Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

И. Е. Кажекин

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторных работ для студентов бакалавриата
по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2022

УДК 621.31

Рецензент
кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики ФГБОУ ВО
«Калининградский государственный технический университет»
М. С. Харитонов

Кажекин, И. Е.
Электротехнические материалы: учеб.-метод. пособие по выполнению лабораторных работ для студ. бакалавриата по напр. подгот. 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / И. Е. Кажекин. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – 38 с.

Учебно-методическое пособие является руководством по проведению цикла лабораторных работ по дисциплине «Электротехнические материалы» со студентами, обучающимися по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника. Лабораторные работы предназначены для закрепления теоретического материала и приобретения практических навыков в области электротехнических материалов, используемых в современном электрооборудовании.

Табл. 6, список лит. – 2 наименования

Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторных работ рекомендовано к изданию в качестве локального электронного методического материала для использования в учебном процессе методической комиссией Института морских технологий, энергетики и строительства 30.06.2022 г., протокол № 6

УДК 621.31

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калининградский государственный технический университет», 2022 г.
© Кажекин И. Е., 2022 г.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ 4

Правила техники безопасности при проведении работ 6

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. «ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ» 8

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. «ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ И ПРОБОЯ ТВЁРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ» 15

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. «ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ» 21

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. «ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ» 27

Перечень вопросов для самопроверки 35

Рекомендуемая литература 35

Приложение А. Форма отчета по лабораторной работе 36

ВВЕДЕНИЕ

Целью освоения дисциплины является знакомство с основными принципами конструкционного и электротехнического материаловедения.

Задачи изучения дисциплины:

– изучение электротехнических материалов и их свойств;

– изучение процессов и явлений, возникающих в электротехнических материалах под воздействием внешних электротехнических и магнитных полей;

– приобретение навыков практического применения полученных знаний в области электроматериаловедения при решении инженерных и исследовательских задач.

Целью лабораторного практикума является формирование у обучающихся базовых понятий об основных видах электротехнических материалов.

Задачи лабораторного практикума:

– приобретение знаний об основных видах электротехнических материалов;

– развитие навыков исследования свойств электротехнических материалов.

На промежуточной аттестации дисциплины обучающиеся должны

знать:

– классификацию электротехнических материалов, закономерности развития процессов электропроводности в проводниках, полупроводниках и диэлектриках, особенности явлений поляризации в диэлектриках и намагничивания в магнитных материалах;

– закономерности развития процессов старения, пробоя и перекрытия твердых, жидких и газообразных диэлектриков, а также механизмы влияния эксплуатационных факторов на свойства диэлектрических материалов, значение их теплопроводности и радиационной стойкости при решении задач проектирования и эксплуатации электрооборудования;

– виды и особенности использования различного вида диэлектрических конструкций электрооборудования, выполненных из полимерных, неорганических и композиционных материалов;

– основные направления развития электротехники в области совершенствования электротехнических материалов и повышения на этой основе эксплуатационной надёжности, безопасности и экономичности электроэнергетического оборудования;

− строение и основные свойства конструкционных и электротехнических материалов, применяемых при ремонте, эксплуатации и техническом обслуживании оборудования;

− сущность явлений, происходящих в материалах в условиях эксплуатации изделий;

− современные способы получения материалов и изделий из них с заданными свойствами;

− способы эффективного использования материалов в оборудовании систем;

уметь:

− анализировать структуру и свойства электротехнических и конструкционных материалов;

− строить диаграммы состояния двойных сплавов и давать им характеристики;

− использовать термическую и химико-механическую обработку для получения требуемых свойств материалов;

− использовать методы обработки материалов;

− применять новейшие достижения в области материаловедения и обработки материалов;

− определять основные показатели и характеристики проводниковых, полупроводниковых, магнитных и диэлектрических материалов;

− применять физико-математический аппарат при решении профессиональных задач в области электротехники и конструкционного материаловедения;

− осуществлять правильный подбор материалов для использования в электротехнических устройствах;

владеть:

− методами использования основных металлических и неметаллических материалов в электротехническом производстве, а именно, в электрических машинах, аппаратах, станциях и подстанциях;

− методами анализа и моделирования электрических цепей при решении профессиональных задач в области электротехники и конструкционного материаловедения;

− навыками подбора необходимых материалов, определения качества проведения технического обслуживания.

Для приобретения перечисленных выше навыков и знаний в *практикуме предлагаются четыре лабораторные работы, на выполнение каждой из которых может потребоваться более двух академических часов*. Кроме того, для лучшего усвоения материала каждая выполненная в лаборатории работа

защищается в виде ответов на контрольные вопросы в форме, определяемой преподавателем.

Правила техники безопасности при проведении работ

1. Общие требования охраны труда

Безопасность жизнедеятельности при проведении лабораторных работ в лабораториях кафедры энергетики обязательна для профессорско-преподавательского состава, учебно-вспомогательного персонала и студентов.

К проведению лабораторных работ допускаются лица, прошедшие инструктаж с росписью в журнале. Инженер, обслуживающий лабораторию, должен иметь группу допуска с ежегодной проверкой. В лаборатории должна быть медицинская аптечка с набором медикаментов первой медицинской помощи, а также комплект средств пожаротушения. На видном месте должна висеть инструкция по технике противопожарной безопасности.

Во время проведения занятий запрещено находиться в лаборатории в верхней одежде либо размещать ее в помещении. Перед проведением лабораторных занятий студенты обязаны изучить лабораторную работу. Перед началом работы инженер или преподаватель проверяет исправность стендов. Без разрешения преподавателя проведение лабораторных работ запрещается. Запрещается изменять схему лабораторной работы. При проведении лабораторных работ на столах не должно быть посторонних предметов. Всякие работы по устранению неисправностей под напряжением категорически запрещаются. При сборке схемы применяют только стандартные провода с наконечниками. При возникновении неисправностей стенд должен быть немедленно отключен от сети.

Запрещается оставлять без присмотра работающие стенды. При появлении запаха гари немедленно отключить стенд. В случае поражения электрическим током немедленно обесточить стенд и приступить к оказанию первой помощи пострадавшему.

Ответственный за проведение лабораторных работ уходит последним из лаборатории, убедившись, что рабочее место убрано, а стенды отключены.

При эксплуатации действующих электроустановок запрещается использовать оборудование в условиях, не соответствующих требованиям инструкции организации–изготовителей, или оборудование, имеющее неисправности, которые в соответствии с инструкцией по эксплуатации могут привести к пожару, а также эксплуатировать провода и кабели с поврежденной или потерявшей защитные свойства изоляцией; пользоваться повреждёнными розетками, рубильниками, другими электроустановочными изделиями.

2. Требования охраны труда перед началом работы

– Осмотреть состояние помещения: достаточна ли освещенность, работает ли вентиляция проветривания помещения, позволяет ли температура в помещении комфортно проводить работы без верхней одежды, не загромождено ли место проведения занятий посторонними предметами.

– Осмотреть состояние электрических соединений, рубильников, автоматов и прочих переключающих средств.

– Проверить наличие средств защиты.

– Убрать все посторонние предметы, которые могли бы создавать неудобство в сборке схемы лабораторной работы.

– Если необходимо, вывесить предупреждающие плакаты.

– Лабораторная работа проводится только с исправными приборами.

– Руководитель перед началом работы проводит инструктаж по технике безопасности и контролирует весь процесс работы.

– К моменту проведения работ все стенды должны быть проверены и готовы.

– Все студенты должны расписаться в контрольном листе.

– Студенты должны внимательно изучить описание работы, при необходимости выяснить неясные моменты.

3. Требования охраны труда во время работы

– Лабораторная работа проводится только в присутствии преподавателя.

– На проведение лабораторной работы разрешение дает лично руководитель занятий после проверки правильно собранной схемы.

– Руководитель должен следить, чтобы в схеме не было открытых оголенных проводов. При обнаружении недостатков такая работа должна быть немедленно приостановлена.

– Во время проведения лабораторной работы все проходы должны быть освобождены, доступ к стендам − свободным.

– Во время проведения лабораторной работы запрещается оставлять включенный стенд без присмотра.

– При выявлении запаха гари следует немедленно обесточить стенд и доложить руководителю.

4. Требования охраны труда по окончании работы

– По окончании лабораторной работы стенд обесточивается, все приборы и соединительные провода отсоединяются и убираются.

– О выявленных неисправностях доложить руководителю занятий.

– Выключить освещение лаборатории, закрыть помещение на замок.

5. Требования охраны труда в аварийных ситуациях

1) При возникновении неисправностей во время проведения лабораторной работы необходимо немедленно обесточить стенд.

2) При обнаружении пожара необходимо:

– прекратить работу, оповестить окружающих о пожаре;

– сообщить о пожаре на вахту, сообщить о возгорании в пожарную охрану по **тел. 01** или по **тел. 101 (112)** мобильной связи, указав при этом точное место пожара, что горит, свою фамилию;

– принять меры по эвакуации людей и спасению оборудования.

– отключить от сети электрооборудование;

– приступить к тушению пожара своими силами с помощью имеющихся подручных средств пожаротушения;

– если погасить очаг горения не представляется возможным, необходимо плотно закрыть окно, дверь, не запирая замок, и покинуть опасную зону.

3) При поражении электрическим током немедленно обесточить стенд и приступить к оказанию первой помощи пострадавшему. При необходимости вызвать скорую помощь по **тел. 03.** или по **тел. 103 (112)** мобильной связи.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1
«ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ»

Цель работы

Изучение электропроводности полупроводниковых материалов и свойств полупроводниковых приборов, а также ознакомление с методами снятия их вольтамперных характеристик.

