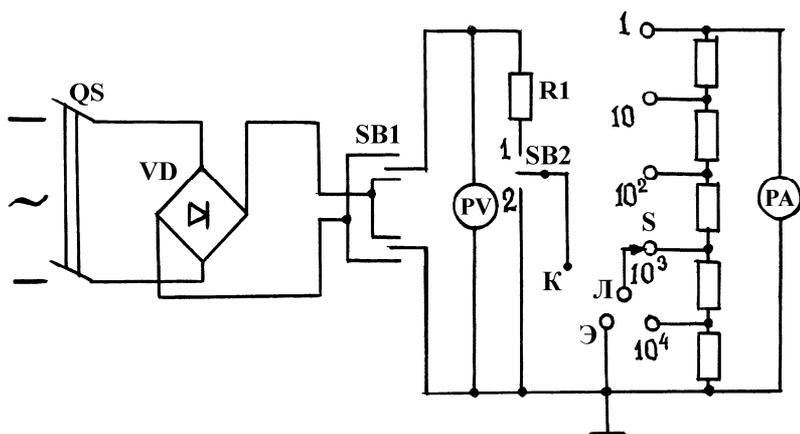


Рис. 3.2

Чтобы разделить протекающие по образцу объемный ток I_v и поверхностный ток I_s , применяют систему из трех электродов.

При измерении I_v образец включается по схеме, показанной на рис. 3.3, а. В этом случае через измерительную систему протекает только ток I_v , а ток I_s отводится с помощью охранного электрода, не регистрируется гальванометром, поэтому не влияет на результат измерения.

При измерении I_s используется тот же образец, только включается он по схеме, изображенной на рис. 3.3, б. В этой схеме роль охранного электрода выполняет нижний электрод Э, который отводит протекающий по объему образца ток I_v от измерительной системы. Измеряется только ток, протекающий по поверхности образца, заключенной между электродами К и Л.

Если сопротивление образца превосходит 10^{12} Ом, то метод непосредственного отклонения гальванометра оказывается неприемлемым, так как протекающий ток становится настолько мал, что измерить его гальванометром, даже очень чувствительным, невозможно. В этом случае применяют электронные измерительные приборы – тераомметры, в которых протекающий через образец ток I_v или I_s усиливаются до необходимой величины, достаточной для регистрации.

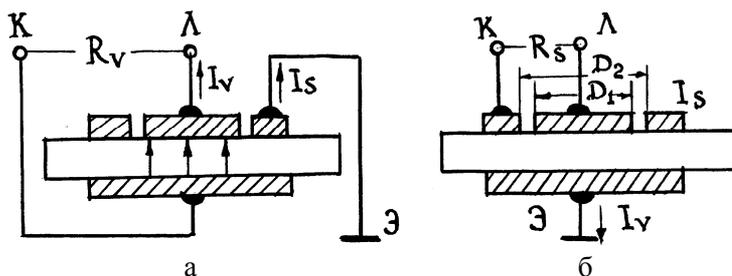


Рис. 3.3

В данной работе необходимо определить удельные электрически сопротивления ρ_v и ρ_s предложенных преподавателем образцов методом непосредственного отклонения и с помощью тераомметра.

1. Проверить отсутствие тока утечки в схеме (см. рис. 3.2), для чего включить выключатель QS и установить величину напряжения 100 В. Переключатель SB2 перевести в положение 1. Наблюдая за показанием гальванометра, перевести переключатель шунта S из положения 10^4 в положение 1. При отсутствии отклонения стрелки гальванометра переключателем изменить полярность напряжения. Если стрелка гальванометра не отклоняется – значит схема исправна и ток утечки отсутствует.

Отключить схему.

2. Определить чувствительность (цену деления) C_d гальванометра, для чего соединить зажимы К и Л накоротко. Включить установку и подать напряжение 100 В. Переключатель SB2 установить в положение 1. Наблюдая за показанием гальванометра, перевести переключатель шунта S из положения 10^4 в такое положение, при котором стрелка гальванометра отклонится на 10 – 25 делений (дел.). Записать коэффициент шунта и число делений, на которое отклонилась стрелка гальванометра. Переключателем SB1 изменить направление тока и снова произвести отсчет показания гальванометра.

Отключить схему.

Чувствительность или динамическая постоянная гальванометра рассчитывается по формуле

$$C_d = \frac{U}{n\alpha_{cp}R_1}, \text{ А/дел.}$$

где U – приложенное напряжение (100 В);

R_I – образцовый резистор, равный 10^6 Ом;

n – коэффициент шунта;

$\alpha_{\text{ср}}$ – среднее из двух отсчетов показаний гальванометра в делениях шкалы.

3. Определить удельное объемное сопротивление заданных образцов, для чего один из образцов включить в схему согласно рис. 3.3, а. Подать напряжение 100 В и произвести отсчет показания гальванометра $\alpha_{\text{ср}}$ и коэффициента шунта n . Результаты измерений занести в табл. 3.1.

Примечание. Отсчет показания гальванометра производится через минуту после подачи напряжения на образец.

Значения I_V , R_V , ρ_V рассчитать по формулам

$$I_V = C_d n \alpha_{\text{ср}}; \quad R_V = U / I_V; \quad \rho_V = \frac{US}{C_d n \alpha_{\text{ср}} h}.$$

Таблица 3.1

Наименование материала	n	$\alpha_{\text{ср}}$, дел.	I_V , А	R_V , МОм	ρ_V , Ом·м	h , м

где S – площадь электрода, $S = \frac{\pi D_1^2}{4}$, а h – толщина образца.

Примечание. При смене образцов схему каждый раз необходимо отключать и приводить в исходное состояние.

4. Определить поверхностное сопротивление заданных образцов, для чего образцы поочередно включать в схему согласно рис. 3.3, б и производить отсчет n и $\alpha_{\text{ср}}$ при напряжений 100 В. Результаты измерений занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Наименование материала	n	$\alpha_{\text{ср}}$, дел.	I_s , А	R_s , МОм	ρ_s , Ом·м	h , м

Значения I_s , R_s , ρ_s рассчитать по формулам

$$I_s = C_d n \alpha_{\text{ср}}; \quad R_s = U / I_s; \quad \rho_s = \frac{2\pi U}{C_d n \alpha_{\text{ср}} \ln \frac{D_2}{D_1}}.$$

где D_1 – диаметр электрода Л, равный 5 Ом, а D_2 – внутренний диаметр электрода К, равный 5,4 см.

5. Снять зависимость I_v от величины приложенного напряжения для одного из образцов. Результаты измерений и расчетов I_v и R_v занести в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Величина напряжения, В	n	$\alpha_{\text{ср}}$, дел.	I_v , А	R_v , МОм
0 – 400				

6. Измерить R_v и R_s заданных образцов с помощью тераомметра Е6-13А и результаты записать в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Наименование материала	R_v , МОм	R_s , МОм	ρ_v , Ом·м	ρ_s , Ом·м

Значения ρ_v и ρ_s рассчитать по формулам

$$\rho_v = R_v \frac{S}{h}; \quad \rho_s = \frac{2\pi R_s}{\ln \frac{D_2}{D_1}}.$$

и внести в табл. 3.4.

Примечание. Инструкция по измерению сопротивления с помощью тераомметра прилагается к работе.

3.4. Содержание отчета

1. Принципиальная схема установки для измерения электрических сопротивлений по методу непосредственного отклонения гальванометра (см. рис. 3.2).
2. Схемы включения плоского образца для измерения ρ_v и ρ_s (см. рис. 3.3).
3. Результаты измерений и расчетов в виде табл. 3.1 – 3.4.
4. Графическое изображение зависимостей

$$I_v = f(U); \quad R_v = f(U).$$

5. Расчетные формулы и примеры расчетов.
6. Критическая оценка полученных величин ρ_v и ρ_s и сопоставление их с данными литературы.
7. Краткие сведения об испытанных электроизоляционных материалах.

3.5. Контрольные вопросы

1. Поясните работу схемы (см. рис. 3.2) и методику определения ρ_v и ρ_s .
2. Объясните физическую природу электропроводности газообразных жидких и твердых электроизоляционных материалов.
3. Чем вызвана поверхностная электропроводность твердых электроизоляционных материалов?
4. Почему удельная электрическая проводимость диэлектриков увеличивается с ростом температуры?
5. Справедлив ли закон Ома для электроизоляционных материалов?
6. От каких факторов зависит величина ρ_v и ρ_s диэлектриков?
7. Почему ρ_v и ρ_s измеряют при постоянном напряжении?
8. Как повлияет отсутствие охранного электрода на результаты измерений?

Литература: [2], с. 30 – 43.

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучение физических и электрических характеристик жидких диэлектриков.

4.1. Задание на подготовку

1. Ознакомиться с методикой и аппаратурой для снятия некоторых характеристик жидких диэлектриков.
2. Ознакомиться с основными характеристиками жидких диэлектриков: вязкостью, плотностью, температурой вспышки, электрической прочностью, удельным объёмным и поверхностным сопротивлением трансформаторного масла.
3. Ознакомиться с правилами безопасности при работе на данной установке.

4.2. Краткие теоретические сведения

В электроаппаратостроении, в кабельной и изоляционной технике находят широкое применение жидкие диэлектрики – минеральные (нефтяные) масла и синтетические жидкости.

Жидкие диэлектрики, проникая в поры волокнистых изоляционных материалов, в полости между твердыми изоляционными элементами, заполняя промежутки между проводами обмоток и между обмотками или токоведущими частями и баком (корпусом) аппаратов, значительно повышают электрическую прочность изоляции. Кроме того, они улучшают отвод теплоты от нагретых частей.

В высоковольтной коммутационной аппаратуре жидкие диэлектрики используются также в качестве дугогасительной среды. В этих аппаратах разрыв токовой цепи происходит в среде жидкого диэлектрика. Возникающая при этом электрическая дуга разлагает жидкий диэлектрик. В области горения дуги повышается давление. В результате этого возникает движение жидкости и газа, что способствует охлаждению канала дуги и быстрому ее гашению.

Из минеральных жидких диэлектриков наибольшее применение получили трансформаторное, конденсаторное и кабельное масла, которые получают путем ступенчатой переработки нефти и представляют собой смеси жидких углеводородов предельного ряда: метановых, нафтеновых и ароматических. После выделения из нефти эти масла проходят тщательную очистку от химически нестойких примесей путем обработки серной кислотой, щелочью, промывки водой и сушки. Кроме того, они могут дополнительно обрабатываться адсорбентами, которые поглощают воду и различные полярные примеси.

Минеральные масла сравнительно дешевле и могут производиться в больших количествах. При высокой степени очистки они обладают достаточно высокими электрическими характеристиками.

Наиболее широкое применение получило трансформаторное масло. Оно используется в силовых и измерительных трансформаторах, реакторах, высоковольтных выключателях, в маслonaполненных вводах, реостатах. Для его получения используются нефтяные масла с большим содержанием нафтенов, так как они более стойки к окислению.

Кабельное и конденсаторное масла содержат углеводороды ароматического ряда. Поэтому они имеют большую электрическую прочность и применяются для пропитки бумажной изоляции силовых конденсаторов и кабелей, а также для маслonaполненных кабелей напряжением 110...500 кВ, однако менее стойки к окислению.

В процессе работы происходит загрязнение и старение масла. Так, в масле, используемом в трансформаторах и высоковольтных аппаратах, появляются инородные включения: остатки твердой и волокнистой изоляции, частицы копоти, газовые примеси и вода. Под воздействием электрического поля, света, кислорода, озона, повышенной температуры, при соприкосновении с некоторыми металлами скорость старения и окисления возрастает.

