

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Т. М. Ткаченко, С. С. Нефедов, С. М. Барайшук

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ
И КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по аграрному техническому образованию
в качестве учебно-методического пособия
для студентов учреждений высшего образования
по специальности 1-74 06 05 «Энергетическое обеспечение
сельского хозяйства (по направлениям)»*

Минск
БГАТУ
2021

УДК 621.31(07)
ББК 31.26я7
Т48

Рецензенты:
кафедра физики и методики преподавания физики
УО «Белорусский государственный
педагогический университет им. Максима Танка»
(доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой *В. Р. Соболев*);
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник ГО «НПЦ НАН Беларуси
по материаловедению» *Т. В. Шёлковая*

Ткаченко, Т. М.

Т48 Электротехнические и конструкционные материалы.
Лабораторный практикум : учебно-методическое пособие /
Т. М. Ткаченко, С. С. Нефедов, С. М. Барайшук. – Минск : БГАТУ,
2021. – 84 с.
ISBN 978-985-25-0119-4.

Лабораторный практикум содержит методические указания по выполнению и оформлению работ, контрольные вопросы и теоретические материалы.

Предназначен для студентов, обучающихся по специальности 1-74 06 05 «Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (по направлениям)», может быть полезен инженерам-электрикам, занятым эксплуатацией электротехнологического оборудования.

УДК 621.31(07)
ББК 31.26я7

ISBN 978-985-25-0119-4

© БГАТУ, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ОБЩИЕ ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	5
Лабораторная работа № 1. ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРОБОЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ	6
Лабораторная работа № 2. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ	21
Лабораторная работа № 3. ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ	32
Лабораторная работа № 4. ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ	45
Лабораторная работа № 5. ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ ОТ ОСВЕЩЕННОСТИ.....	56
Лабораторная работа № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТОМЯГКИХ ФЕРРИТОВ	66
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	81

ВВЕДЕНИЕ

Специалист, работающий в области электротехники, должен знать перечень основных электрических, магнитных, механических и других характеристик, которыми обладают материалы. При изготовлении, монтаже и ремонте электротехнического оборудования используются детали и узлы, выполненные из материалов определенных классов и обладающие конкретными электрическими и магнитными характеристиками, для несущих деталей – и механическими характеристиками. Зная для каждого класса материалов перечень этих характеристик, необходимо знать единицы их измерения и порядок величины, а также то, как (и почему) эти характеристики изменяются под действием температуры, величины и частоты напряжения, механической нагрузки и т. д.

В 6 лабораторных работах практикума рассматриваются основы физических явлений, происходящих в диэлектриках, проводниках и полупроводниках. Приводятся способы электрических и магнитных испытаний материалов: испытания на пробой диэлектриков, определение удельных объемного и поверхностного сопротивлений твердых диэлектриков. Изучаются способы оценки температурного коэффициента удельного сопротивления металлов различных групп, а также поведение различных простейших полупроводниковых компонентов в зависимости от влияния внешних факторов – света и температуры. На примере образцов магнитомягких ферритов изучается явление магнитного гистерезиса и способы оценки величин коэрцитивной силы и магнитной проницаемости магнитного материала.

ОБЩИЕ ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторные работы по дисциплине «Электротехнические и конструкционные материалы» выполняются на установках, подключаемых к электрической сети с напряжением 220 В. Для безопасного проведения лабораторных работ необходима предварительная подготовка студентов, включающая в себя ознакомление с целью и содержанием работы, относящимися к ней теоретическими положениями, описанием соответствующей лабораторной установки и методикой проведения эксперимента. На этапе подготовки к работе студенты должны продумать план ее проведения не только с точки зрения получения экспериментальных данных, но и наметить план ее безопасного выполнения. Требования инструкции по охране труда являются обязательными для преподавателя, студентов, слушателей и работников, и невыполнение этих требований рассматривается как нарушение трудовой дисциплины. Инструктаж должен подтверждаться личной подписью инструктируемого в журнале регистрации инструктажа на рабочем месте с указанием даты инструктажа, даты проведения, подписи инструктирующего.

Запрещается входить в кабинет в головном уборе и верхней одежде; курить, принимать пищу в кабинете. Лабораторные работы должны выполняться только по инструкциям, приведенным в методических указаниях к работам. При получении травмы или недомогании прекратить работу, сообщить об этом преподавателю, заведующему кафедрой и немедленно обратиться в медпункт.

Запрещается: выполнять работы одиночно или не в своей бригаде; включать под напряжение схему, не проверенную лаборантом или преподавателем, ведущим занятие, а также оставлять включенную схему без надзора; касаться изолированных проводников или частей аппаратуры, находящихся под напряжением.