Краткие теоретические сведения

К полупроводниковым материалам относятся материалы, по величине удельного сопротивления занимающие промежуточное положение между диэлектриками и проводниками. Их удельное сопротивление лежит в диапазоне от 10^{-5} до 10^{8} Ом·м.

Электрические свойства полупроводников объясняются зонной теорией твердого тела, согласно которой энергия электронов изолированных атомов расщепляется на дискретные уровни. Степень расщепления уровней в зоны определяется перекрытием электронных оболочек атомов, взаимодействующих в кристаллической решетке вещества. Наиболее сильно расщепляются

энергетические уровни, соответствующие валентным электронам и возбужденным состояниям электронов в атоме. При отсутствии внешнего воздействия электроны занимают наиболее низкие энергетические уровни.

Самый верхний из заполненных уровней называется валентной энергетической зоной, а ближайший к ней разрешенный уровень – зоной проводимости. Эти два уровня отделены друг от друга запрещенной зоной, представляющей энергетический барьер, преодоление которого возможно только в том случае, если энергия внешнего воздействия на электроны превышает некоторое определенное значение. Таким воздействием может быть нагревание или облучение. К полупроводникам условно относятся материалы с энергетическим барьером, не превышающим 3,5 эВ.

Электроны полностью заполненной валентной зоны не участвуют в электропроводности, так как ближайшие свободные энергетические уровни отсутствуют. При возбуждении электронов в результате внешнего воздействия они переходят из валентной зоны в зону проводимости. Возникает не только электрон в зоне проводимости, но и свободное состояние в валентной зоне, называемое дыркой, которое обеспечивает участие валентных электронов в процессе электропроводности.

Генерация носителей заряда сопровождается обратным явлением – рекомбинацией, представляющей собой переход свободных электронов в валентную зону и заполнение свободных энергетических уровней. В результате действия в материале двух противоположных процессов – образования и аннигиляции свободных носителей – при каждой температуре устанавливается свой уровень равновесной концентрации электронов проводимости и дырок. Наличие определенной концентрации указанных электронов и дырок, участвующих в электропроводности, обусловливает возникновение электрического тока, протекающего через полупроводник под действием приложенного напряжения.

Электрические свойства полупроводников сильно зависят от наличия примесей, которые образуют дополнительные энергетические уровни в запрещенной зоне. Новые разрешенные уровни служат дополнительным источником свободных носителей заряда, т. е. электронов в зоне проводимости и дырок в валентной зоне. Соответствующим подбором примесных материалов можно в основном материале полупроводника создать преимущественно электронную или преимущественно дырочную проводимость.

Области материала, обладающие электронной или дырочной проводимостью, обозначаются соответственно как n- и p-области. Наличие в одном кристалле n- и p-областей позволяет создать n-p-переход, являющийся основой всех полупроводниковых приборов. Управление свойствами n-p-перехода реализуется практически мгновенно и требует весьма малых

электрических воздействий. Это явилось главной причиной их широкого применения.

Основным свойством n-p-перехода является его односторонняя проводимость, т. е. сильная зависимость сопротивления полупроводника от полярности приложенного напряжения (рисунок 1.1). Это свойство объясняется тем, что в отсутствие внешнего электрического поля возникает потенциальный барьер между n- и p-областями, уровень которого увеличивается или уменьшается в зависимости от величины и полярности приложенного напряжения.

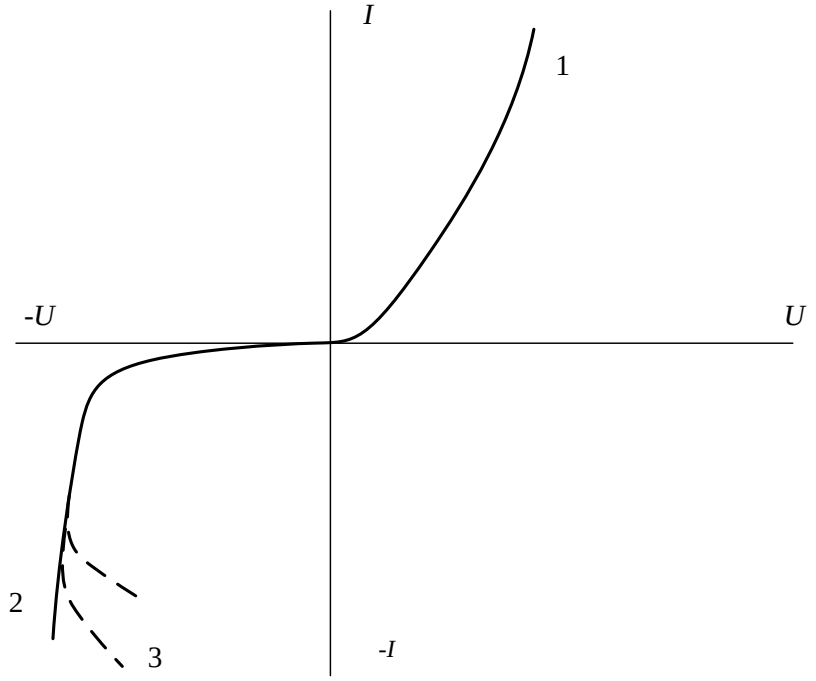


Рисунок 1.1 - Вольтамперная характеристика n-p-перехода:
1 – ветвь прямой проводимости (положительный электрод источника присоединен к p-области, а отрицательный – к n-области); 2 – ветвь обратной проводимости с электрическим (обратимым) пробоем n-p-перехода; 3 – ветви обратной проводимости с тепловым (необратимым) пробоем n-p-перехода

Образование потенциального барьера происходит благодаря тому, что из первоначально нейтральных в электрическом отношении n- и p-областей в результате тепловой диффузии основные носители (электроны в n-области и дырки в p-области) попадают в область противоположной проводимости. Здесь они быстро рекомбинируют. В результате из области с n-проводимостью к n-p-переходу подходят и «исчезают» электроны, а из области p-проводимости – дырки. На месте ушедших электронов остается неуравновешенный положительный заряд связанных носителей, а на месте ушедших дырок – отрицательный заряд. Таким образом, создается электрическое поле,

приложенное к n-p-переходу и препятствующее дальнейшему развитию процесса рекомбинации основных носителей n- и p-областей полупроводника. Это поле и образует потенциальный барьер.

Использование свойств n-p-перехода лежит в основе действия многих полупроводниковых приборов. К ним относятся полупроводниковые диоды, транзисторы и другие приборы. Недостатком этих приборов является зависимость их характеристик от температуры прибора. В настоящей лабораторной работе будут исследоваться вольт-амперные характеристики диода (или n-p-перехода) и влияние на них температуры.

В настоящее время широкое распространение получили терморезисторы, в которых влияние температуры на сопротивление полупроводника является основным эффектом. Они используются для измерения и регулирования температуры и для термокомпенсации, а также в целях ограничения пусковых токов электрических двигателей, в качестве бесконтактных реостатов, в токовых реле времени и т. д. Температурная зависимость терморезистора зависит от его типа. В настоящей лабораторной работе она снимается для терморезисторов типа ММТ и МКТ.

План проведения занятия:

– ознакомиться с лабораторной установкой, прослушать инструктаж по технике безопасности и особенностям выполнения экспериментальной части занятия, собрать необходимые схемы;
– выполнить эксперимент;
– обработать результаты эксперимента и подготовить отчёт;
– подготовить ответы на контрольные вопросы.

Описание экспериментальных установок, перечень приборов и оборудования

В настоящей лабораторной работе используются следующие полупроводниковые приборы:

1. Диоды типа Д-9 – германиевый (рисунок 1.2 а) и КД-202Д – кремниевый (рисунок 1.2 б).

2. Терморезисторы типа ММТ-1 (рисунок 1.2 в) или ММТ-4 − медно-марганцевые (рисунок 1.2 г).

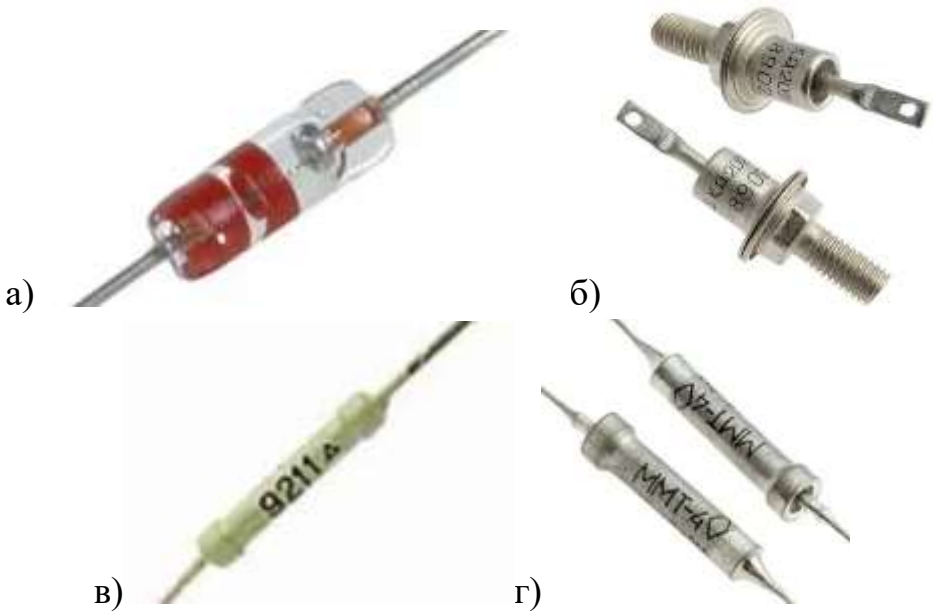


Рисунок 1.2 – Полупроводниковые приборы

Для снятия температурных зависимостей они помещены в термостат. Схемы экспериментальных установок приведены на рисунках 1.3 а и 1.3 б. Ниже дается перечень оборудования, используемого в экспериментальной установке, и условные обозначения отдельных элементов.