Загрязнение и окисление влияют на основные параметры и характеристики масла, такие как проводимость, диэлектрические потери, электрическая прочность и другие. Основные физико-химические и электрические параметры масел нормируются ГОСТ-982-80.

Электроизоляционные масла нефтяного происхождения обладают преимуществами, которые обеспечили им широкое применение: они недороги, при хорошей очистке имеют низкое значение $\text{tg}\delta$, достаточно высокую электрическую прочность.

Главным же недостатком жидких диэлектриков минерального происхождения является их пожаро- и взрывоопасность. Кроме того, часто для пропитки конденсаторов в целях увеличения емкости в данных габаритных размерах конденсатора желательно иметь полярный жидкий диэлектрик с более высоким, чем у неполярных нефтяных масел, значением ϵ_r .

Поэтому в тех случаях, когда требуется высокая пожаро- и взрывобезопасность и лучшие характеристики используются синтетические жидкие диэлектрики. Наиболее распространенные из них – это хлорированные углеводороды, кремнийорганические и фторорганические жидкости.

Хлорированные углеводороды (хлорированные дефинилы) получают из различных углеводородов путем замены в их молекулах некоторых (или всех) атомов водорода атомами хлора. Общая формула их $C_{12}H_{10-n}Cl_n$. Показатель n может изменяться у них от 3 до 6. При $n = 5$ получается пентахлордифенил – $C_{12}H_5Cl_5$. Эта жидкость получила название – совол. Совол имеет повышенный ϵ_r , зависимый от температуры. Это обусловило применение совола для пропитки конденсаторной изоляции. Однако эта жидкость сильно токсична, что ограничивает ее использование. Совол обладает большой вязкостью. Для ее снижения добавляют трихлорбензол – $C_6H_3Cl_3$. Жидкость, имеющая состав 90% совола и 10% трихлорбензола, называется совтол. Гексол – 20% совола и 80% гексахлорбутадина (C_4Cl_6), – имеет еще меньшую вязкость.

Кремнийорганические жидкости обладают малыми потерями, низкой гигроскопичностью и повышенной нагревостойкостью. В зависимости от характера радикалов, присоединенных к атомам Si, различают полиметилсилоксановые (ПМС), полиэтилсилоксановые (ПЭС), полифенилсилоксановые (ПФС) и другие кремнийорганические жидкости.

Фторорганические жидкости имеют малые потери, малую гигроскопичность, высокую нагревостойкость, негорючесть и высокую дугостойкость. Некоторые фторорганические жидкости могут длительно работать при температуре 200°C и выше. Характерными свойствами этих жидкостей являются малая вязкость, низкое поверхностное натяжение (что благоприятствует пропитке пористой изоляции), высокий температурный коэффициент объемного расширения, срав-

нительно высокая летучесть. Поэтому требуется герметизация аппаратов, заливаемых фторорганическими жидкостями. Эти жидкости способны обеспечивать более интенсивный отвод теплоты от охлаждаемых ими обмоток и магнитопроводов, чем нефтяные масла или кремнийорганические жидкости. В некоторых конструкциях, залитых фторорганическими жидкостями, для улучшения отвода теплоты используется испарение жидкости с последующей конденсацией ее в охладителе и возвратом в устройство (кипящая изоляция); при этом теплота испарения отнимается от охлаждаемых обмоток, а наличие в пространстве над жидкостью фторорганических паров, в особенности под повышенным давлением, значительно увеличивает электрическую прочность газовой среды в аппарате. Как и кремнийорганические, фторорганические жидкости дороги.

В качестве жидких диэлектриков могут использоваться и другие полярные электроизоляционные жидкости: нитробензол ($\text{H}_5\text{C}_6\text{NO}_2$), этиленгликоль ($\text{HO} - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{OH}$), цианоэтилсахароза ($\text{C}_{38}\text{H}_{46}\text{N}_8\text{O}_{11}$). Они имеют высокую диэлектрическую проницаемость: $\epsilon_r = 35 \dots 39$.

Применяются также синтетические жидкости углеводородного ряда. Эти неполярные жидкие диэлектрики в некоторых случаях обладают более ценными свойствами (электрическая прочность, стойкость к тепловому старению, газостойкость) по сравнению с нефтяными маслами. К ним относятся такие жидкости, как полиизобутиленоктол (смесь полимеров изобутилена и его изомеров, имеющих общий состав C_4H_8), получаемые из газообразных продуктов крекинга нефти.

4.3. Основные параметры жидких диэлектриков и методика их определения

К основным характеристикам жидких диэлектриков относятся следующие: плотность, вязкость, температура вспышки, электрическая прочность, допустимая рабочая температура, относительная диэлектрическая проницаемость, объемное удельное сопротивление, кислотное число, температура застывания, тангенс угла диэлектрических потерь ($\text{tg}\delta$), критическая температура плавленности льда (основные характеристики различных жидких диэлектриков приведены в табл. 4.1).

Таблица 4.1

Основные показатели качества трансформаторного масла

№ п/п	Показатели качества масла	Свежее масло перед заливкой			
		ГОСТ-982-68	ГОСТ-10121-76	ТУ 38-1-182-68	ТУ-38-1-239-69
1	Минимальное пробивное напряжение, кВ (действующее значение), определенное в стандартном сосуде для трансформаторов напряжением до:				
	15 кВ	30	30	30	-
	35 кВ	35	35	35	-
	220 кВ	45	45	45	45
2	Содержание механических примесей	отсутствуют (визуально)			
3	Содержание взвешенного угла	-	-	-	-
4	Кислотное число не более 1 мг КОН на 1 г масла	0,02	0,02	0,03	0,01
5	Реакция водной вытяжки (водорастворимые низкомолекулярные кислоты)	нейтральная			
6	Температура вспышки, °С, не ниже	135	150	135	135
7	Вязкость кинематическая $1 \cdot 10^6$ м ² /с, не более при:				
	20 °С	-	28	30	-
	50 °С	9,0	9,0	9,0	9,0
8	Температура застывания, °С, не выше	-45	-45	-45	-53
9	Прозрачность при +5 °С	прозрачное			
10	Тангенс угла диэлектрических потерь, %, не более при:				
	20 °С	0,2	0,2	0,05	-
	70 °С	1,5	2,0	0,7	0,3
	90 °С	-	--	1,5	0,5

Плотность жидкости влияет на скорость взвешенных в ней частиц. Для измерения плотности используют ареометр – прибор, действующий на основе закона Архимеда.

Вязкость влияет на процесс теплообмена в электрических аппаратах. С увеличением вязкости ухудшается процесс циркуляции жидкости, например масла в трансформаторе, а следовательно, ухудшается охлаждение обмоток и сердечника. В высоковольтных выключателях увеличение вязкости приводит к уменьшению скорости расхождения контактов, что может привести к затяжному горению дуги и взрыву выключателя.

Имеется несколько способов оценки вязкости.

Динамической вязкостью называется величина, равная отношению силы внутреннего трения, действующей на поверхность слоя жидкости, к площади этого слоя при градиенте скорости, равном единице. Единицей динамической вязкости является паскаль-секунда (Па·с). 1 Па·с – динамическая вязкость такой жидкости, в которой 1 м² слоя испытывает силу 1 Н при градиенте скорости $1 \frac{\text{м/с}}{\text{м}}$.

Кинематической вязкостью называется величина, равная отношению динамической вязкости к ее плотности. В системе СИ она измеряется в м²/с. В системе СГС она измеряется в стоксах, $1 \text{ м}^2/\text{с} = 10^4 \text{ Ст}$.

Динамическая и кинематическая вязкость измеряется с помощью шариковых капиллярных или ротационных вискозиметров.

Часто находят условную вязкость (ВУ) по Энглери. Вязкость по Энглери определяется как отношение времени истечения через калиброванное отверстие 200 см³ испытуемой жидкости ко времени истечения того же количества воды при температуре 20 °С. Условная вязкость выражается в градусах Энглера (Э°).

Универсальный вискозиметр Энглера для определения условной вязкости состоит из латунного полированного стакана для заливки испытуемой жидкости с внутренним диаметром 106 мм. Стакан находится внутри сосуда, служащего водяной или масляной баней. Крышка сосуда имеет два отверстия: для термометра, который измеряет температуру жидкости, и для штепселя, которым закрывается выпускное сопло – цилиндрический канал из платины или нержавеющей стали с полированной внутренней поверхностью. Внутренний диаметр сопла 2,8 мм.

Испытуемая жидкость заливается в стакан в таком количестве, чтобы ее уровень одновременно касался трех острий (это необходимо для горизонтальной установки прибора). Жидкость в бане подогревается электронагревателем и перемешивается мешалкой, температура бани измеряется отдельным термометром, укрепленным на зажиме. Под сопло вискозиметра подставляется мерная колба, имеющая метку, соответствующую емкости 200 см³.

Температурой вспышки называют температуру жидкости, при которой смесь паров с воздухом воспламеняется при поднесении к ней небольшого пламени. Нормирование этого параметра необходимо в связи с возможностью взрыва нагретой смеси паров и продуктов разложения, например паров масла в воздушной подушке масляного выключателя при гашении дуги.

Снижение температуры вспышки указывает на разложение масла и появление в нем мелких углеводородистых фракций.

Для определения температуры вспышки используют прибор Мартенса – Пенского. Прибор представляет собой металлический сосуд с крышкой, имеющей две части: нижнюю неподвижную и верхнюю подвижную, которую можно поворачивать на некоторый угол посредством устройства, закрепленного на крышке.

При повороте подвижной крышки к открывающейся поверхности жидкости наклоняется горелка, длина пламени которой устанавливается 3 мм. В подвижной части крышки предусмотрено гнездо для термометра, а в центре ее проходит стержень мешалки. Мешалка имеет две пары лопастей для перемешивания жидкости и смеси паров жидкости и воздуха. Весь прибор помещен в баню, имеющую нагревательный элемент.

Электрическая прочность жидкости определяется средней напряженностью электрического поля, при которой происходит пробой диэлектрика. Испытание на пробой проводится в стандартном разряднике на установке АИМ-80, упрощенная схема которой приведена на рис. 4.1.

Аппарат АИМ-80 выполнен в виде настольной колонки, внутри которой размещены: регулировочный трансформатор Т1 с приводным двигателем, повышающий трансформатор 0,11/80 кВ Т2, стандартный разрядник FV, аппаратура защиты и управления.

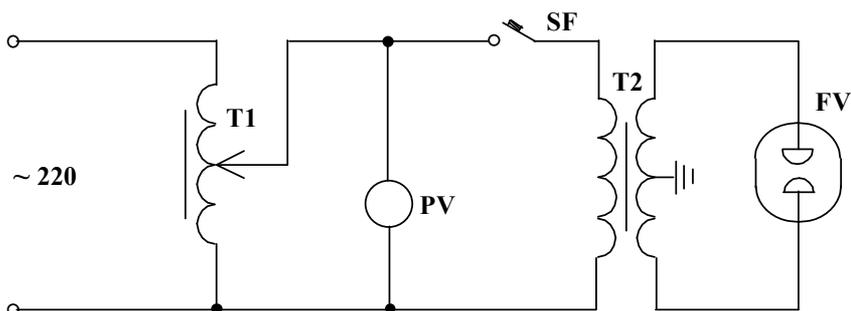


Рис. 4.1

Стандартный разрядник крепится на выводах обмотки 80 кВ трансформатора T2 и представляет собой фарфоровый сосуд емкостью 500 см^3 с закрепленными в стенках металлическими электродами в виде полусфер диаметром 25 мм. Расстояние между электродами 2,5 мм проверяется с помощью калибра.