Лабораторная работа № 1 ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРОБОЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: изучить явление пробоя жидких и газообразных диэлектриков.

Задачи работы:

1. Изучить характеристики трансформаторного масла и его образцы. Определить электрическую прочность трансформаторного масла.
2. Получить зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами в однородном и неоднородном электрических полях.

Краткие теоретические сведения

Диэлектрики – материалы, способные поляризоваться, т. е. способные создавать электростатическое поле.

По механизму поляризации диэлектрики делят на *пассивные* (линейные), поляризующиеся только во внешнем электрическом поле, и *активные* (нелинейные), способные поляризоваться и в поле, и без него.

Пассивные (линейные) диэлектрики применяются в качестве электроизоляционных материалов (ЭИМ). Находясь во внешнем электрическом поле, они могут потерять изоляционные свойства, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение.

Пробой – явление образования токопроводящего канала в диэлектрике под действием электрического поля.

Минимальное приложенное к диэлектрику напряжение, приводящее к его пробую, называется пробивным напряжением $U_{пр}$.

Значение пробивного напряжения зависит от толщины h диэлектрика и формы электрического поля, обусловленной конфигурацией электродов и самого диэлектрика. Таким образом, значение пробивного напряжения характеризует не столько свойства материала, сколько способность конкретного образца противостоять конкретному электрическому полю.

Для сравнения свойств различных материалов более удобной характеристикой является электрическая прочность.

Электрическая прочность – минимальная напряженность однородного электрического поля $E_{\text{пр}}$ (кВ/мм), приводящая к пробое диэлектрика:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h}.$$

Время, проходящее от включения напряжения до полного разрушения диэлектрика в электрическом поле, называют временем жизни, долговечностью или сроком службы. Ограниченное время жизни диэлектрика связано с тем, что в результате длительного воздействия электрического поля, особенно при повышенной температуре, основные свойства диэлектриков постепенно ухудшаются. Происходит старение диэлектрика (или деградация).

Старение материала (в общем случае) – ухудшение его начальных свойств под действием физических, химических или биологических факторов.

Электрическое старение – ухудшение электрических свойств диэлектрика при длительном воздействии электрического поля.

Старение является подготовительной стадией пробоя.

По природе процессов, определяющих развитие подготовительной стадии пробоя, различают три основных механизма пробоя:

- электрический,
- тепловой,
- электрохимический.

1. **Электрический пробой** обусловлен явлениями ударной ионизации и фотоионизации. Такой пробой характерен для газов, но может происходить и в неполярных жидких и твердых диэлектриках. Пробивная напряженность при электрическом пробое зависит от плотности диэлектрика и степени однородности электрического поля. В однородном поле пробой газа наступает при более высоком значении $E_{\text{пр}}$, чем в неоднородном поле.

2. **Тепловой пробой** характерен для твердых диэлектриков и обусловлен чрезмерным выделением тепла из-за больших электрических потерь. При этом в диэлектрике происходят необратимые процессы термического разрушения материала (обугливание, растрескивание, оплавление и т. д.), в результате чего растет ток сквозной проводимости. Для теплового пробоя характерна сильная

зависимость $E_{пр}$ от температуры, частоты тока, размеров детали и условий ее охлаждения.

3. *Электрохимический пробой* обусловлен развитием в диэлектрике химических процессов, ведущих к образованию подвижных ионов. Эта форма пробоя в основном характерна для жидких диэлектриков, содержащих небольшие количества примесей электролита.

Каждый из указанных механизмов пробоя может произойти в одном и том же диэлектрике в зависимости:

- от характера электрического поля, в котором он находится – постоянного или переменного, импульсного, низко- или высоко- частотного;
- времени воздействия напряжения;
- однородности диэлектрика – наличия в нем дефектов;
- толщины слоя диэлектрика;
- температуры и т. д.

Поверхностный пробой иногда рассматривают отдельно. Это не особый вид пробоя, а комплексное явление, когда пробой газа происходит вблизи поверхности твердой изоляции. Сама твердая изоляция в этот момент не пробивается, однако ее электротехнические характеристики значительно ухудшаются.

После снятия напряжения пробоя:

- в газообразном диэлектрике пробитый участок, благодаря высокой подвижности молекул, восстанавливает свою электрическую прочность;
- жидкие диэлектрики также восстанавливаются, но в большинстве случаев не полностью;
- пробой твердых диэлектриков ведет к их полному разрушению.