ВУ – выпрямительное устройство

R_1 – реостат

R_2 – резистор

$П_1$ – переключатель полярности

$К_1$ – ключ

V – вольтметр

mA – миллиамперметр

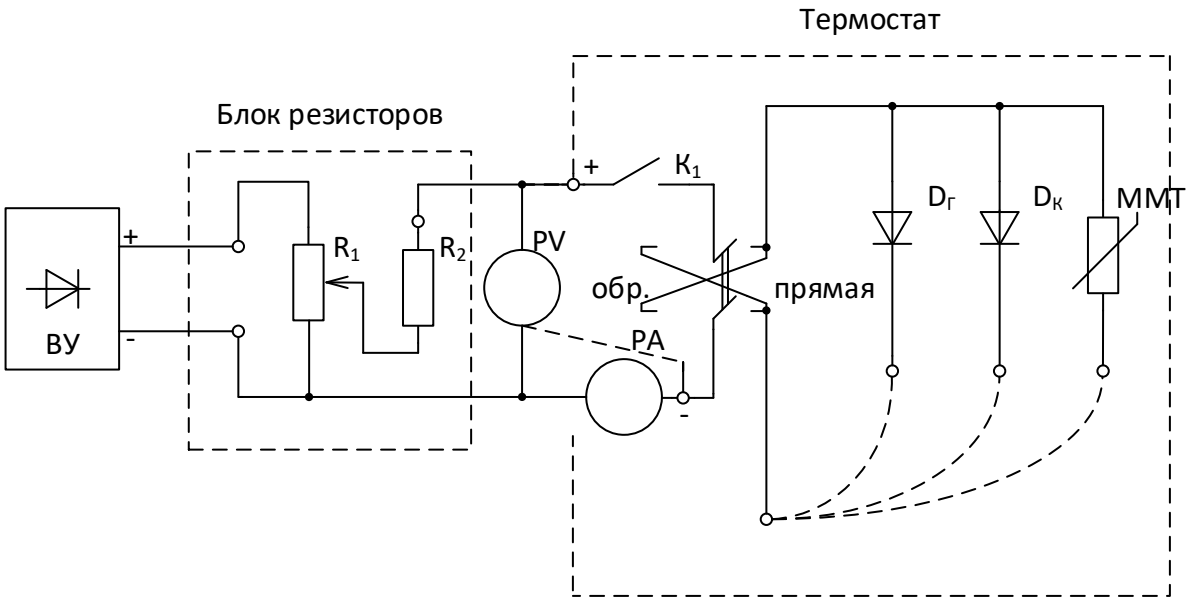
μA – микроамперметр

$Д_1$, $Д_2$ – диоды

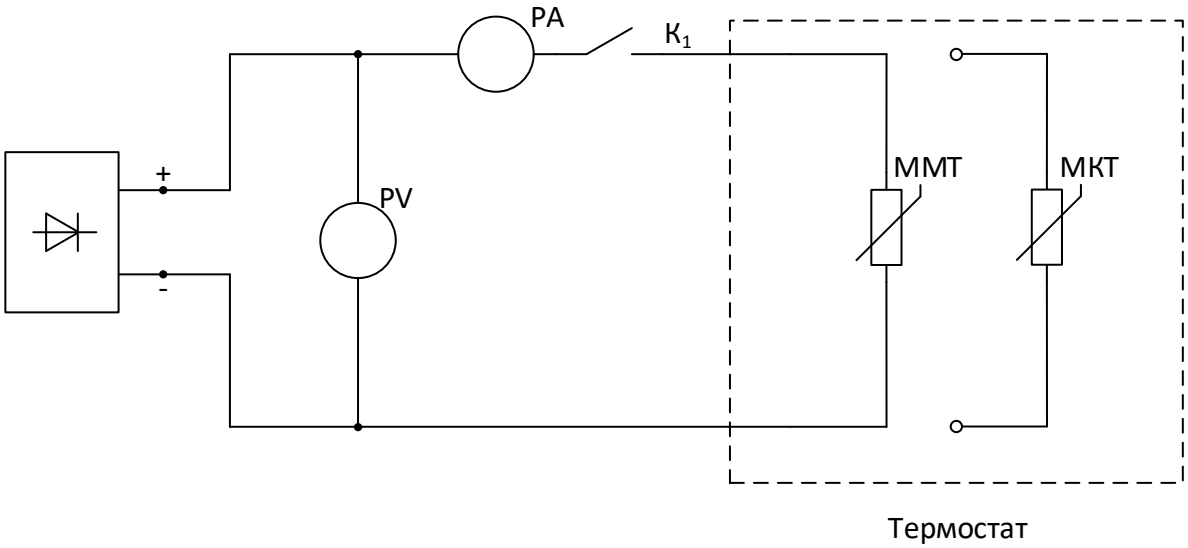
ММТ, МКТ – терморезисторы.

Для снятия вольтамперных характеристик диодов используется экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1.3 а. Исследуемые диоды расположены в термостате, а их отпайки выведены на внешнюю панель. Переключатель $П_1$ позволяет снимать прямую и обратную ветви вольтамперной характеристики диода.

Схема для снятия вольтамперных характеристик терморезисторов приведена на рисунке 1.3 б. Ключ $К_1$ служит для сокращения времени пребывания терморезистора под током. Его следует включать после установления заданного напряжения и отключать сразу же после снятия показаний миллиамперметра.



а)



б)

Рисунок 1.2 – Электрические схемы экспериментальных установок для снятия температурных характеристик полупроводников: а) диодов; б) терморезисторов

Алгоритм проведения эксперимента

1. Снять вольтамперные характеристики диодов.

1.1. Собрать схему, представленную на рис. 1.3 а, и подсоединить к ней диод $Д_1$.

1.2. Не включая термостат, т. е. при комнатной температуре (около 20 °С) произвести снятие вольтамперной характеристики диода $Д_1$. При этом напряжение между анодом и катодом не должно превышать 10–12 В. Результаты занести в таблицу 1.1.

1.3. Отсоединить диод $Д_1$ и подключить диод $Д_2$, а затем повторить опыты. Результаты занести в другую таблицу, расчерченную аналогично таблице 1.1.

В дальнейшем, после получения вольтамперных характеристик терморезисторов, необходимо вернуться к схеме с диодами и снять вольтамперную характеристику диода $Д_1$. Однако на этот раз ее следует снимать при температуре 80 ºС. Результаты измерений также занести в таблицу 1.1. По данным таблицы 1.1. построить график зависимости I=*f*(V) при температурах 20 ºС и 80 ºС для каждого из диодов.

Таблица 1.1 – Вольтамперные характеристики полупроводникового диода $Д_1$

Приложенное напряжение V, В								-5	-10	-15	-20	-25
Ток диода I, mкА	При t=20 °С	0,62	1,25	2,5	5	6,25	7,5					
	При t=80 °С											

2. Снять вольтамперные характеристики терморезисторов.

2.1. Собрать схему, представленную на рисунке 1.3 б. По указанию преподавателя присоединить к ней один из терморезисторов, расположенных в термостате. В начале опыта термостат включен и температура терморезисторов равна комнатной (около 20 ºС). **Ключ $К_1$ следует разомкнуть**!

2.2. Заключить выпрямитель ВУ и по вольтметру установить напряжение на терморезисторе равным 58. После этого замкнуть на короткое время ключ $К_1$ и измерить ток резистора. Результаты занести в таблицу 1.2.

2.3. Включить термостат и по мере повышения температуры повторить измерения через каждые 20 ºС до температуры 80 ºС. Результаты также занести в таблицу 1.2. На их основании построить график R = *f*(t), где R = U/I.

После повышения температуры термостата до 80 ºС следует выполнить повторные эксперименты с диодами, упоминавшиеся в п. 1.3.

Таблица 1.2 – Температурная характеристика терморезистора

Температура ºС	20	30	40	50	60	70	80
Напряжение U, В	5	5	5	5	5	5	5
Ток I, mA							
Сопротивление терморезистора R, Ом							

Отчет должен включать:

1. Изложение цели работы.
2. Принципиальные схемы для снятия вольтамперных характеристик диодов и терморезисторов.
3. Таблицы измерений.
4. Графики: $I = f(V)$ − для диодов;
   $R = f(t$− для терморезистора.
5. Выводы о влиянии температуры на характеристики диода.

Контрольные вопросы

1. Чем обусловлен ток полупроводников?
2. Как зонная теория объясняет электрические свойства полупроводников?
3. Как зонная теория объясняет влияние температуры на электропроводность полупроводников?
4. Каковы свойства n-p-перехода?
5. Каковы свойства и область применения терморезисторов?
6. Самостоятельно нарисуйте схемы, предназначенные для снятия вольтамперных характеристик диодов и терморезисторов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2
«ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ И ПРОБОЯ ТВЁРДОЙ ИЗОЛЯЦИИ»

Цель работы

Ознакомиться с процессами электрического старения и пробоя твёрдой изоляции в условиях судовых электроэнергетических систем низкого напряжения.