На лицевой панели АИМ-80 размещены кнопки и тумблеры управления, а также измерительный вольтметр, отградуированный в кВ.

Удельное объемное сопротивление (ρ_v) жидких диэлектриков определяют на образцах (пробах) объемом не менее 50 см^3 , число проб – не менее двух. Испытуемую жидкость заливают в измерительную ячейку – специальный металлический сосуд с электродами, которые обычно изготавливаются из нержавеющей стали. Рабочие поверхности электродов должны иметь покрытие из никеля, хрома или серебра с гладкой поверхностью. Измерительная ячейка представляет собой трехэлектродную систему. При плоских электродах высоковольтный электрод выполняется в виде тарелки с плоским дном. На бортики этого электрода опирается изоляционный элемент кольцевой формы. Это могут быть также отдельные опоры из изоляционного материала. Изоляционный элемент выполняется из плавленного кварца или фторпласта-4. На нем закреплен винтами охранный кольцевой электрод. Во внутреннюю выточку охрannого электрода входит изоляционное кольцо либо опоры, несущие центральный измерительный электрод. Все электроды снабжены зажимами для соединения с измерительной цепью. В центре измерительного электрода имеется гнездо для установки термометра. Зазор между измерительным и высоковольтным электродами должен

быть равен $(2 + 0,1)$ мм; зазор между измерительным и охранным электродами также $(2 + 0,1)$ мм. Уровень жидкости должен быть на 3 – 5 мм выше нижнего края охранный электрода. Перед измерениями ячейка должна быть тщательно промыта растворителем, затем водным раствором нейтрального моющего средства и в заключение – горячей дистиллированной водой. Особое внимание следует обратить на тщательность промывки прокладок.

Сушка производится при температуре 105 – 110 °С в течение 90 мин. Собранную ячейку присоединяют к измерительной цепи и проверяют чистоту прокладок путем измерения сопротивления пустой ячейки. Оно должно быть на один-два порядка выше сопротивления ячейки, заполненной испытуемой жидкостью. Если это требование не выполняется, ячейку следует разобрать и повторно промыть.

4.4. Методика и последовательность выполнения работы

4.4.1. Измерение плотности

Испытуемое масло необходимо налить осторожно по стенке в чистый и сухой стеклянный цилиндр и, измерив температуру, медленно опустить в него ареометр, держа за верхний конец. Ареометр установить в центре цилиндра и произвести отсчет показаний по верхнему краю мениска. Плотность масла при температуре 20°С определить по формуле

$$d_{20} = d_t + \gamma(t - 20), \quad (4.1)$$

где d_t – плотность масла при данной температуре t ;

$\gamma = 0,0007$ – средняя температурная поправка плотности;

t – температура, при которой производится измерение.

4.4.2. Определение условной вязкости

В вискозиметре Энглера закрыть штепселем сточное отверстие и налить в сосуд масло до острий. Закрыв сосуд крышкой, вставить в нее термометр и определить температуру масла. Установить под сточное отверстие мерную колбу. Приподняв штепель и пустив одновременно секундомер, отметить время наполнения колбы до метки.

Вязкость масла определяют по формуле

$$\Xi_0 = \frac{\tau}{\tau_B}, \quad (4.2)$$

где τ – время истечения 200 см³ масла;

$\tau_B = 51 - 52$ с – время истечения 200 см³ воды (постоянная вискозиметра).

4.4.3. Определение температуры вспышки

В сосуд прибора Мартенса – Пенского налить до соответствующей отметки испытываемое масло, установить крышку со всеми приспособлениями и включить подогрев. Скорость нагрева масла 2 °С в минуту. Периодически перемешивать масло мешалкой. Проверить фитилек горелки, наличие в нем масла и длину пламени. Горелку не зажигать, пока температура масла не достигнет 130 °С. При достижении температуры масла 130 °С зажечь горелку и проверять температуру вспышки через каждые 2 °С, для чего прекратить перемешивание и, повернув подвижную крышку, подвести горелку к поверхности масла. Отметить температуру масла, при которой произойдет вспышка.

4.4.4. Определение электрической прочности

Ознакомиться с устройством и электрической схемой аппарата АИМ-80. Промыть стандартный разрядник сухим чистым маслом. Подготовить пробу масла для испытаний.

Пробу испытываемого масла перед заливкой не встряхивать во избежание образования пузырьков воздуха. Слить немного масла, чтобы обмыть края сосуда, в котором содержится проба, а затем трижды ополоснуть электроды испытываемым маслом.

Залить в стандартный разрядник испытываемое масло на уровень не менее 15 мм выше электродов. Установить разрядник с маслом в аппарат на стойки. Дать маслу отстояться в течение 10 мин, чтобы из него вышли пузырьки воздуха. Следует помнить, что аппарат АИМ-80 является высоковольтной установкой (80 кВ). Поэтому перед выполнением работы необходимо убедиться:

- в надёжном заземлении корпуса аппарата;
- в отсутствии механических повреждений корпуса аппарата, измерительного прибора и сигнальных ламп, в исправности и надёжной фиксации (закрытия) откидной крышки люка стандартного разрядника.

Включать аппарат только с разрешения преподавателя.

Во время работы на аппарате необходимо: испытания проводить стоя на резиновом коврике, при этом другие члены бригады должны находиться от аппарата на расстоянии, исключающем прикосновение к корпусу АМИ-80.

Запрещается. Работать на незаземлённом и неисправном аппарате, открывать крышку люка стандартного разрядника при включенном аппарате, включать аппарат без разрешения преподавателя и оставлять без наблюдения включенный аппарат.

Последовательность операций при включении аппарата АМИ-80 изложены в инструкции на испытательном стенде.

Значение пробивного напряжения определяется по вольтметру на панели АМИ-80.

Для каждого образца масла произвести 6 пробоев с выдержкой 5 мин после каждого пробоя. За пробивное напряжение масла принять среднее арифметическое значение 5 последних пробоев (первое измерение в расчет не принимать).

Электрическая прочность масла равна

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр.ср}}}{2,5}, \text{ кВ/мм.} \quad (4.3)$$

4.4.5. Определение удельного объемного сопротивления ρ_v трансформаторного масла с помощью тераомметра Е6-13А

Измерение необходимо производить при температуре 20 °С или близкой к ней (т.е. при комнатной температуре), влажности 65 %, при этом необходимо пользоваться инструкцией по пользованию тераомметром.

Измерения необходимо проводить согласно инструкции по пользованию тераомметром типа Е6-13А.

Схема подключения измерительной ячейки к тераомметру приведена на рис. 4.2, где 1 – высоковольтный электрод; 2 – измерительный электрод; 3– охранный электрод; 4 – тераомметр

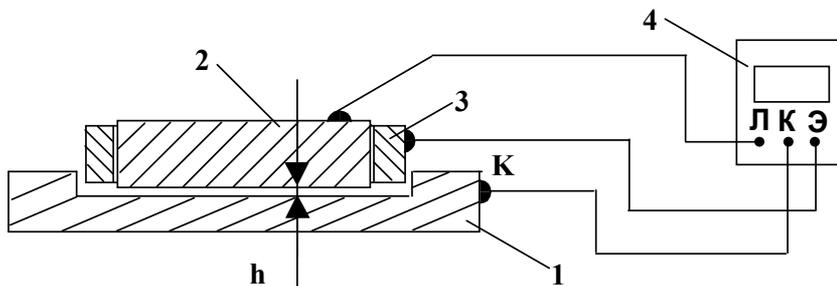


Рис. 4.2

Удельное объемное сопротивление масла определяется по формуле

$$\rho_v = \frac{R_v \cdot C_0}{E_0} = 11,3 \cdot 10^{10} C_0 R_v, \quad (4.4)$$

где R_v – показания тераомметра (Ом);

$E_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная;

C_0 – емкость незаполненной измерительной ячейки (Ф);

Значение C_0 определяется по выражению

$$C_0 = E_0 \frac{\pi(d_1 + g)^2}{4t}, \quad (4.5)$$

где $d_1 = 0,09$ м – диаметр измерительного электрода,

$g = 0,0004$ м – зазор между измерительным и охранным электродами;

$t = 0,002$ м – расстояние между измерительным и высоковольтным электродами.

4.5. Содержание отчета

1. Электрическая схема аппарата АИМ- 80.
2. Результаты испытаний: плотность, вязкость в ВУ, температура вспышки и электрическая прочность трансформаторного масла.
3. Сопоставление полученных результатов с литературными данными.
4. Заключение о том, удовлетворяет ли нормам ГОСТа и ПТЭ испытанное трансформаторное масло и пригодно ли оно к эксплуатации.

4.6. Контрольные вопросы

1. Опишите краткую технологию получения трансформаторного масла.
2. Назовите основные параметры трансформаторного масла и объясните, почему они нормируются.
3. Как осуществляется регенерация трансформаторного масла?
4. Как производится отбор проб масла из аппаратов для испытаний?
5. Какие факторы влияют на электрическую прочность трансформаторного масла?
6. Назовите другие виды жидких диэлектриков.
7. Что такое кипящая изоляция?

Литература. [2], с. 94 – 101.

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: определение электрической прочности газообразных и твердых диэлектриков в однородном и неоднородном электрическом поле.

5.1. Задание на подготовку

Ознакомиться с методикой определения электрической прочности диэлектриков и правилами техники безопасности при выполнении работы.

5.2. Краткие теоретические сведения

Образование в диэлектрике проводящего канала под действием электрического поля называется пробоем. Это явление может возникать как в однородном, так и неоднородном электрическом поле. Минимальное напряжение, приложенное к диэлектрику, при котором наступает пробой, называется пробивным напряжением. Электрической прочностью диэлектрика называется минимальное значение напряженности однородного электрического поля, при котором наступает пробой, т.е.

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{d}, \quad (5.1)$$

где $U_{\text{пр}}$ – минимальное значение пробивного напряжения,
 d – толщина диэлектрика в месте пробоя.

В международной системе единиц электрическая прочность выражается в МВ/м. Для практических расчетов чаще всего $E_{\text{пр}}$ выражается в кВ/мм.

Электрическая прочность является одним из основных параметров электроизоляционного материала, который используется при конструировании изоляции электрических машин, аппаратов и приборов, а также для оценки их надежности и долговечности. Проводящий канал в диэлектрике образуется в результате высокой интенсивности возникновения свободных носителей зарядов – свободных электронов и ионов. Свободные носители электрических зарядов могут образоваться не только в результате электрических процессов – ударной ионизации и фотоионизации, но и других энергетических воздействий, например высокой температуры, электрохимических процессов и других. Преобладание того или иного механизма развития разряда в диэлектрике и возникновение проводящего канала зависит от агрегатного состояния материала, наличия примесей и других факторов.

Для газообразных диэлектриков наиболее характерен электрический механизм пробоя – ударная ионизация и фотоионизация. В твердых и жидких диэлектриках существенное влияние на образование проводящего канала могут оказывать тепловые явления, хи-

мические реакции и наличие примесей. В зависимости от того, какие факторы играют важную роль в образовании проводящего канала, пробой диэлектриков принято подразделять на: электрический, тепловой и электрохимический.

5.3. Испытательная установка

Электрическая схема установки для определения электрической прочности воздуха и твердых диэлектриков представлена на рис. 5.1. Схема содержит регулировочный автотрансформатор T1 типа ЛАТР и повышающий трансформатор T2 типа НОМ-35.