Сведения из теории

В судовых условиях, где практически повсеместно применяется низкое напряжение, пробою твёрдой изоляции предшествует процесс трекообразования, в результате которого образуется токопроводящая дорожка − трек. Затем может наступить и окончательный пробой, возникающий в результате протекания тока по образовавшемуся треку и имеющий характер теплового пробоя.

Процесс трекообразования, называемый ещё трекингом, протекает под воздействием электрического напряжения в условиях периодического увлажнения поверхности твёрдого диэлектрика. В судовых условиях тонкий слой влаги на поверхности диэлектрической конструкции может возникнуть в

результате влияния росы, появления тумана или даже прямого попадания воды. Протекающий по этому слою ток утечки приводит к достаточно быстрому его пересыханию из-за джоулева тепла. Неравномерное распределение плотности тока по поверхности увлажняющего слоя изоляции приводит к пересыханию отдельных участков раньше других. Здесь и образуются локальные дефекты, которые затем сливаются в единый трек, протягивающийся от одного электрода к другому.

Выделяют высоковольтный и низковольтный трекинги. Различие между ними заключается в механизме возникновения локальных дефектов в каждом из циклов увлажнения и пересыхания изоляции. Для высоковольтного трекинга характерно возникновение микродуг над поверхностью твёрдого диэлектрика. Высокая температура дуги, продукты её горения и интенсивное радиационное излучение приводят к локальному повреждению изоляции. Повторные увлажнения изоляции, находящейся под напряжением, приводят к появлению всё новых и новых дефектов, которые, накапливаясь, приводят, наконец, к образованию трека.

Для низковольтного трекинга характерной является принципиальная невозможность возбуждения микродугового процесса над поверхностью диэлектрика из-за низкого уровня приложенного напряжения. Однако разрушение изоляции из-за накопления дефектов проходит во многом аналогично разрушению микродугами. При пересыхании плёнки увлажнения самый верхний слой твёрдого диэлектрика, впитавший в себя определённое количество влаги, сохраняет достаточно высокую электропроводность. В результате ток начинает протекать через этот слой диэлектрика, и в нём начинает интенсивно выделяться джоулево тепло. Локальный разогрев изоляции приводит к возникновению новых дефектов. Накапливаясь, они примерно образуют трек, как и микродуговой процесс.

Активизации процессов трекообразования способствует высокая гигроскопичность углерода. Она приводит к тому, что в очередных циклах увлажнений роса особенно интенсивно смачивает уже повреждённые участки диэлектрика. На них и происходит особенно интенсивное развитие процессов разрушения изоляции.

Различные изоляционные конструкции в зависимости от структуры химического состава их материалов, состояния поверхности, условий эксплуатации и других факторов значительно отличаются по своей стойкости к образованию поверхностных токопроводящих каналов. Для сравнения материалов по их трекингстойкости в низковольтных электроустановках применяется ускоренный метод испытаний. При использовании этого метода сравнение материалов производится по условным параметрам,

рассматриваемым только в сочетании с указанным методом. Наиболее распространённым параметром является напряжение трекинга $U_{ТРЕК}$.

Метод определения напряжения трекинга $U_{ТРЕК}$ заключается в следующем. На плоский образец ставят два латунных электрода на расстоянии 4 мм. К электродам прикладывается испытательное напряжение частотой 50 Гц. В процессе испытаний напряжение изменяется ступенями от значения 500–600 В (не более 1000 В) до 150 В. В межэлектродный промежуток каплями подаётся 0,1 %-ный раствор хлористого аммония в дистиллированной воде.

Капли электролита падают с высоты 10–20 см с интервалом времени в 30 сек. На каждой ступени проводится испытание одного или нескольких образцов до их полного разрушения. При этом определяется количество капель П, после воздействия которых возникает пробой (момент пробоя фиксируется по достижении током утечки значения I = 0,2 А). Затем испытание повторяется, но уже при новом значении воздействующего напряжения. По результатам выполненных испытаний строится зависимость n = f(U), по которой определяется напряжение трекинга $U_{ТРЕК}$ (рисунок 2.1). Оно равно такому значению напряжения, при котором пробой наступает после воздействия 50 капель. Напряжение трекинга является показателем стойкости материала трекингу.

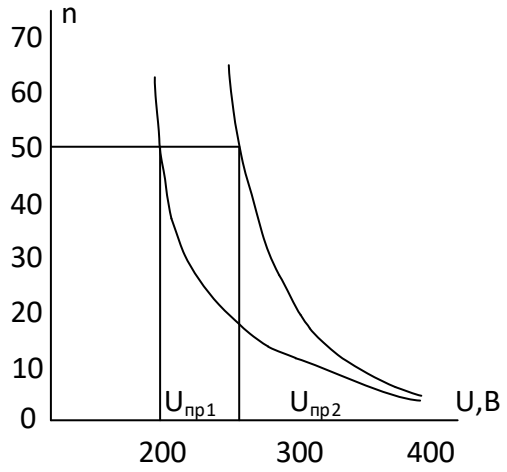


Рисунок 2.1 – Зависимости количества циклов увлажнения, приведших к пробою, от напряжения, подаваемого на изоляцию

План проведения занятия:

– ознакомиться с лабораторной установкой, прослушать инструктаж по технике безопасности и особенностям выполнения экспериментальной части занятия, собрать необходимые схемы;

– выполнить эксперимент;

– обработать результаты эксперимента и подготовить отчёт;

– подготовить ответы на контрольные вопросы.

Описание экспериментальной установки, перечень приборов и оборудования

Схема испытательной установки приведена на рисунке 2.2. Ниже приводится перечень оборудования, использованного в установке, и условные обозначения отдельных элементов:

ПВ – пакетный выключатель;

ПР1, ПР2 – предохранители;

ЛАТР – лабораторный автотрансформатор;

СЛ – сигнальная лампа «Установка включена»;

ТР – повышающий трансформатор;

R – защитный резистор, ограничивающий ток замыкания после пробоя образца величиной (1±0,10) А;

А – амперметр, используемый при постройке установки;

РТ – реле тока, отключающее напряжение после пробоя образца;

V – вольтметр, используемый для установления заданного напряжения между электродами, распложенными на образце;

Т1 – тумблер, шунтирующий испытываемый образец при настройке реле тока РТ;

$R_Н$ – резистор, воспроизводящий сопротивление увлажнённого образца;

$К_П$ – капельница;

Э – испытательные электроды;

О – образцы;

$Д_к$ – контакт, замыкающийся при закрывании электродов защитным щитком из оргстекла.

Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 2.2.

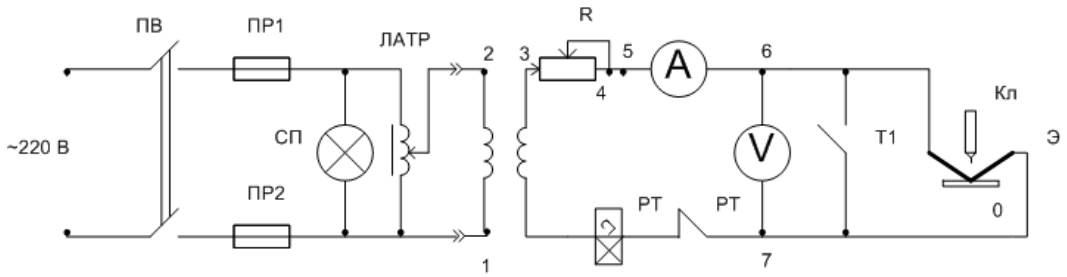


Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки

Для подготовки установки к работе необходимо включить пакетный выключатель ПК. После закрытия защитного щитка и включения вилки установка переводится в рабочий режим.

Включить тумблер Т1 и, выведя реостат R, можно отрегулировать сопротивление защитного резистора $R_Н$ таким образом, чтобы ток при замыкании электродов Э не превышал допустимого значения, равного (1 ± 0,10) А. Затем, введя реостат **R** и доведя его сопротивление до такого значения, при котором ток равен 0,1−0,2 А, можно отрегулировать установку реле тока РТ.

Отключение тумблера Т1 завершает процесс подготовки установки к испытаниям. Для начала испытаний осталось подвести капельницу, отрегулированную на определённый интервал времени между двумя каплями, следующими одна за другой. Если регулировка капель не получается, можно просто капать на диэлектрик через указанные интервалы времени.

Отключение установки производится выключателем ПВ, контактом $Д_к$, размыкающимся при открытии щитка, или реле РТ, срабатывающим при пробое образца.

Алгоритм выполнения работы

1. Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с ее целями и изучить теоретический материал по рекомендуемой литературе, самостоятельно ответить на контрольные вопросы, приведённые в конце методических указаний. Необходимо изучить схему лабораторной установки, назначение её элементов, порядок включения и отключения.

2. Отрегулировать экспериментальную установку. Установить сопротивление защитного реостата $R_Н$ таким образом, чтобы ток трансформатора при коротком замыкании электродов Э не превышал (1 ± 0,10) А. Для этого включить пакетный выключатель ПВ, убедиться, что щиток из оргстекла закрыт, и включить вилкой напряжение на ЛАТР. Затем ввести реостат R (установить наибольшее сопротивление), вывести RН (установить сопротивление, равное нулю) и включить тумблеры Т1. Плавно уменьшая сопротивление реостата R, установить по амперметру А ток, примерно равный 1,1 А.

После настройки реостата R отрегулировать реле тока РТ. Для этого ввести реостат $R_Н$ и установить по амперметру ток 0,1 А. Затем, не отключая тумблер Т1, добиться срабатывания реле при указанном токе. Установить по вольтметру напряжение 400 В, отключить тумблер Т1 и выключить установку.