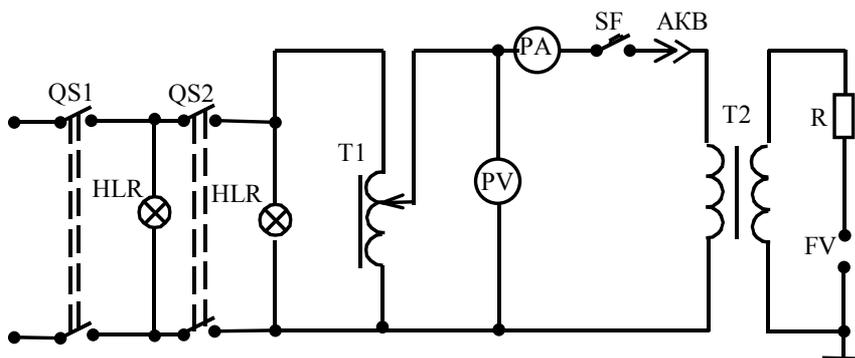


Рис. 5.1

Автотрансформатор обеспечивает плавное регулирование вторичного напряжения повышающего трансформатора T2 в пределах 0 – 35 кВ. В соответствии с ПТБ в схеме предусмотрены два коммутационных аппарата (рубильника): QS1 и QS2, обеспечивающие видимый разрыв питающей цепи 220 В, а также сигнальные лампы HLR, свидетельствующие о наличии напряжения при включении аппаратов QS1 и QS2 .

Для контроля величины пробивного напряжения и тока пробоя на стороне 220 В предусмотрены вольтметр PV и амперметр PA.

Автомат максимального тока SF обеспечивает автоматическое отключение трансформатора T2 при пробое исследуемого изоляционного промежутка FV. Резистор R предназначен для ограничения тока короткого замыкания при пробое.

Высоковольтная часть установки (Т2, R, FV) размещена на испытательном поле, которое отделено от низковольтного оборудования установки металлическим сетчатым ограждением. Входная дверь на испытательное поле имеет блокирующие контакты АКВ, обеспечивающие разрыв электрической цепи 220 В трансформатора Т2 в случае ошибочного открытия двери.

Заходить на испытательное поле для изменения величины разрядного промежутка FV или замены образцов изоляции разрешается только после отключения аппаратов QS1 и QS2 и наложения переносного заземления на высоковольтный вывод трансформатора Т2.

При выполнении лабораторной работы необходимо:

а) изучить инструкцию, ознакомиться с методикой выполнения работы и с оборудованием;

б) при отключенной и заземленной установке зайти на испытательное поле и установить: величину разрядного промежутка FV при определении электрической прочности воздуха; количество образцов при определении прочности твердых диэлектриков;

в) покинуть испытательное поле, закрыть дверь, включить блокировку АКВ, снять переносное заземление, включить аппараты QS1, QS2, включить автомат на щитке и автомат SF на пульте управления;

г) плавно повысить напряжение до наступления пробоя. Записать напряжение пробоя. Снизить напряжение ЛАТРом до нуля;

д) отключить автомат на щитке, отключить аппараты QS1, QS2, наложить заземление на высоковольтный вывод трансформатора Т2, зайти на испытательное поле и установить новое значение разрядного промежутка FV или установить новые образцы. В дальнейшем выполнить все операции согласно пункту «в» и «г»;

е) после выполнения всех опытов отключить установку и привести в порядок рабочее место.

5.4. Содержание и объем выполняемой работы

1. Снять зависимость $U_{пр} = f(d)$ для воздуха в однородном электрическом поле. Для создания однородного поля использовать шаровые электроды в разряднике. Пробивное напряжение определить для значений $d = 5, 10, 15$ мм. Для каждого пробивного промежутка определить три значения $U_{i пр}$, при этом $U_{1 ср} = (U_1' + U_1'' + U_1''')/3$,

где U_1 – напряжение пробоя на первичной стороне трансформатора Т2. Амплитудное значение пробивного напряжения на стороне 35 кВ определить по выражению

$$U_{\text{пр}\cdot m} = K \cdot \sqrt{2}U_{1\text{ср}}, \quad (5.2)$$

где $K = 35000/220$ – коэффициент трансформации трансформатора Т2.

Значения $E_{\text{пр}\cdot m}$ определить по выражению (5.1).

Результаты измерения и расчета занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Расстояние между электродами, мм	Напряжение на стороне 220 В				$U_{\text{пр}\cdot m}$, кВ	$E_{\text{пр}\cdot m}$, МВ/мм
	U'_1 , В	U''_1 , В	U'''_1 , В	$U_{1\text{ср}}$, В		
5						
10						
15						

2. Снять зависимость $U_{\text{пр}} = f(d)$ для воздуха в неоднородном электрическом поле для значений $d = 10, 20, 30, 40, 50$ мм. Для получения неоднородного поля шаровые электроды заменить на систему игла-плоскость. Методика измерений и расчетов такая, как и для однородного поля. Результаты измерений и расчетов занести в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Расстояние между электродами, мм	Напряжение на стороне 220 В				$U_{\text{пр}\cdot m}$, кВ	$E_{\text{пр}\cdot m}$, МВ/мм
	U'_1 , В	U''_1 , В	U'''_1 , В	$U_{1\text{ср}}$, В		
10						
20						
30						
40						
50						

3. Снять зависимость $U_{\text{пр}} = f(d)$ для пропитанного и непропитанного картона в однородном электрическом поле, для чего подключить плоские электроды ко вторичной обмотке трансформатора Т2. Пробивное напряжение определить для одного, двух и трех слоев картона. Для твердых и жидких диэлектриков электрическую прочность определяют по действующему значению пробивного напряжения. Поэтому $U_{\text{пр}} = K \cdot U_1$, а $E_{\text{пр}} = U_{\text{пр}}/d$, где $K = 35000 / 220$ – коэффициент трансформации; U_1 – пробивное напряжение на низкой стороне трансформатора Т2; $U_{\text{пр}}$ – пробивное напряжение на стороне 35 кВ трансформатора Т2; $d = n \cdot d_1$, n – число слоев картона, d_1 – толщина одного слоя.

Результаты измерений и расчета занести в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Значение параметров	Количество слоев					
	Непропитанный картон, n			Пропитанный картон, n		
	1	2	3	1	2	3
U_1 , В						
$U_{\text{пр}}$, кВ						
$E_{\text{пр}}$, МВ/м						

5.5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема установки.
3. Таблицы результатов испытаний (5.1; 5.2; 5.3).

Графическая зависимость $U_{\text{пр} m} = f(d)$ для воздуха в однородном и неоднородном поле на одном рисунке и зависимость $U_{\text{пр}} = f(d)$ для пропитанного и непропитанного картона – на другом.

5.6. Контрольные вопросы

1. Дать определение электрического пробоя и электрической прочности диэлектрика.
2. Объяснить механизм пробоя газообразных, жидких и твердых диэлектриков.

3. Почему электрическая прочность в однородном поле выше, чем в неоднородном?
4. Как зависит электрическая прочность газообразных диэлектриков от давления?
5. Почему пропитанные твердые диэлектрики обладают более высокой прочностью, чем непропитанные?
6. Как влияют примеси на электрическую прочность?

Литература. [2], с. 59 – 73.

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

6.1. Задание на подготовку

Изучить схему и принцип работы измерительного моста МД-6.

6.2. Краткие теоретические сведения

Проводниками называются вещества, удельное электрическое сопротивление которых лежит в пределах от 0,01 до 10 мкОм·м. В качестве проводников электрического тока могут быть использованы твердые тела, жидкости, а при соответствующих условиях и газы. Практическое применение в электротехнике нашли твердые проводниковые материалы на основе металлов и их сплавов.

Из металлических проводниковых материалов могут быть выделены металлы высокой проводимости, имеющие удельное сопротивление ρ при нормальной температуре не более 0,05 мкОм·м, и сплавы высокого сопротивления, имеющие ρ при нормальной температуре более 0,3 мкОм·м.

Металлы высокой проводимости используются для изготовления проводов, токопроводящих жил кабелей, обмоток электрических машин и трансформаторов и т. п. К материалам высокой проводи-

мости относятся: медь, алюминий, серебро, золото, платина, цинк, магний, никель, железо и др. К наиболее широко распространенным материалам высокой проводимости следует отнести медь, алюминий и их сплавы.

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

Помимо чистой меди в качестве проводникового материала применяются ее сплавы с оловом, кремнием, фосфором, бериллием, хромом, магнием, кадмием. Такие сплавы (бронзы) имеют значительно более высокие механические свойства, чем чистая медь. Сплав меди с цинком (латунь) обладает достаточно высоким относительным удлинением перед разрывом при повышенном пределе прочности при растяжении.

Алюминий является вторым по значению (после меди) проводниковым материалом. Алюминий приблизительно в 3,5 раза легче меди. Температурный коэффициент расширения, удельная теплоемкость и теплота плавления алюминия больше, чем меди. Алюминий обладает пониженными по сравнению с медью свойствами, как механическими, так и электрическими. Однако важно, что алюминий менее дефицитен, чем медь.

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

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

При понижении температуры до 0 К удельное сопротивление ρ некоторых металлов стремится к нулю. Это явление носит название сверхпроводимости. При низких температурах (несколько десятков

градусов по абсолютной шкале) удельное сопротивление этих металлов и сплавов ничтожно мало. Это явление носит название криопроводимости. Проводниковые материалы, обладающие таким свойством, называются сверхпроводниками и криопроводниками соответственно. К сверхпроводникам относятся иридий, алюминий, ниобий, ванадий, олово, индий, ртуть и другие металлы, сплавы и химические соединения различных элементов.

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

Наиболее ответственными соединениями, применяемыми в электротехнике, являются контакты, служащие для периодического замыкания и размыкания электрических цепей. Материалы для разрывных контактов должны обеспечивать высокую надежность при малом переходном электрическом сопротивлении контакта в замкнутом состоянии. В качестве контактных материалов для разрывных контактов помимо чистых тугоплавких металлов применяются различные сплавы и металлокерамические композиции.

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

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

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

Все газы и пары, в том числе и пары металлов, при низких напряжениях электрического поля не являются проводниками. Если напряженность поля превзойдет некоторое критическое значение, обеспечивающее начало ударной и фотоионизации, то газ может стать проводником с электронной и ионной электропроводностью. Сильно ионизированный газ при равенстве числа электронов числу положительных ионов в единице объема представляет собой особую проводящую среду, носящую название плазмы.

6.3. Свойства проводников

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

1) удельная проводимость γ или обратная ей величина – удельное сопротивление ρ ;

2) температурный коэффициент удельного сопротивления TK_{ρ} или α_{ρ} ;

3) коэффициент теплопроводности γ_T ,

4) контактная разность потенциалов и термоэлектродвижущая сила (термоЭДС);

5) работа выхода электронов из металла.

Удельная проводимость и удельное сопротивление проводников. Связь плотности тока J и напряженности электрического поля E в проводнике дается известной формулой:

$$J = \gamma E, \quad (6.1)$$

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

$$\rho = \frac{RS}{l}, \quad (6.2)$$

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

Удельное сопротивление измеряется в Ом·м. Для измерения ρ проводниковых материалов находит применение внесистемная единица Ом·мм²/м, равная по размеру единице СИ мкОм·м. Связь между названными единицами удельного сопротивления следующая:

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

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

$$\gamma = \frac{e^2 n_0 \lambda}{2m\nu_T}, \quad (6.3)$$

где e – заряд электрона;

n_0 – число свободных электронов в единице объема металла;

λ – средняя длина свободного пробега электрона между двумя соударениями с узлами решетки;

m – масса электрона;

v_T – средняя скорость теплового движения свободного электрона в металле.

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

$$\gamma = Kn_0^{2/3}\lambda, \quad (6.4)$$

где K – численный коэффициент.

Для различных металлов скорости хаотического теплового движения электронов v_T (при определенной температуре) примерно одинаковы. Незначительно различаются также и концентрации свободных электронов n_0 . Поэтому значение удельной проводимости γ в основном зависит от средней длины свободного пробега электронов в данном проводнике λ , которая определяется структурой проводникового материала. Все чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельного сопротивления; примеси, искажая решетку, приводят к увеличению ρ .

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

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

Температурный коэффициент удельного сопротивления металлов. Число носителей заряда в металлическом проводнике при повышении температуры практически остается неизменным. Однако вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки

с ростом температуры появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения свободных электронов под действием электрического поля, т. е. уменьшаются средняя длина свободного пробега электрона λ , подвижность электронов и, как следствие, удельная проводимость металлов и возрастает удельное сопротивление. Иными словами, температурный коэффициент удельного сопротивления металлов положителен:

$$TK_{\rho} = \alpha_{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} K^{-1}. \quad (6.5)$$

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

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \bar{\alpha}_{\rho} (T_2 - T_1)], \quad (6.6)$$

где ρ_1 и ρ_2 – удельные сопротивления проводникового материала при температурах T_1 и T_2 соответственно (при этом $T_2 > T_1$);

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

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

Теплопроводность металлов. За передачу теплоты через металл в основном ответственны свободные электроны, которые определяют электропроводность металлов и число которых в единице объема металла весьма велико. Поэтому коэффициент теплопроводности γ_T металлов, как правило, намного больше, чем коэффициент теплопроводности диэлектриков. Очевидно, что при прочих равных условиях, чем больше удельная электрическая проводимость металла, тем больше должен быть и его коэффициент теплопроводности. При повышении температуры, когда подвижность электронов в металле и соответственно его удельная проводимость уменьшаются, отношение коэффициента теплопроводности металла к его удельной проводимости $\frac{\gamma_T}{\gamma}$ должно возрасть. Математически это выражается законом Видемана–Франца–Лоренца:

$$\frac{\gamma_T}{\gamma} = L_0 T, \quad (6.7)$$

где T – термодинамическая температура, К;

L_0 – число Лоренца.

$$L_0 = \frac{\pi^2 k^2}{3e^2} = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2/\text{К}^2, \quad (6.8)$$

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

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

При нормальной температуре для меди $L_0 = 2,47 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2/\text{К}^2$, для алюминия $L_0 = 2,1 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2/\text{К}^2$, для серебра $L_0 = 2,35 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2/\text{К}^2$.

В области низких температур отношение $\frac{\gamma_T}{\gamma}$ не остается неизменным. Чистота и характер механической обработки металла могут

заметно влиять на его теплопроводность, в особенности при низких температурах.

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

$$U_{AB} = U_B - U_A + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}, \quad (6.9)$$

где U_A и U_B – потенциалы соприкасающихся металлов;

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

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

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

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

Провод, составленный из двух изолированных друг от друга проволок из различных металлов или сплавов (термопара), применяется для измерения температур. В термопарах используются проводники, имеющие большой и стабильный коэффициент термоЭДС. Для изготовления термопар применяются следующие сплавы: копель,

алюмель, хромель и т. п. Термопары могут применяться для измерения температур до 1600 °С. Для обмоток измерительных приборов и резисторов стремятся применять проводниковые материалы и сплавы с возможно меньшим коэффициентом термоЭДС относительно меди, чтобы избежать появления в измерительных схемах паразитных термоЭДС, которые могли бы вызвать ошибки при точных измерениях.

6.4. Методика выполнения работы

1. С помощью моста МД-6 измерить при комнатной температуре сопротивление R_0 следующих материалов: меди, никеля, константана, стали и алюминия. Для этого токовые и потенциальные выводы образца присоединить к мосту МД-6 (рис. 6.1) и включить мост.

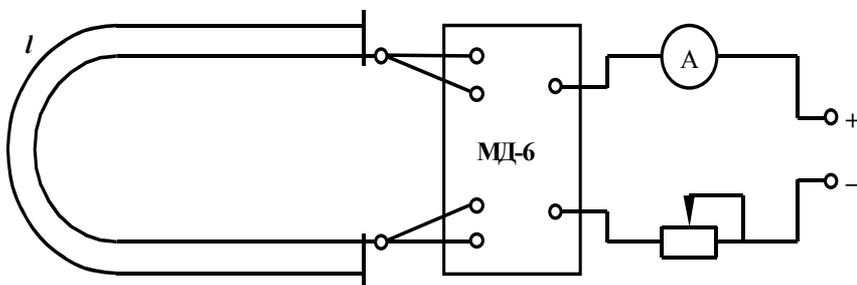


Рис. 6.1

Измерение сопротивления производится в соответствии с инструкцией, прилагаемой к прибору. Величина сравнительного сопротивления указана в табл. 6.1. Результаты измерений занести в табл. 6.2.

Таблица 6.1

Материал	Длина образца, м	Диаметр, мм	Сравнительное сопротивление, Ом
Медь	0,787	0,41	1
Никель	0,723	1,45	1
Константан	0,77	0,3	100
Сталь	0,77	0,7	10
Алюминий	0,87	0,21	10

Таблица 6.2

Наименование материала	R_0 , Ом	R_T , Ом	α_ρ , K^{-1}	ρ_{20} , мкОм·м	γ_T , Вт/(м·К)
Медь					
Никель					
Константан					
Сталь					
Алюминий					

2. Включить термостат, в который помещены образцы, и измерить их сопротивление R_T при 50 °С. Результаты измерений занести в табл. 6.2.

3. По результатам измерений и данным табл. 6.2 определить температурный коэффициент удельного электрического сопротивления и удельное электрическое сопротивление проводников при температуре 20 °С. Значения ρ_{20} и α_ρ материалов занести в табл. 6.2.

4. Определить удельную теплопроводность исследуемых проводниковых материалов при температуре 20 °С (γ_T), используя закон Видемана – Франца. Результаты расчета занести в табл. 6.2.

5. По полученным данным построить зависимость удельного сопротивления и температурного коэффициента удельного сопротивления от состава сплава. Для этого необходимо по оси абсцисс (рис. 6.2) слева направо отложить процентное содержание никеля, а справа налево – процентное содержание меди так, чтобы сумма их в каждой точке равнялась 100 % с интервалом 20 %. В крайних точках оси абсцисс строят две оси ординат. На левой оси ординат откладывают значение удельного сопротивления никеля и против процентного содержания константана (40 % Ni и 70 % Cu) значение его удельного сопротивления. Значения ρ с другим содержанием меди и никеля могут быть получены по приближенной эмпирической формуле:

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

где α' – коэффициент;

x – содержание никеля в сплаве в долях единиц.

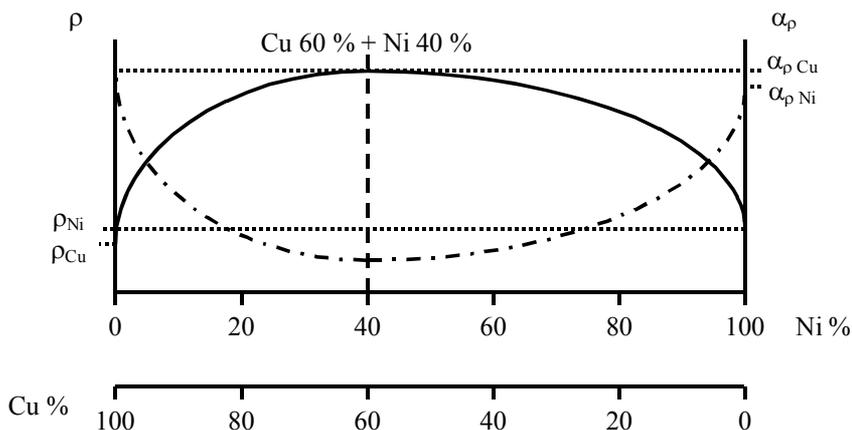


Рис. 6.2

Подставляя в приведенную формулу значение удельного сопротивления константана, полученное при измерении, и содержание никеля в сплаве ($x = 0,4$), находим коэффициент α' . В дальнейшем, подставляя вместо x значения 0,2, 0,7 и 0,8, получают достаточное количество точек для построения зависимости удельного объемного сопротивления. Результаты вычислений для медно-никелевых сплавов занести в табл. 6.3.

Таблица 6.3

$X, \%$	0	20	40	70	80	100
$\rho, \text{мкОм}\cdot\text{м}$						
α_{ρ}, K^{-1}						

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

6.5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Электрическая схема подключения измерительного моста МД-6.
3. Результаты измерений и вычислений в виде таблиц 6.2 и 6.3 и графики зависимостей $\rho = f(x \%)$ и $\alpha_\rho = f(x \%)$, а также расчетные формулы.
2. Критическая оценка полученных данных в сопоставлении их с литературными данными.

6.6. Контрольные вопросы

1. Поясните механизм проводимости в металлах.
2. Почему электрическое сопротивление чистых металлов отличается от сопротивления сплавов?
3. От каких факторов зависит удельная электрическая проводимость проводников?
4. Чем обусловлена контактная разность потенциалов?
5. Почему медь заменяется алюминием? Какие он имеет преимущества и недостатки?
6. В чем заключается особенность работы контактных материалов? Какие основные требования предъявляются к ним?
7. Какие материалы высокого сопротивления являются наиболее распространенными? В чем их достоинства и недостатки?
8. Дайте классификацию проводниковых материалов.
9. Какие вещества имеют высокую проводимость, их свойства и применение?
10. Какими основными параметрами определяются свойства проводников электрического тока?

Литература. [2], с. 186 – 229.

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

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

7.1. Задание на подготовку

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

7.2. Краткие теоретические сведения

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

Полупроводниковые материалы по величине удельного электрического сопротивления ρ_v занимают промежуточное место между металлами и диэлектриками. Так, ρ_v полупроводников составляет $10^{-5} - 10^8$ Ом·м, ρ_v диэлектриков – $10^8 - 10^{18}$ Ом·м; металлов – $10^{-8} - 10^{-6}$ Ом·м. Полупроводниками являются сотни разнообразных сложных химических соединений, некоторые окислы, а также 12 химических элементов периодической системы Д.И. Менделеева (например, германий, кремний, селен, бор, йод, мышьяк и др.).

Электрические свойства полупроводников объясняются зонной теорией твердого тела. Согласно этой теории при соединении многих атомов в твердое тело, вследствие их воздействия друг на друга, электронные уровни каждого атома несколько смещаются, образуя зоны энергетических уровней твердого вещества (рис. 7.1). В проводнике зона, заполненная электронами (валентная), и свободная зона (зона проводимости) примыкают друг к другу или даже перекрываются (рис. 7.1, а), что обеспечивает непрерывный переход электронов в свободную зону и большую электронную проводимость вещества. В диэлектрике между заполненной электронами зоной и свободной лежит большой энергетический барьер (запре-

щенная зона), $W \approx 6 \dots 10$ эВ (рис. 7.1, б), который исключает возможность перехода электронов в зону проводимости. В полупроводнике между заполненной и свободной зоной также имеется запрещенная зона, но небольшой величины: $W \approx 0,01 \dots 3$ эВ (рис. 7.1, в). Поэтому у полупроводников всегда существуют условия для того, чтобы часть электронов могла попасть в свободную зону и обеспечить заметную электронную проводимость, хотя и меньшую, чем у проводников. Такую проводимость называют собственной. Количество свободных электронов, а следовательно и собственная проводимость полупроводника будут зависеть от сообщаемой ему энергии (температуры, освещения и т.д.), способствующей переходу электронов через энергетический барьер в свободную зону.