3. Отрегулировать интервал времени между двумя каплями, следующими друг за другом. С целью сокращения времени эксперимента рекомендуется установить интервал равным 20, а не 30 сек.

Регулировку следует произвести с помощью зажима, установленного на резиновом натрубке капельницы, и часов с секундной стрелой. При этом капельницу следует отвести от электродов и направить в специальную мензурку.

4. Направить капельницу на электроды, закрыть защитный щиток и включить установку вилкой. Довести образец до пробоя. Количество капель, потребовавшихся для пробоя, зафиксировать и занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты измерений количества циклов увлажнения при различных величинах напряжения

Напряжение, В							
Количество циклов увлажнения до первого пробоя							
Количество циклов увлажнения до второго пробоя							
Количество циклов увлажнения до третьего пробоя							

5. На одной и той же ступени напряжения опыт повторить трижды, каждый раз передвигая испытываемый образец по отношению к электродам. Результаты занести в таблицу 2.1.

6. Установить напряжение 350 В и повторить описанные выше опыты. Результаты занести в таблицу 2.1.

7. Опыт повторить при напряжениях 300, 250 и 200 В. Результаты занести в таблицу 2.1.

8. Описанные выше опыты при тех же значениях напряжения повторить для другого диэлектрика. Результаты занести в таблицу 2.1.

9. По результатам измерений определить средние значения числа капель n_{CP} при различных уровнях приложенного напряжения $U_{пр}$.

10. Построить графики зависимостей $n_{CP} = f(U_{пр})$ и по ним определить напряжение трекинга $U_{трек}$ (напряжения $U_{пр}$ при $n = 50$).

Содержание отчёта

Отчет должен содержать следующие структурные элементы:

1) изложение цели работы;
2) электрическую схему установки;
3) таблицу измерений и вычислений величин;
4) графики зависимостей для каждого из испытываемых диэлектриков;
5) выводы по работе, в которых делается обоснованное заключение об относительной трекингстойкости испытанных диэлектриков.

Контрольные вопросы

1. Каковы механизмы развития треков на поверхности диэлектриков? Подвержены ли керамические изоляторы трекингу?
2. Каким показателем пользуются для характеристики относительной стойкости диэлектриков при разрушающем воздействии поверхностных токов в низковольтных электроустановках?
3. Опишите методику испытаний диэлектриков на трекингстойкость. Как определить напряжение трекинга по методу каплепадания? Каково наибольшее испытательное напряжение при испытаниях низковольтной изоляции на стойкость трекингу?
4. Опишите устройство экспериментальной установки. Каково назначение сопротивления R и R_H? Как обеспечивается защита от коротких замыканий и самопроизвольных включений установки после возобновления подачи напряжения от сети вслед за неожиданным перерывом в электроснабжении?
5. Как производится настройка экспериментальной установки?
6. Какие способы повышения трекингстойкости материалов могли бы вы предложить? Указать не менее четырёх−пяти способов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3
«ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ»

Цель работы

Ознакомление с теоремой электропроводности твердых проводников и их основными свойствами, а также овладение методикой измерения сопротивлений и контактных термо-ЭДС металлов, снятия их температурных характеристик.

Краткие теоретические сведения

Проводниками называются материалы с малым удельным сопротивлением, величина которого лежит в диапазоне от 10^{-8} до 10^{-5} Ом · м. К ним относятся твердые тела, большое количество жидкости и растворов, а также при определенных условиях и газы. Наилучшими проводниками электрического тока является металлы, чистые металлы в обычных условиях обладают удельным сопротивлением от 0,015 до 0,105 мкОм, а сплавы металлов и ртуть – от 0,3 до 1,8 мкОм. Из металлов и их сплавов изготавливаются практически все проводники, применяемые в электротехнике, в том числе и в судовой электротехнике. Электрический заряд в металлах переносят электроны, способные свободно перемещаться от одного атома к другому. Их появление возможно благодаря перекрытию электронных оболочек атомов и наличию легкодостижимых свободных энергетических уровней, заполнение которых «разрешено» электронам внешней оболочки. Под влиянием даже слабого электрического поля эти электроны, называемые электронами проводимости, переходят на более высокие разрешенные энергетические уровни и покидают свой атом. Таким образом возникает большое количество «коллективизированных» электронов, обеспечивающих прохождение электрического тока через металл.

Металлические проводники делятся на материалы высокой удельной проводимости и высокого удельного сопротивления. Первые используются при изготовлении обмоточных проводов и кабелей тока, проводящих шин и волноводов. Материалы второй группы применяются в реостатах, резисторах, лампах накаливания и т. п. Степень проводимости материалов характеризуется величиной удельного сопротивления. Оно связано с сопротивлением проводника следующей формулой:

$$\rho = R\frac{S}{l}, \frac{\text{Ом*мм}^2}{\text{м}}, \qquad (3.1)$$

где R − общее сопротивление проводника, Ом; S − сечение проводника, мм^2; l − длина проводника, м.

Наличие существенных различий в уровнях удельных сопротивлений металлов и сплавов, а также характер воздействия внешних факторов на их сопротивление объясняются различиями в скорости теплового движения электронов или их концентрации, а в основном зависят от длины свободного пробега электронов и определяются строением кристаллической решетки металлов. Наличие различных по дефектам структур, обусловленных примесями, существование отдельных зерен между удельных атомов и т. д. существенно изменяет длину свободных пробегов электронов. Этим, в частности, объясняется тот факт, что чистые металлы, имеющие более регулярную структуру, чем сплавы, обладают и более низким удельным

сопротивлением. Длина свободного пробега электронов зависит от размаха тепловых колебаний ионов, составляющих узлы кристаллической решетки. С повышением температуры амплитуда колебаний увеличивается, а длина свободного движения электронов до очередного взаимодействия с ионами уменьшается. В результате удельное сопротивление металлов возрастает. Тепловое увеличение сопротивления характеризуется температурным коэффициентом удельного сопротивления.

$$\alpha_\rho = \frac{1}{\rho} * \frac{d\rho}{dt}, \text{К}^{-1}, \quad (3.2)$$

где t − температура, К.

Величину α_ρ можно определить по экспериментальной зависимости $\rho = f(t)$. Для этого необходимо определить два значения ρ, соответствующие разным значениям температуры, и включить их в формулу:

$$\alpha_\rho = \frac{\rho_t - \rho_0}{\rho_o(t - t_0)}, \quad (3.3)$$

где t_0 и t − соответственно нижнее и верхнее значения, для которых определялось удельное сопротивление; ρ_0 и ρ_t − значения удельных сопротивлений материала соответственно при температурах t_0 и t.

При определении величины α_ρ следует учитывать, что одновременно с ростом сопротивления увеличивается и длина образца. Поэтому температурный коэффициент удельного расширения следует рассчитывать по формуле

$$\alpha_\rho = \alpha_R - \alpha_\text{с}, , \quad (3.4)$$

где $\alpha_R = \frac{R_t - R_0}{\alpha_0(t - t_0)}$ – температурный коэффициент сопротивления; R_0 и R_t − сопротивления образца соответственно при температурах t_0 и t; α_l − коэффициент линейного расширения металла.

Зная электрическое удельное сопротивление материала ρ_0 при температуре t_0 и температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ, можно вычислить удельное сопротивление этого материала при температуре t по формуле:

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha_\rho(t - t_0)). \quad (3.5)$$

При очень низкой температуре линейная связь между температурой и электрическим сопротивлением многих материалов и сплавов нарушается. Наступает явление сверхпроводимости, при котором электронный газ превращается в «сверхтекучую жидкость», которая может двигаться через кристалл как единое целое.

Явление сверхпроводимости открыто в 1911 году и наблюдается у 27 металлов и более 1000 металлических сплавов и соединений. Это движение происходит без трения, поэтому металл теряет электрическое сопротивление. Ток по проводнику будет протекать без какого-либо внешнего источника в

течение сколь угодно длительного времени. Если соединить два разнородных металла, они будут обмениваться свободными электронами. Поскольку каждый металл обладает своей величиной работы выхода электрона, то на границе двух металлов возникает скачок потенциала. Разность потенциалов между соприкасающимися образцами называется контактной разностью потенциалов. Образец с большей работой выхода принимает электроны, а с меньшей работой выхода − их отдает. Вследствие избыточного заряда одного из металлов по отношению к другому возникает поле, препятствующее дальнейшему переходу электронов. Равновесие будет достигнуто, когда контактная разность потенциалов между образцами станет равной.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{1}{e}(A_1 - A_2), \text{В}, \tag{3.6}$$

где φ_1 и φ_2 – потенциалы соответственно первого и второго соприкасающихся металлов; A_1 и A_2 – работы выхода соответственно первого и второго металлов; е – заряд электрона.

В замкнутой цепи, состоящей из двух металлических проводников, при нагревании одного из контактов и охлаждении другого возникает термоэлектродвижущая сила δU. Она зависит от коэффициента термо-ЭДС, определяемой материалом обоих проводников, и является функцией разности температур контактов:

$$\delta U = \alpha_{\text{Т}}(\text{Т}_{\text{г}} - \text{Т}_{\text{х}}), \text{В}, \tag{3.7}$$

где $\alpha_{\text{Т}}$ – коэффициент термо-ЭДС; $\text{Т}_{\text{г}}$ и $\text{Т}_{\text{х}}$ − температура соответственно горячего и холодного контактов.

Соответствующим подбором пар, участвующих в создании термо-ЭДС, можно получить сравнительно большие или, наоборот, ничтожно малые коэффициенты термо-ЭДС. Пары с большим коэффициентом $\alpha_{\text{Т}}$ используются при измерениях температур и в термогенераторах. Подбор пар с возможно меньшей величиной $\alpha_{\text{Т}}$ (обычно одним из металлов, входящих в пару, является медь) производится при изготовлении высокочувствительных измерительных приборов, поскольку появление термо-ЭДС может внести дополнительную погрешность в измерения.

План проведения занятия:

– ознакомиться с лабораторной установкой, прослушать инструктаж по технике безопасности и особенностям выполнения экспериментальной части занятия, собрать необходимые схемы;
– выполнить эксперимент;
– обработать результаты эксперимента и подготовить отчёт;
– подготовить ответы на контрольные вопросы.

Описание экспериментальной установки, перечень приборов и оборудования

Технические данные испытательных образцов, необходимые для определения удельного сопротивления металлов, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Технические данные образцов металлических проводников

№ образцов	Наименование материала	Диаметр провода d, м $\cdot 10^{-3}$	Длина образца	Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_l \cdot 10^{-6}, K^{-1}$
1	Медь	0,9	$L_м$	16,7
2	Алюминий	0,5		24
3	Сталь	0,9		11
4	Константан	0,9		17,0

Схема экспериментальной установки, предназначенной для исследования температурных характеристик металлов, приведена на рисунке 3.1.

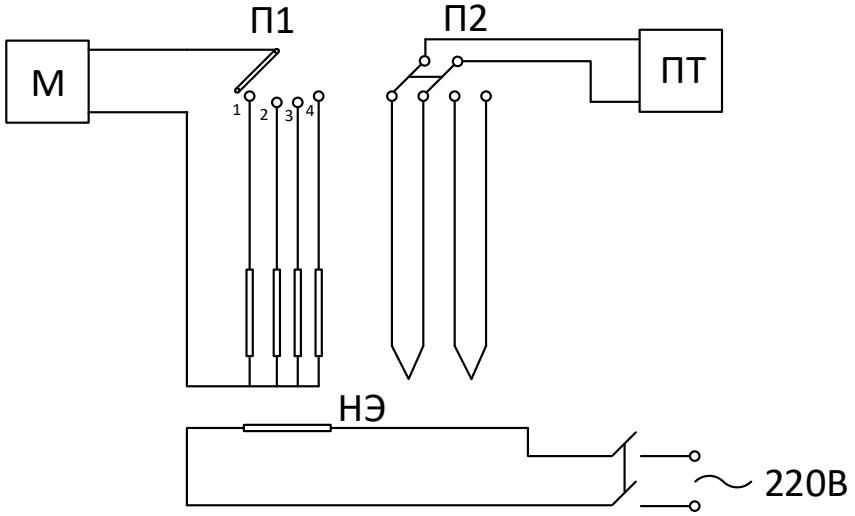


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки, предназначенной для исследования свойств металлов

Алгоритм выполнения работы

1. Перед выполнением работы необходимо изучить теоретический материал и ответить на контрольные вопросы. Следует также уяснить цели эксперимента и подготовить все необходимое для его выполнения.

2. Определить температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ для металлов, образцы которых указаны преподавателем.

2.1. Собрать схему и с помощью моста М произвести измерения сопротивления образцов при комнатной температуре (при отключенном

термостате). Измерения мостом следует проводить в соответствии с инструкцией по его эксплуатации.

Результаты измерений занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты экспериментов по определению температурных коэффициентов металлов

Материал образца или термопары	20 ºС			40 ºС			…			100 ºС		
	R	ρ	V_t	R	ρ	V_t	R	ρ	V_t	R	ρ	V_t
Медь												
Алюминий												
…..												
Хромель-копель												
…..												

2.2. После выполнения измерений, указанных в п. 3.1, включить термостат и по мере его нагрева повторить измерения при 40 ºС и далее через каждые 20 ºС до 120 ºС. Результаты измерений занести в таблицу 3.2

2.3. Вычислить температурный коэффициент сопротивления α_ρ по формуле, приведенной в пояснениях к выражению (3.4).

2.4. Вычислить температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ по формуле (3.4). Результаты проверить по формуле (3.5) и занести в таблицу 3.2

3. Определить коэффициент термо-ЭДС для одной из двух термопар, указанной преподавателем

3.1. Перед выполнением п. 2.2 измерить термо-ЭДС указанной термопары с помощью потенциометра Пт. Измерения следует проводить в соответствии с инструкцией по эксплуатации потенциометра.

3.2. После включения термостата по мере его нагрева одновременно с измерениями сопротивлений проволочных образцов (п. 2.2) регистрировать величины термо-ЭДС при температурах, указанных в п. 2.2. Результаты измерений занести в таблицу 3.2

3.3. Вычислить коэффициент термо-ЭДС по формуле:

$$\alpha_T = \frac{V_{t2} - V_t}{t_2 - t_1}, \qquad (3.8)$$

где t_1 и t_2 – значения температур в диапазон выполненных измерений, t_1= 40 ºС, $t_2 = 120$ ºС; V_{t1} и V_{t2} – значения термо-ЭДС при температурах t_1 и t_2.

3.4. По данным таблицы 3.2 построить график U = f(t).

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1) изложение цели работы;
2) электрическую схему установки;
3) таблицу результатов измерений и вычислений;
4) графики зависимости $\rho(t)$ и $U(t)$;
5) выводы о работе, в которых делается обоснованное заключение о температурных характеристиках исследованных металлов.

Контрольные вопросы

1) Как объясняет зонная территория различие между электрическими свойствами металлов и кристаллических диэлектриков?
2) Почему удельное сопротивление сплавов выше, чем чистых металлов, использованных в этом же сплаве?
3) Почему с увеличением температуры сопротивление металлов возрастает?
4) Как образуется термо-ЭДС?
5) Как по экспериментальным данным определить температурные коэффициенты удельного сопротивления термо-ЭДС?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4
«ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ»

Цель работы

Изучение свойств ферромагнитных материалов и ознакомление с методами измерения магнитных характеристик; снятие основной кривой намагничивания и определение зависимости потерь в ферромагнитных материалах от частоты.

Краткие теоретические сведения

Эксплуатационные характеристики судового электрооборудования в значительной степени зависят от свойств магнитных материалов, применяемых в различных электротехнических устройствах.

Одной из основных величин, определяющих электротехнические свойства материалов, является их магнитная проницаемость. Различают абсолютную и относительную проницаемости. Абсолютная проницаемость μ_a (Гн/м) равна отношению магнитной индукции к величине напряженности магнитного поля в данном материале:

$$\mu_a = B/H, \tag{4.1}$$

где B − магнитная индукция, Тл; H − напряженность магнитного поля, А/м.

Относительная магнитная проницаемость, или просто магнитная проницаемость μ равна отношению μ_a к магнитной постоянной (проницаемости вакуума $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, т. е. $\mu = \mu_a / \mu_o$).

По величине магнитной проницаемости μ все материалы делятся на три группы:

1) диамагнетики ($\mu < 1$);

2) парамагнетики ($\mu > 1$);

3) ферромагнетики ($\mu >> 1$).

Однако часто материалы делятся только на две группы: 1) магнитные ($\mu >> 1$) и 2) немагнитные ($\mu \approx 1$).

Кроме того, согласно ГОСТ 19693, предлагаются следующие определения магнитных материалов. Диамагнетик − вещество, атомы, ионы или молекулы которого не имеют результирующего магнитного момента при отсутствии внешнего магнитного поля. Парамагнетик − вещество, атомы, ионы или молекулы которого имеют результирующий магнитный момент при отсутствии внешнего магнитного поля. Ферромагнетик − кристаллическое вещество, в котором магнитные моменты атомов или ионов находятся в состоянии самопроизвольного магнитного упорядочения, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля.

Наиболее существенной особенностью ферромагнитных материалов является нелинейность их характеристик, в частности, зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля $B = f(H)$. Вид этой характеристики приведен на рисунке 4.1.

Если величину H медленно изменять по синусоидному закону и плавно увеличивать максимальную напряженность H_m, то зависимость $B = f(H)$ будет представлять расширяющуюся петлю гистерезиса. При больших значениях H восходящая и нисходящая ветви гистерезисной петли практически сливаются. Геометрическое место вершин гистерезисных петель называется основной кривой намагничивания. Она приведена на рисунках 4.1 и 4.2.

Образец, намагниченный до насыщения и затем вынесенный из магнитного поля, сохраняет определенное значение остаточной индукции $B_г$. Устранить ее можно путем приложения обратного магнитного поля с напряженностью H_c, величина которого называется коэрцитивной силой. Величины $B_г$ и H_c показаны на рисунке 4.1.

Другой важной характеристикой ферромагнитного материала, также имеющей нелинейный характер, является зависимость магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля $\mu = f(H)$. На рисунке 4.2 приведена характеристика, построенная на основной кривой намагничивания.

На ней можно указать отдельные важнейшие значения магнитной проницаемости – начальное $\mu_{нач.}$ и максимальное $\mu_{макс}$. При выборе геометрических размеров магнитопровода желательно, чтобы величины B и H соответствовали максимальному значению магнитной проницаемости.