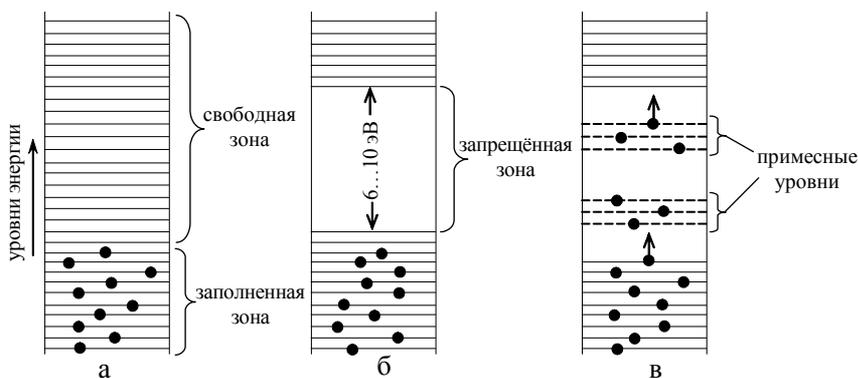


Рис. 7.1

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

являются основными носителями тока. Если энергетический уровень примеси располагается ближе к свободной зоне (рис. 7.1, в), то электроны с этого уровня могут переходить в свободную зону, образуя электронную проводимость. Такая примесь называется донором, а полупроводник такого типа (с электронной проводимостью) – полупроводником типа *n*. Здесь электроны являются основными носителями тока. В связи с этим полупроводники характеризуются двумя механизмами электропроводности: электронной (в пределах зоны проводимости) и дырочной (в пределах валентной зоны).

Полупроводники нашли очень широкое техническое применение: из них изготавливают полупроводниковые диоды (вентили), триоды, нелинейные резисторы (варисторы), термисторы, фоторезисторы, тиристоры и другие приборы.

Вентиль – полупроводниковый диод, применяемый для выпрямления переменного тока. Полупроводниковые диоды изготавливают на основе кремния, германия, арсенида галлия и др. Выпрямление переменного тока происходит на стыке двух областей с различными механизмами проводимости *p* и *n* (в *p-n*-переходе) (рис. 7.2, а). При приложении положительного потенциала к *p*-области и соответственно отрицательного – к *n*-области *p-n*-переход насыщается электронами и дырками и по электрической цепи протекает ток (рис. 7.2, б). Такой ток обусловлен примесной проводимостью. Его называют прямым и обозначают I_a . Соответственно приложенное напряжение называют прямым и обозначают U_a .

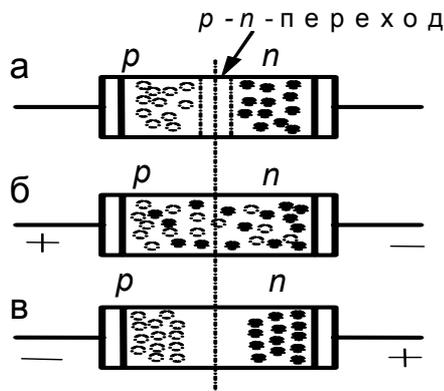


Рис. 7.2

При приложении к p - n -переходу напряжения обратной полярности (рис. 7.2, в) по цепи будет протекать значительно меньший ток, который называют обратным и обозначают I_b . Протекание обратного тока обусловлено наличием у полупроводниковых материалов собственной проводимости. Зависимость протекающего через ветвь тока от приложенного напряжения (зависимость $I = f(U)$ называют вольтамперной характеристикой (рис. 7.3). Эта характеристика имеет две ветви: прямую (а) и обратную (б).

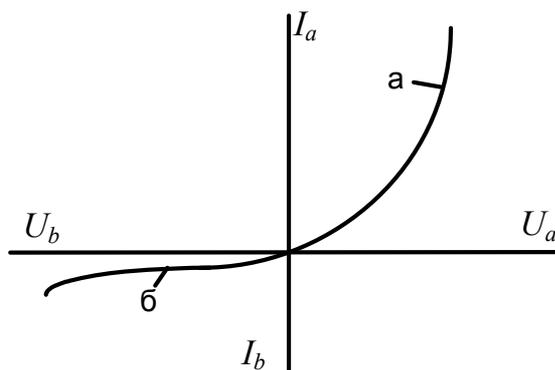


Рис. 7.3

Варисторы – нелинейные полупроводниковые резисторы, особенностью которых является резко выраженная зависимость электрического сопротивления от приложенного к ним напряжения. Вольтамперная характеристика варистора – нелинейная (рис. 7.4). Основу варистора составляет карбид кремния (карборунд) SiC. Он отличается высокой химической и температурной стойкостью, а также высокой твердостью.

Электропроводность кристаллов SiC при нормальной температуре примесная. Избыток Si дает n -проводимость, а избыток C — p -проводимость. Собственная проводимость карбида кремния наблюдается, начиная с температуры около 1400 °С.

Для изготовления варисторов используется порошкообразный карбид кремния, удельное сопротивление которого невелико – около 10^{-2} Ом·м. Порошок прессуется со связующим веществом из окиси кремния SiO₂, которая, обволакивая кристаллики порошкообразного SiC, образует пленочное покрытие их. Удельное сопротив-

ление SiO_2 составляет $10^4 - 10^6$ Ом·м. При определенном напряжении пленки SiO_2 могут частично пробиваться, вследствие чего ток через варистор резко увеличивается. Этим объясняется нелинейность вольтамперных характеристик варистора.

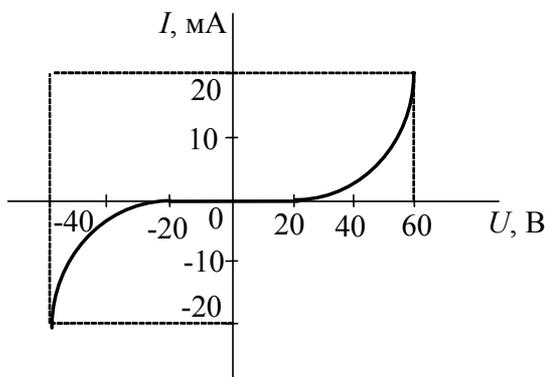


Рис. 7.4

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

Терморезисторы или термисторы, — это резисторы, изменяющие свое сопротивление при изменении температуры. Это положено в основу применения термисторов для измерения температуры. Нужные свойства термисторов удается получить, используя смеси различных окислов, относящихся к электронным полупроводникам, например $\text{CuO} + \text{Mn}_3\text{O}_4$; $\text{MgCr}_2\text{O}_4 + \text{Fe}_3\text{O}_4$ и др. Удельное сопротивление таких термисторов и его температурный коэффициент могут изменяться в миллионы раз в зависимости от процентного содержания компонентов. ТК ρ термисторов на порядок выше, чем у металлов.

Термисторы изготавливаются в виде стерженьков, пластинок или таблеток методами керамической технологии. Свойства их зависят от размера зерна, давления при прессовке, температуры обжига. При измерении температуры чувствительность термисторов на несколько порядков превышает чувствительность термопар. Применяются термисторы также для стабилизации напряжения, ограничения импульсных пусковых токов, токовых реле времени, измерения

теплопроводности жидкости, в качестве бесконтактных реостатов. Основной недостаток термисторов – относительно малый интервал измеряемых температур (-60... +120 °С).

Электрическая проводимость терморезистора изменяется от температуры по экспоненциальному закону.

$$\gamma = A \cdot e^{-\frac{\omega_a}{2kT}}, \quad (7.1)$$

где A – постоянный коэффициент для данного полупроводникового материала;

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

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

T – абсолютная температура, К.

Логарифмируя уравнение (7.1), получим зависимость

$$\ln \gamma = \ln A - \frac{\omega_a}{2k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (7.2)$$

Типичная кривая этой зависимости показана на рис. 7.5. Разная величина α на отдельных участках кривой свидетельствует о том, что энергия активации ω_a с изменением температуры изменяется.

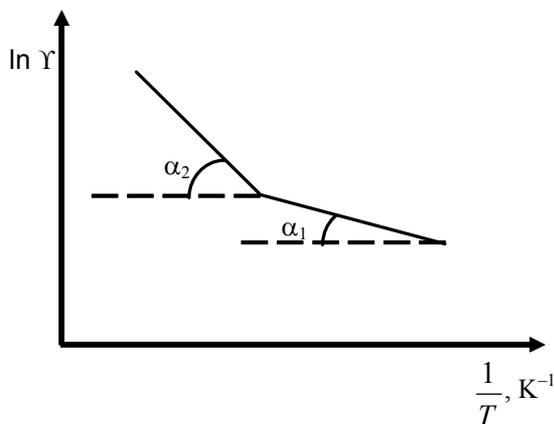


Рис. 7.5

7.3. Описание установки

Все испытания производят на установке, приведенной на рис. 7.6, где ИП – источник питания постоянного тока Б5-49 с пределами регулирования напряжения от 0 до 99,9 В.

PV – универсальный цифровой вольтметр В7-16, к выводам которого поочередно присоединяют испытываемые приборы, помещенные в термостат Т. Вольтметр В7-16 можно использовать также для измерения сопротивлений в пределах от 1 Ом до 10 МОм. РА – миллиамперметр магнитоэлектрической системы с пределами измерения от 0,15 до 60 мА. Температура измеряется ртутным термометром, помещенным в термостат.

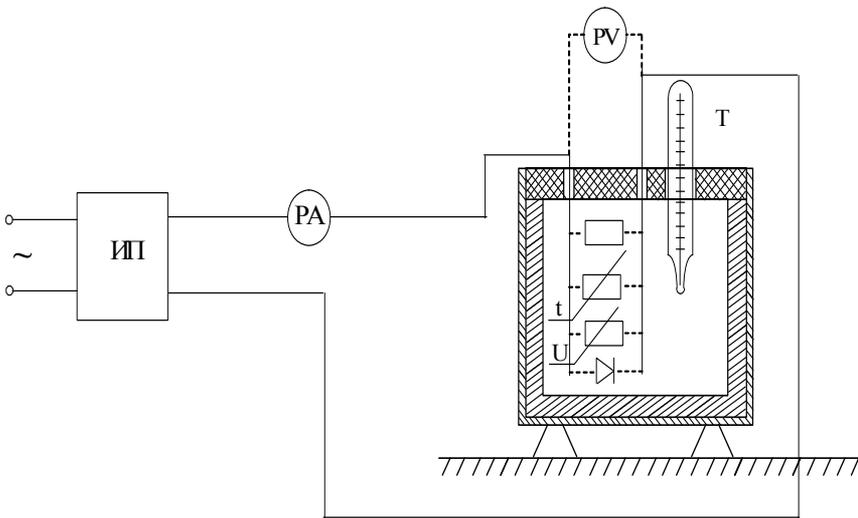


Рис. 7.6

7.4. Содержание и порядок выполнения работы

1. Используя схему рис. 7.6, снять прямую ветвь вольтамперной характеристики германиевого диода. Для этого в схему последовательно с миллиамперметром необходимо присоединить помещенный в термостат германиевый диод, подключив его в проводящем направлении.

Внимание! Перед началом опыта установить предел измерений миллиамперметра на 60 мА, напряжение источника питания ИП – на нуль, а ток ИП – на 50 мА.

Включить установку. Увеличивая прямое напряжение U_a источника питания ИП от 0 до 0,5 В (не более), отсчитать прямой ток I_a по миллиамперметру. Результаты опыта занести в табл. 7.1.