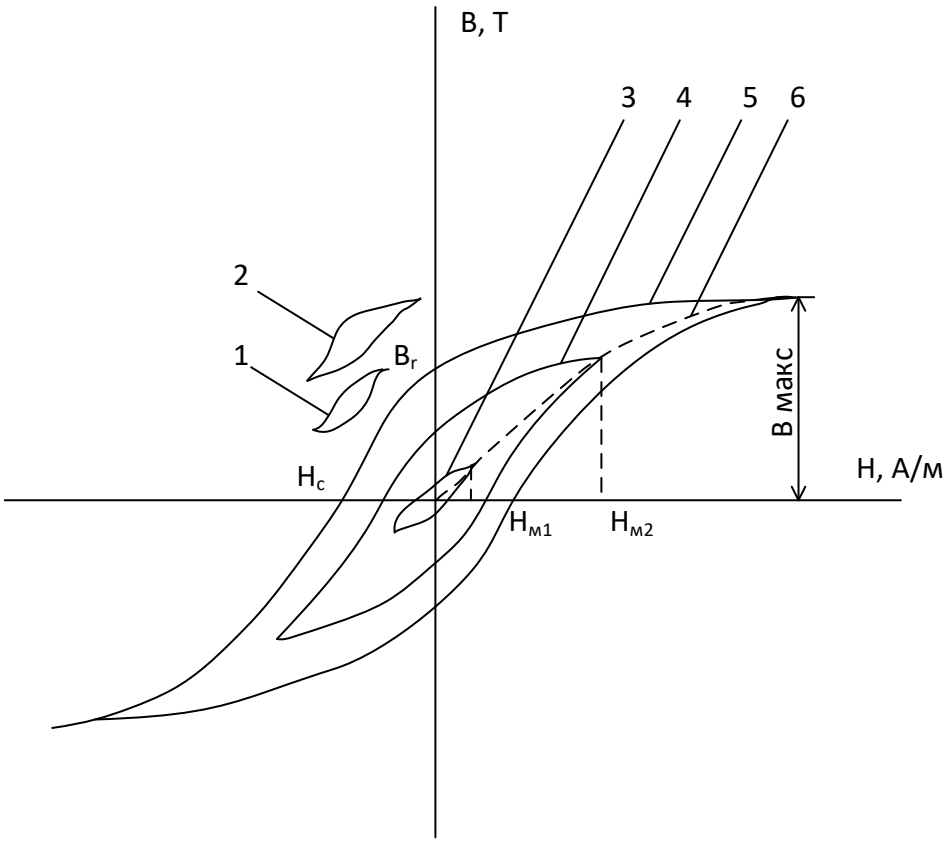


Рисунок 4.1 - Гистерезисные петли и основная кривая намагничивания:
1, 2 – частичные несимметричные циклы, возникающие при наложении синусоидально изменяющейся напряженности на постоянное значение H; 3, 4 – симметричные гистерезисной петли при различных максимальных значениях синусоидально изменяющейся напряженности; 5 – предельный цикл; 6 – основная кривая намагничивания

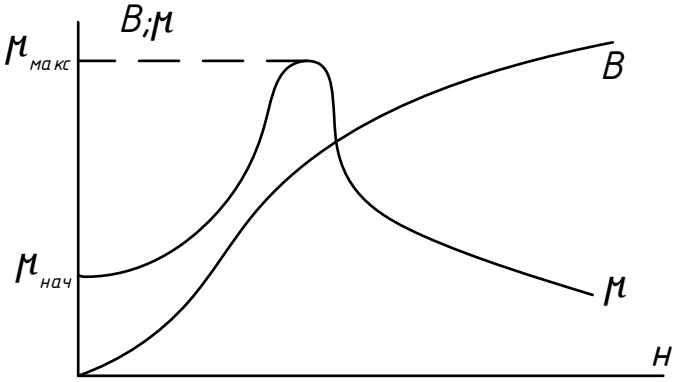


Рисунок 4.2 – Зависимость магнитной индукции и магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля

Нелинейность характеристик ферромагнетиков объясняется их строением. Явление ферромагнетизма связано с образованием в некоторых материалах таких кристаллических структур, называемых магнитными доменами, внутри которых электронные спины ориентированы одинаково.. Внутри материала направления магнитных моментов могут быть самыми различными. Магнитный поток такого материала близок к нулю из-за взаимной компенсации магнитных полей отдельных доменов. Наложение внешнего магнитного поля приводит, во-первых, к ориентированию отдельных доменов вдоль поля и, во-вторых, к увеличению размеров доменов, направление магнитного поля которых составляет небольшой угол с направлением внешнего поля. В результате происходит намагничивание материала. Магнитное насыщение проявится, когда прекратится рост доменов и завершится поворот магнитных моментов всех микростатических областей материала.

Площадь, огибаемая гистерезисной петлей, пропорциональна потерям, выделяющимся в ферромагнитных материалах. Сумму потерь разделяют на две составляющие: потери на перемагничивание (на гистерезисе) $P_г$ и динамические потери, возникающие в основном от вихревых токов $P_в$. Первая из указанных составляющих определяется по формуле (4.2).

$$P_г = \eta \cdot B_{макс}^{n} \cdot Q \cdot f, \qquad (4.2)$$

где η − коэффициент, определяемый свойствами ферромагнитного материала; $B_{макс}$ − максимальная магнитная индукция в цикле перемагничивания; $n = 1.6 \div 2$ – показатель степени; Q − вес ферромагнетика; f − частота тока.

Вторая составляющая вычисляется по формуле:

$$P_г = \xi \cdot B_{макс}^{2} \cdot Q \cdot f^{2}, \qquad (4.3)$$

где ξ − коэффициент, определяемый удельным электрическим опротивлением и формой образца.

$P_г = F(f)$ и $P_в = F(f)$.

Частотные зависимости приведены на рисунке 4.3.

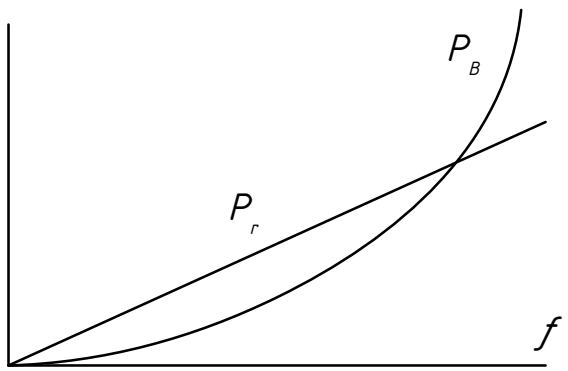


Рисунок 4.3 – Зависимости магнитных потерь от частоты

При малых частотах потерями от вихревых токов по сравнению с потерями на перемагничивание можно пренебречь. С увеличением частоты доля динамических потерь быстро растет, и это приводит к увеличению площади гистерезисной петли.

План проведения занятия:

– ознакомиться с лабораторной установкой, прослушать инструктаж по технике безопасности и особенностям выполнения экспериментальной части занятия, собрать необходимые схемы;

– выполнить эксперимент;

– обработать результаты эксперимента и подготовить отчёт;

– подготовить ответы на контрольные вопросы.

Описание экспериментальной установки, перечень приборов и оборудования

В лабораторной работе для получения кривых намагничивания ферромагнитных материалов используется осциллографический метод. На экране осциллографа, подключенного к экспериментальной установке по схеме, представленной на рисунке 4.4, появляется петля, площадь которой пропорциональна потерям при одном цикле перемагничивания. При этом в широком диапазоне частот гистерезисная составляющая потерь за один цикл перемагничивания не зависит от частоты, а составляющая потерь от вихревых токов пропорциональна частоте. Это проявляется, в частности, в изменении форм гистерезисной петли. При высоких частотах исчезают участки насыщения, и петля приобретает форму эллипса.

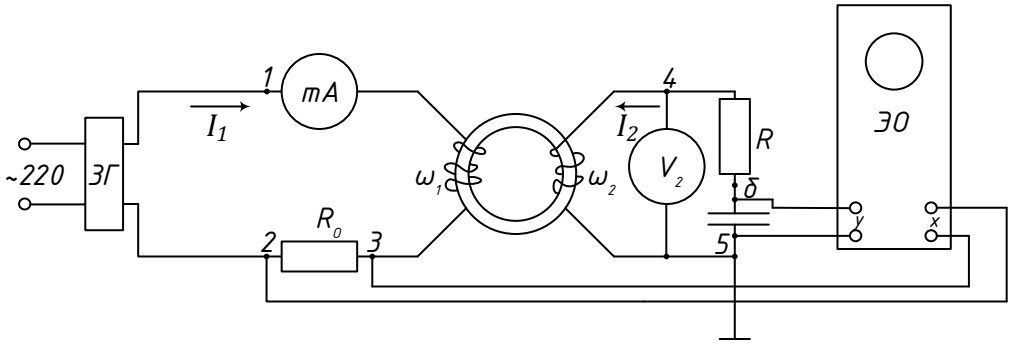


Рисунок 4.4 – Схема экспериментальной установки для исследования ферромагнитных материалов осциллографическим методом

Ниже перечисляется оборудование, использованное в установке:

Зг – источник напряжения; генератор звуковых частот;

mA – миллиамперметр;

V – вольтметр;

ЭО – электронный осциллограф;

R_o – образцовый резистор, напряжение на котором пропорционально току обмотки w_1 образца ферромагнитного материала, это напряжение подается на вход X осциллографа;

R_n и C– интегрирующая цепь;

C – конденсатор, сдвигающий сигнал на $\varphi = \frac{\pi}{2}$, подаваемый с обмотки образца w_2 через делитель на вход Y осциллографа.

Опыты по изучению свойств ферромагнитных материалов проводятся на образцах, имеющих первичную и вторичную обмотки. При протекании синусоидального тока I_1 по первичной обмотке, содержащей w_1 витков, она создает намагничивающую силу F_1 и обусловливает возникновение максимальной напряженности магнитного поля в образце $H_м$, А/м.

$$H=\frac{\sqrt{2}\cdot F_1}{l}, \tag{4.4}$$

где l – длина средней магнитной линии образца, м; $F_1 = I_1 w_1$ – действующее значение намагничивающей силы, А.

Из выражения (4.4) видно, что ток I_1 пропорционален $H_м$. Поэтому, подавая на вход X осциллографа сигнал, пропорциональный току, можно считать, что осциллограф регистрирует напряженность $H_м$, но в другом масштабе.

На пластины Y вертикального отклонения луча осциллографа следует подать сигнал, пропорциональный магнитной индукции B, тогда на экране появится гистерезисная петля. Для этого используется вторичная обмотка образца с числом витков w_2. Возникающая в этой обмотке ЭДС e_2 пропорциональна скорости изменения магнитной индукции.

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = -w_2 S \frac{dB}{dt}, \tag{4.5}$$

где $\Phi = BS$ – магнитный поток, проходящий по образцу, Вб; S – поперечное сечение магнитного образца, м^2; t – время, с.

Можно считать снимаемое со вторичной обмотки напряжение равным ЭДС, т.е. $u_2 = e_2$.

Интегрируя напряжение u_2 с помощью RC-цепочки, можно получить сигнал, пропорциональный магнитной индукции B.

Максимальное значение напряжения U_2 м равно:

$$U_2 = 4.44 f \cdot w_2 \cdot \Phi_m, \tag{4.6}$$

где f – частота, Гц; Φ_m – амплитуда магнитного потока, Вб.

Отсюда максимальное значение магнитной индукции равно:

$$B = \frac{U_2 \cdot \sqrt{2}}{4.44 f \cdot w_2 \cdot S}. \quad (4.7)$$

Магнитная проницаемость определяется из выражения:

$$\mu = \frac{B_m}{\mu_o \cdot H_m}, \quad (4.8)$$

где μ_o – магнитная постоянная, равная $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Для получения ряда петель различной ширины следует изменять напряжение источника U_2. В качестве источника используется генератор регулируемой частоты.

Алгоритм выполнения работы

1. Перед выполнением работы необходимо уяснить ее цели, изучить теоретический материал и ответить на контрольные вопросы, ознакомиться с оборудованием и методикой проведения экспериментов.

2. Подготовить экспериментальную установку.

2.1. Собрать экспериментальную установку (рисунок 4.4) и присоединить к ней образец № 1.

2.2. Включить и настроить осциллограф.

2.3. Включить звуковой генератор и установить частоту выходного сигнала 50 Гц.

3. Снять основную кривую намагничивания и зависимость $\mu = f(H)$ при частоте 50 Гц.

3.1. Изменяя ток намагничивания I_1, снять показания миллиамперметра и вольтметра. Результаты измерений занести в таблицу 4.1.

3.2. Вычислить значения H_m, B_m и μ. При вычислениях использовать данные образцов, приведенные в таблице 4.2.

3.3. По указанию преподавателя заменить образец № 1 образцом № 2 или № 3. Повторить эксперимент, его результаты занести в таблицу 4.1.

3.4. По результатам вычислений, сведенных в таблице 4.1, построить графики зависимостей $B = f(H)$, $\mu = f(H)$.

4. Определить магнитные потери в образцах.

4.1. Присоединить к экспериментальной установке образец № 1.

4.2. Настроить звуковой генератор и осциллограф таким образом, чтобы при частоте 50 Гц размеры гистерезисной петли на экране были удобны для срисовывания и вычисления ее площади. В дальнейшем положение рукояток настройки осциллографа сохранять без изменений.

Таблица 4.1 – Результаты экспериментального определения зависимостей B = *f*(H) и μ = *f*(H).

№ опыта	№ образца	Данные измерений		Результаты вычислений		
		Ток I, A	Напряжение U_2, B	Макс. напряжен. H_m, A/м	Макс. индук-ция B_m, т	Магн. прон. μ
1	1					
2	1					
3	1					
4	1					
5	2					
6	2					
7	2					
8	2					

Таблица 4.2 – Данные образцов, используемых в лабораторной работе

№ об-разца	Наименование материала, тип	S, м^2	w_1	w_2	l_1, м	Масса образца, Q, кг	Удель-ный 10^{-3} кг/м^3
1	Электротехническая сталь	25 мм^2	200	250	1	0,05	7700
2	Пермаллой	25 мм^2	160	220	1	0,05	
3	Феррит	25 мм^2	100	100	1	0,05	

4.3. Определить масштабы горизонтального и вертикального отклонений луча осциллографа по формулам:

$$m_x = \frac{H_m}{X}, \frac{\text{А}}{\text{м}^2}; \quad m_y = \frac{B_m}{Y}, \frac{\text{Т}}{\text{м}^2}, \tag{4.9}$$

где X и Y – отклонения луча соответственно по горизонтали и вертикали от нулевого значения.

4.4. Измерить площадь гистерезисной петли. Результаты занести в отчет.

4.5. Определить удельные потери материалов по формуле:

$$P_{\text{уд}} = \frac{F * m_x * m_y * f}{\gamma}, \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}, \tag{4.10}$$

где F – площадь гистерезисной петли, м^2; f – частота, Гц; γ – удельный вес материала, кг/м^3.

4.6. Определить магнитные потери в образце по формуле:

$$P_{\text{М}} = P_{\text{Г}} + P_{\text{В}} = P_{\text{уд}} * Q, \text{Вт}, \tag{4.11}$$

где Q – вес образца, кг.

4.7. Опыт повторить при частоте 1000 Гц, установленной с помощью регулятора частот звукового генератора ЗГ.

4.8. Провести вычисления магнитных потерь при указанной частоте и сопоставить их с потерями при частоте 50 Гц.

Содержание отчета

Отчет должен включать:

1) изложение цели работы;
2) электрическую схему установки;
3) таблицы измерений и вычислений;
4) рисунки гистерезисных петель;
5) графики $B = f(H),\ \mu = f(H)$;
6) выводы о влиянии различных факторов на величину магнитных потерь.

Перечень вопросов для самопроверки

1. Какие материалы называют магнитными? Какое свойство наиболее характерно для них?
2. Как происходит процесс намагничивания магнитных материалов? Имеется ли аналогия между сегнетоэлектриками и ферромагнетиками? В чем конкретно она проявляется?
3. Какие виды гистерезисных петель могут появиться на экране осциллографа?
4. Как проводят исследования магнитных материалов осциллографическим методом?
5. Какие материалы называют магнитомягкими и магнитотвердыми и какова область их применения?
6. Какие виды потерь возникают при перемагничивании магнитных материалов и как связаны их величины с частотой изменения поля?

Рекомендуемая литература

1. Привалов, Е. Е. Электротехническое материаловедение: учеб. пособие / Е. Е. Привалов. − Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2015. − 234 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).

2. Привалов, Е. Е. Основы электроматериаловедения: учеб. пособие / Е. Е. Привалов. − 2-е изд., стер. − Москва; Берлин: Директ-Медиа, 2017. − 301 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).

Приложение А

Форма отчета по лабораторной работе

Образец титульного листа

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт морских технологий, энергетики и строительства
Кафедра энергетики

ОТЧЕТ О ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

«Наименование лабораторной работы»

по дисциплине «Электротехнические материалы»
направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Работу выполнили:
студенты гр. ХХ-ЭЭ
Фамилия И.О.
Фамилия И.О.
Фамилия И.О.

Калининград
202Х

Требования к содержанию и оформлению отчета

Отчет по лабораторной работе должен отражать основные результаты, полученные в ходе экспериментального и аналитического исследования, и выводы о характере и причинах полученных зависимостей. Отчет выполняется по указанию преподавателя индивидуально каждым студентом либо в форме общего отчета на бригаду студентов, совместно проводивших экспериментальное исследование на одной установке.

Отчет должен содержать (если иное не оговорено преподавателем):

1) Цель работы;

2) Описание лабораторной установки и хода эксперимента;

3) Численные результаты экспериментального исследования и их графическую интерпретацию;

4) Формулы, расчеты, численные результаты аналитического исследования и их графическую интерпретацию;

5) Сопоставление результатов экспериментального и аналитического исследования, в том числе графическое;

6) Выводы о проделанной работе, содержащие анализ полученных результатов, причины зарегистрированных процессов и расхождений в экспериментальных и аналитических данных.

Отчет оформляется в электронном виде в соответствии с требованиями ГОСТ 2.105-95. На все рисунки и таблицы должны быть ссылки в тексте, например, «(рисунок 1)», «приведены в таблице 2». Подписи таблиц и рисунков выполняются по форме «Таблица 1 – Название» (над таблицей, выравнивание по левому краю без отступа), «Рисунок 1 – Название» (под рисунком, выравнивание по середине без отступа). При подготовке рисунков и схем рекомендуется использовать редактор MS Visio. Построение диаграмм (графиков) рекомендуется выполнять посредством MS Excel, Mathcad или аналогичных программ.

Общие требования к оформлению документа:

Шрифт Times New Roman, размер 12.

Выравнивание текста по ширине

Межстрочный интервал – 1,15

Отступ первой строки абзаца – 1,25 см

Выравнивание рисунков – по центру без отступа

Выравнивание таблиц – по ширине окна, без отступа

Внедрение формул через редактор формул.

Локальный электронный методический материал

Илья Евгеньевич Кажекин

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Редактор Э. С. Круглова

Уч.-изд. л. 2,5. Печ. л. 2,4

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Калининградский государственный технический университет».
236022, Калининград, Советский проспект, 1