Таблица 7.1

U_a , В	0	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5
I_a , мА								
U_b , В	0	10	20	30	40	50	70	90
I_b , мА								

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

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

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

Результаты измерений при снятии прямой и обратной ветви вольтамперной характеристики следует занести в табл. 7.2 для варистора.

Таблица 7.2

U_a , В	0	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5
I_a , мА								
U_b , В	0	10	20	30	40	50	70	90
I_b , мА								

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

По полученным результатам построить зависимости $I_a = \varphi_1(U_a)$ и $I_b = \varphi_1(U_b)$ диода и $I_a = \psi_1(U_a)$, $I_b = \psi_2(U_b)$ для варистора на одном графике.

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

Предел измерения установить 10 МОм. Измерить термометром значение начальной температуры и записать ее в табл. 7.3 и 7.4 в графу с пометкой «исходная». Выводы В7-16 присоединить поочередно к резистору и к термистору, которые находятся в термостате. Отсчитывая по шкале сопротивлений В7-16 сопротивление резистора, а затем термистора при этой исходной температуре, записать их значения в табл. 7.3 и 7.4 соответственно. Включить термостат и по мере роста температуры записывать значение сопротивлений резистора, а затем термистора, переключая поочередно выводы В7-16 с одного прибора на другой. Измерять сопротивление через каждые 10 °С до температуры 80 °С. Результаты записывать в табл. 7.3 и 7.4 для резистора и термистора соответственно.

Таблица 7.3

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

Результаты определения зависимости сопротивления терморезистора от температуры записывают в табл. 7.4

Таблица 7.4

№ п/п	Температура t , °С	T , К	$\frac{1}{T}$, 1/К	R_t , Ом	γ , См	$\ln \gamma$	Примечание
1	Исходная						
2							
...							
n							

7.5. Производство вычислений

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

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

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

$$\nu = \frac{1}{R_t}, \text{ (См)}.$$

Построить зависимость $\ln \gamma = f\left(\frac{1}{T}\right)$.

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

7.6. Содержание отчета

1. Схема испытаний (см. рис. 7.6).
2. Результаты испытаний и вычислений в виде таблиц и отдельных записей, а также формулы, по которым производились расчеты.
3. Расчет прямого (R_a) и обратного (R_b) сопротивлений диода и варистора.

4. Графические зависимости $\ln \gamma = f\left(\frac{1}{T}\right)$.

5. Критическая оценка полученных данных и сопоставление их с лекционным материалом и данными литературы.

7.7. Контрольные вопросы

1. Какие материалы называются полупроводниками?
2. В чем заключается отличие полупроводников от проводников и диэлектриков?
3. Что такое собственная и примесная проводимость полупроводниковых материалов?
4. Объясните влияние температуры на проводимость полупроводников.
5. Как влияет ширина запрещенной зоны на предельно допустимую рабочую температуру полупроводника?
6. Как определить энергию активации для терморезисторов?
7. На основе каких материалов целесообразно изготавливать терморезисторы, полупроводниковые диоды, варисторы?
8. Начертите и объясните вольтамперную характеристику варистора. В чем ее отличие от аналогичной характеристики для полупроводникового диода.
9. Начертите и объясните зависимость $R = f(U)$ для варистора.

Литература. [2], с. 229 – 251;
[4], с. 19 – 26; 91 – 98; 156 – 159.

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОПРОВОДОВ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Цель работы: изучение свойств магнитопроводов из магнитомягких материалов и метода исследования их характеристик на переменном токе промышленной частоты.

8.1. Краткие теоретические сведения

Теорию магнетизма условно разделяют на *атомный магнетизм* (изучение магнитных свойств изолированных микрочастиц) и *маг-*

нетизм вещества (изучение магнитных свойств групп атомов и молекул).

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

1. Диамагнетики (диамагнетизм), в которых под воздействием внешнего магнитного поля молекулярные токи вещества создают магнитный момент, направленный в сторону, обратную внешнему полю, т.е. обладают отрицательной магнитной восприимчивостью. К диамагнетикам относятся все инертные газы, водород, азот, хлор, ряд металлов (цинк, золото, ртуть и др.), неметаллы (кремний, фосфор, сера и т.д.), а также дерево, мрамор, стекло, воск, вода и т.п.

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

3. Ферромагнетики (ферромагнетизм), в которых при температуре не выше точки Кюри даже в отсутствие внешнего магнитного поля вещество находится в состоянии технического насыщения (самопроизвольного или спонтанного намагничивания). Его магнитная восприимчивость имеет очень большое положительное значение и существенно зависит от напряженности магнитного поля и температуры.

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

4. Антиферромагнетики (антиферромагнетизм), в которых при отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты

одинаковых соседних атомов вследствие взаимодействия ориентированы антипараллельно, т.е. результирующий магнитный момент равен нулю. Под воздействием внешнего поля моменты стремятся установиться вдоль поля, т.е. появляется незначительная положительная намагниченность. К антиферромагнетикам относятся редкоземельные элементы, хром, марганец, многие окислы, хлориды, фториды, сульфиды, карбонаты переходных элементов (на основе марганца, железа, кобальта, никеля, хрома, меди и др.).

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

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

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

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

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

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

При намагничивании образца различают следующие зависимости:

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

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

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

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

Основная динамическая кривая намагничивания магнитопроводов из тонких листов обычно мало отличается от начальной. На основной кривой намагничивания принято различать три участка: начальный, соответствующий нижнему колену кривой, участок быстрого возрастания индукции (намагниченности) и участок насыщения (выше верхнего колена кривой).

При циклическом перемагничивании (в переменном магнитном поле) кривая намагничивания образует петлю гистерезиса. Для получения установившейся (симметричной) петли производят магнитную подготовку, состоящую в многократном (5 – 10 раз) коммутации тока в намагничивающей обмотке после установления

его величины. Такая симметричная петля гистерезиса (в дальнейшем называется просто петля гистерезиса) представлена рис. 8.1.

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

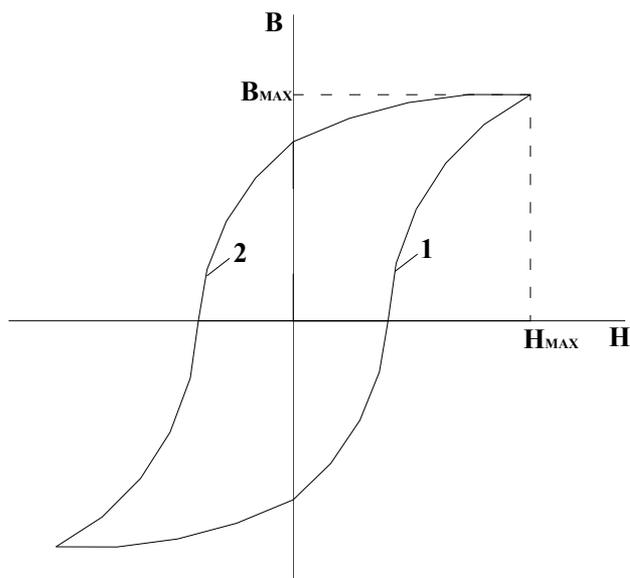


Рис. 8.1

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

Другой не менее важной характеристикой материалов при намагничивании их переменным полем являются потери мощности, обусловленные протеканием в материале вихревых токов (токов

проводимости материалов). Величина этих токов зависит от магнитных характеристик, петли гистерезиса, электропроводности вещества и напряженности внешнего магнитного поля. Их величина может быть определена через значение вектора Пойнтинга. Последний получают путем решения задачи диффузии переменного электромагнитного поля в намагничивающий образец. Потери мощности за один цикл перемагничивания будут также пропорциональны площади динамической петли перемагничивания (петли на переменном токе), представляющей зависимость средней индукции (магнитного потока) от напряженности магнитного поля на поверхности образца (намагничиваемого тока).

Магнитные материалы нашли широкое применение в изделиях электротехнической промышленности. В первую очередь это относится к электротехнической стали, представляющей собой сплав железа с кремнием. Примерно половина всех электротехнических сталей в мире приходится на марки с небольшим содержанием кремния, четвертая часть – на среднелегированные, а оставшиеся – на высоколегированные (включая и текстурованную сталь). Две четверти объема производства стали расходуется на изготовление генераторов и электродвигателей и одна треть – на трансформаторы и другие электротехнические устройства. Рабочая индукция электротехнических сталей составляет для маломощных машин 1,2...1,5 Тл, более крупных – 1,5...1,7 Тл, а текстурованные стали имеют индукцию порядка 1,8...2,0 Тл.

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

Для измерительных трансформаторов тока и напряжения, трансформаторов в цепях управления и регулирования, реле разработаны материалы на основе сплава железа и никеля. Сердечники высококачественных измерительных трансформаторов изготавливаются из высокопроницаемых пермаллоев (муметалл, ультраперм, муниперм, пермакс и т.п.). Наряду с ними находят применение текстурованная сталь. В элементах вычислительной техники широкое распространение получили материалы на основе железа и никеля (50 % Fe – 50 % Ni), пермаллои, металлические пленки на основе пермаллоев, изотропные ферриты и др.

8.2. Описание лабораторной установки для исследования магнитных характеристик в переменном магнитном поле

При испытаниях магнитных материалов в большинстве случаев необходимо измерять напряженность магнитного поля, магнитную индукцию и потери на перемагничивание. Для этих целей используются различные методы, приборы и образцы магнитных материалов. К сожалению, ни один из применяемых при испытаниях методов не позволяет измерять напряженность и индукцию магнитного поля в любой точке образца.

Напряженность магнитного поля, как правило, измеряется по величине тока в намагничивающей обмотке и является напряженностью магнитного поля на поверхности образца. Магнитная индукция рассчитывается по величине трансформаторной ЭДС в измерительной обмотке и сечению образца и представляет в итоге среднее значение индукции в образце. Получаемые таким образом магнитные характеристики являются зависимостями средней индукции (магнитного потока) от напряженности магнитного поля на поверхности (намагничивающего тока). Их называют динамическими кривыми намагничивания. Такие зависимости являются скорее всего характеристиками конкретного намагничиваемого образца в переменном поле заданной частоты, а не самого магнитного материала. Они будут различными для образцов с разной толщиной листов и разной частотой намагничивающего поля и существенно отличаются от магнитных характеристик вещества. Вызвано это явлениями фазового сдвига магнитного потока в образце от намагничивающего тока и отсутствием прямой пропорциональной зависимости между потоком и толщиной листов образца при неизменной величине намагничивающего тока.

Устранить указанные выше особенности при получении магнитных характеристик возможно при испытании магнитных образцов, выполненных из очень тонких листов, в медленно меняющихся магнитных полях. Получаемые таким образом характеристики называют статическими. Однако они несут необходимую и достаточную информацию о магнитных свойствах среды.

При испытаниях материалов в полях промышленной частоты применяют образцы различной формы и размеров. В данной работе

измерения производятся на образцах тороидальной формы. На каждый из образцов намотаны три обмотки: $W1$ – намагничивающая обмотка, $W2$ – измерительная и $W3$ – короткозамкнутая.

Для получения динамического цикла гистерезиса образца используется *осциллографический метод*, являющийся разновидностью индукционного.

Схема лабораторной установки для испытания магнитомягких материалов представлена на рис. 8.2, а сведения об образцах и параметрах элементов схемы – в табл. 8.1.

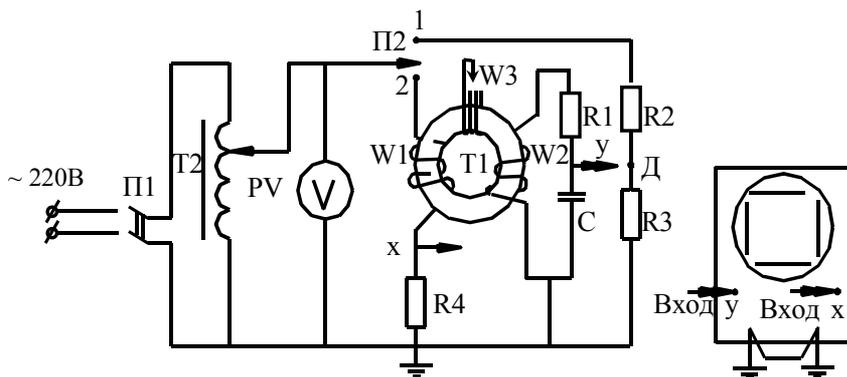


Рис. 8.2

Таблица 8.1

№ п/п	Материал	W_1 , вит.	W_2 , вит.	S , см ²	$r_{ср}$, см	R_4 , Ом	C_1 , ф	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	γ , г/см ³
1	Электротехн. сталь 330	10^3	300	4,2	7,25	10	10^{-6}	3×10^5	10^5	10^3	7,85
2	Пермаллой	1600	600	2,08	2,88	5,65	10^{-6}	3×10^5	10^5	10^3	8,2
3	Феррит	410	410	1,68	4,6	7	10^{-6}	3×10^5	10^5	10^3	4,0

На горизонтальный вход осциллографа подают падение напряжения на сопротивлении R_4 , а на вертикальный – на конденсаторе C . Параметры элементов схемы (R_4 мало, а R_1 намного больше $1/\omega C$) подобраны такими, что напряжение на R_4 (U_r) пропорционально напряженности магнитного поля на поверхности листов образца, а напряжение на C (U_c) – магнитному потоку (средней индукции), т.е.

$$U_r(t) = i(t)R_4 \approx \frac{H(t)}{W_1} \cdot l_{\text{cp}}R_4 = K_1H(t), \quad (8.1)$$

$$U_c(t) = \frac{1}{C} \int i(t)dt \approx \frac{1}{c} \int \frac{W_2}{R_1} \cdot \frac{d\Phi(t)}{dt} \approx \frac{W_2}{CR_1} SB_{\text{cp}}(t) = K_2B_{\text{cp}}(t), \quad (8.2)$$

$$\text{где } K_1 = \frac{l_{\text{cp}}R_4}{W_1}; \quad K_2 = \frac{W_2S}{CR_1};$$

$H(t)$ – напряженность магнитного поля;

$B(t)$ – средняя индукция в образце, равная $\Phi(t)/S$;

$\Phi(t)$ – магнитный поток в образце;

S – сечение образца;

l_{cp} – средняя длина магнитной силовой линии в образце.

Таким образом, на экране осциллографа появится гистерезисная зависимость (фигура Лиссажу), обусловленная сигналами $U_r(t)$ и $U_c(t)$. При периодически изменяющемся напряжении источника питания установки эти сигналы будут иметь между собой фазовый сдвиг. Средняя индукция будет отставать от напряженности магнитного поля на угол φ .

Величина этого угла φ зависит от многих факторов: от угла потерь вещества (явления гистерезиса вещества), толщины листов образца, частоты намагничивающего тока, однородности магнитного поля по направлению силовых линий, наличия количества замкнутых витков обмотки W_3 и др.

Осциллографический метод при испытаниях магнитных материалов обладает исключительной наглядностью и может быть использован в широком частотном диапазоне. Однако он обладает заметной погрешностью измерений H и B (7 – 10 %).

8.3. Содержание работы

1. Ознакомление с инструкцией к лабораторной работе и схемой лабораторной установки для испытания магнитных материалов.

2. Изучение расположения и назначения переключателей установки, выходов сигналов напряженности и средней индукции магнитного поля, а также входных зажимов осциллографа.

3. Получение гистерезисных циклов электротехнической стали, пермаллоя и феррита.

4. Получение динамической кривой намагничивания электротехнической стали.

5. Составление отчета по лабораторной работе.

8.4. Техника безопасности при выполнении работ

Перед включением питания установки все переключатели схемы должны быть установлены в положения, указанные в п. 8.5. Во время выполнения работы необходимо соблюдать общие правила техники безопасности в соответствии с инструкцией по технике безопасности при работе в лабораториях кафедры «Электрические станции».

8.5. Порядок выполнения работы

1. Проверить исходное состояние схемы: П1 – отключен; П2 – в положении 2; П3 (переключатель замкнутых витков) – в положении 0; П4 (переключатель образцов) – в положении 1 (электротехническая сталь). Зажимы Х и З установки соединить с зажимами горизонтального входа осциллографа (правый вход), а У и З – вертикального входа (левый вход – У). На лицевой панели осциллографа ручку «синхронизация» установить в положение «внутренняя»; усилитель входа «У» («умножение») – в положение 0,02, а его переключатель – в положение «x10».

2. Включить установку и осциллограф. Установить напряжение на выходе Т2 величиной 80 В и ручками смещения осциллографа откорректировать изображение цикла гистерезиса так, чтобы положения вершин цикла были удобны для отсчета. Зарисовать цикл магнитного гистерезиса и записать полное отклонение луча на экране по горизонтали (OX) и вертикали (OY) в мм, т.е. координаты вершины петли.

Примечание. Все дальнейшие исследования проводить при неизменном положении ручек осциллографа.

3. Оценить влияние короткозамкнутых витков на цикл гистерезиса, изменяя положение переключателя ПЗ. Оценить качественное влияние короткозамкнутых витков на ширину и высоту гистерезисного цикла. Переключатель ПЗ восстановить в положение 0 для снятия кривой намагничивания стали.

4. Уменьшить ступенями (10 В) напряжение на выходе Т2 от 80 В до нуля. Для каждого значения напряжения (80; 70; 60 и т.д.) записать величины X и Y и занести в табл. 8.2.

Т а б л и ц а 8.2

№ п/п	X , мм	Y , мм	H , А/м	B , Тл	μ , Гн/м	Примечание (материал)
						сталь

5. Перевести переключатель П4 в положение 2 (пермаллой), а ручку «умножение» усилителя входа «У» – в положение 0,05. Зарисовать цикл магнитного гистерезиса.

6. Перевести переключатель П4 в положение 3 (феррит), а ручку «умножение» – в положение 0,02. Зарисовать цикл гистерезиса.

7. Произвести градуировку осей горизонтального и вертикального отклонений осциллографа. Градуировки производятся на делителе (Д) схемы, состоящем из двух последовательно включенных сопротивлений R_2 и R_3 . Для этого П2 переводится в положение 1, зажимы вертикального входа осциллографа замыкаются между собой и путем изменения напряжения на выходе Т2 устанавливается такое напряжение, чтобы отклонение луча по оси X соответствовало максимальному отклонению луча гистерезисного цикла при напряжении 80 В. Записать соответствующее этому отклонению луча напряжение U_x .

Масштаб горизонтального отклонения луча для нашего случая (электротехническая сталь) будет определяться по формуле

$$m_x = \frac{\sqrt{2}W_1 U_x R_3}{2\pi r_{cp} R_4 (R_2 + R_3) \cdot X} = 3,075 \frac{U_x}{X}, \frac{\text{А/м}}{\text{мм}}, \quad (8.3)$$

где R_2, R_3, R_4 – сопротивления схемы в Ом;

r_{cp} – средний радиус магнитопровода в м;

X – отклонение луча по оси OX в мм.

Аналогично производится градуировка от вертикального отклонения, а масштаб m_y определяется по формуле

$$m_y = \frac{\sqrt{2} \cdot U_Y R_3 \cdot R_1 \cdot C}{W_2 \cdot S \cdot (R_2 + R_3) \cdot Y} = 0,0335 \frac{U_y}{Y}, \frac{\text{Тл}}{\text{мм}}, \quad (8.4)$$

где S – площадь поперечного сечения магнитопровода в м^2 ;

Y – отклонение луча по оси OY в мм.

Численные значения параметров схемы и образцов для вычисления масштабов по (3) и (4) приведены в табл. 8.1.

8. По данным табл. 8.2 определить значения B и H по формулам $B = m_y Y$ и $H = m_x X$.

Рассчитать абсолютную магнитную проницаемость материалов. Построить зависимость $B(H)$ и $\mu(H)$ для исследуемых образцов.

8.6. Содержание отчета

1. Схема установки для исследования гистерезисных циклов.
2. Рисунки циклов гистерезиса исследуемых магнитных материалов (образцов).
3. Расчетные соотношения и результаты расчетов магнитных характеристик (табл. 8.2).
4. Графики зависимостей динамической кривой намагничивания $B(H)$ и магнитной проницаемости $\mu(H)$ для рассматриваемых образцов.

8.7. Контрольные вопросы

1. Укажите основное отличие магнитомягких материалов от магнитотвердых.
2. Что характеризуют статические и динамические магнитные характеристики? Чем они отличаются между собой?
3. Какие известны способы получения статических и динамических магнитных характеристик?
4. Объясните сущность получения гистерезисного цикла образцов по схеме (см. рис. 8.1).

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

Литература. [2], с. 267 – 298;
[5], с. 17 – 18, 29 – 40, 95 – 100, 227 – 246, 252 – 257;
[6], с. 5 – 25, 189 – 192, 200 – 214;
[7], с. 56 – 79.

Литература

1. *Степанчук К.Ф., Тиняков Н.А.* Техника высоких напряжений. – Мн.: Выш. школа, 1982.
2. *Богородицкий Н.П., Пасынков В.В., Тареев Б.М.* Электротехнические материалы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т. / Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М.Тареева. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – Т. 1 – 3.
4. *Пасынков В.В., Сорокин В.С.* Материалы электронной техники. – М.: Лань, 2002.
5. *Преображенский А.А.* Магнитные материалы и элементы. – М.: Высш. школа, 1976.
6. *Дружинин В.В.* Магнитные свойства электротехнической стали. – М.: Энергия, 1974.
7. *Рейнбот Г.* Магнитные материалы и их применение. – Л.: Энергия, 1974.

Содержание

<i>Введение</i>	3
<i>Основные правила техники безопасности при работах на установках высокого напряжения</i>	4
Лабораторная работа № 1 ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛАБОРАТОРИИ	6
Лабораторная работа № 2 ИЗМЕРЕНИЕ ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ($\operatorname{tg} \delta$) ИЗОЛЯЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ	12
Лабораторная работа № 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ОБЪЕМНОГО И УДЕЛЬНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ	21
Лабораторная работа № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ	30
Лабораторная работа № 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ	42
Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	48
Лабораторная работа № 7 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ	61
Лабораторная работа № 8 ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТОПРОВОДОВ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ	71
<i>Литература</i>	84

Учебное издание

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ (ПРАКТИКУМ)

по дисциплине «Электротехнические материалы»

для студентов специальностей

1-43 01 01 «Электрические станции»,

1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,

1-43 01 03 «Электроснабжение»,

1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»

Составители: ГЕРАСИМОВИЧ Александр Никанорович
ГУБАНОВИЧ Анатолий Григорьевич
КЛИМКОВИЧ Павел Иванович и др.

Редактор Е.И.Кортель

Компьютерная верстка Н.А.Школьниковой

Подписано в печать 23.09.2004.

Формат 60x84 1/16. Бумага типографская № 2.

Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 5,0. Уч.-изд. л. 3,9. Тираж 200. Заказ 141.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

Лицензия № 02330/0056957 от 01.04.2004.

220013, Минск, проспект Ф.Скорины, 65.