Пробой жидкостей

Изоляционные жидкости используются во многих видах высоковольтного электрооборудования – трансформаторах, коммутационных аппаратах, конденсаторах, кабелях. В них изоляционные жидкости выполняют, как правило, две основные функции – диэлектрика и охладителя. Применение электроизоляционных жидкостей позволяет обеспечить надежную и длительную работу электрической изоляции находящихся под напряжением элементов

конструкции и отводить от них теплоту, выделяющуюся при работе. Различают:

- природные (нефтяные и растительные) изоляционные жидкости;
- синтетические изоляционные жидкости (кремнийорганические или фторорганические жидкости, хлорорганическая – совол, различного рода производные на ароматической основе, сложные эфиры различных типов, полиизобутилены и пр.).

В электротехнике в качестве жидкого диэлектрика широкое применение получило трансформаторное масло – продукт нефтепереработки.

Трансформаторное масло – жидкость от почти бесцветного до темно-желтого цвета, по химическому составу представляющая собой смесь различных углеводородов.

Трансформаторное масло используется в силовом трансформаторе; оно заполняет поры в волокнистой изоляции, а также промежутки между проводами обмоток и между обмотками и баком трансформатора, при этом значительно повышая электрическую прочность изоляции. Кроме того, трансформаторное масло улучшает отвод теплоты, выделяемой за счет потерь в обмотках и сердечнике трансформатора.

Трансформаторное масло используется также в масляных выключателях высокого напряжения. В этих аппаратах гашение электрической дуги между расходящимися контактами выключателя происходит в масле или в находящихся под повышенным давлением газах, выделяемых маслом под действием высокой температуры дуги. Это способствует охлаждению канала дуги и быстрому ее гашению. Трансформаторное масло применяется также для заполнения маслonaполненных вводов, некоторых типов реакторов, реостатов и других электрических аппаратов.

Достоинства трансформаторного масла:

- 1) высокая электрическая прочность,
- 2) доступность и малая стоимость.

Недостатки:

- 1) пожароопасность;
- 2) взрывоопасность: под действием высоких температур масло разлагается с образованием: водорода – 70 % (по объему), ацетилена – 22 %, метана – 5 %, этилена – 3 %. В смеси с воздухом при некотором определенном соотношении объемов этих газов образуется взрывчатая смесь;

3) высокая гигроскопичность: масло достаточно легко воспринимает влагу. Причем, вода в масле может быть в различных видах: в растворе, в виде мельчайших взвешенных капелек (эмульсия) или избыточной воды, которая не смешивается с маслом и осаждается на дно сосуда. Примесь воды в количестве до 0,01 % (особенно в виде эмульсии) снижает электрическую прочность масла настолько, что делает его непригодным для работы в электрических аппаратах даже при низком напряжении. Такая большая зависимость электрической прочности масла от содержания влаги объясняется тем, что диэлектрическая проницаемость воды (около 80,0) значительно больше, чем масла (2,1–2,4). Под влиянием сил электрического поля капельки воды приобретают удлинненную форму в направлении силовых линий и втягиваются в места с наибольшей напряженностью поля. Волокнистые примеси еще в большей степени снижают электрическую прочность масла. Они более гигроскопичны, чем масло, интенсивно впитывают воду и становятся при этом полупроводящими частицами;

4) недостаточная стабильность: с течением времени, особенно в работающем аппарате, качество даже совершенно чистого масла ухудшается. В результате действия температуры, влияния воздуха (озона), соприкосновения масла с металлами появляются продукты распада. Масло теряет свою прозрачность, темнеет, в нем появляются механические примеси, взвешенный углерод, вода, кислоты, смолы. Масло стареет. Взвешенный углерод хорошо проводит ток. Кроме того, частицы угля оседают на изоляторах или на других погруженных в масло деталях масляного выключателя, создают проводящий слой, который может быть причиной перекрытия и короткого замыкания. Растворенные в масле кислые вещества действуют на твердую изоляцию (бумагу, картон, пряжу и пр.) и металлы (стенки бака, припой, медь, алюминий). Осадки могут покрыть сплошным слоем систему охлаждения трансформатора, чем ухудшают условия охлаждения, приводят к повышению температуры обмоток и порчи изоляции. При этом продукты начавшегося старения приводят к ускорению старения масла. Старение масла является подготовительной стадией пробоя.

Трансформаторное масло с ухудшенными характеристиками может быть восстановлено методами сушки, очистки и регенерации.

Очистка масла от воды и механических примесей производится пропусканием под давлением сквозь фильтровальную бумагу в фильтр-прессах, воздействием центробежной силы в центрифуге, распылением нагретого масла в камере, заполненной азотом и т. п.

Регенерация – удаление из масла продуктов старения и восстановление исходных свойств, которое достигается обработкой адсорбентами (вещества с сильно развитой поверхностью, которые поглощают воду и полярные примеси).

Свойства и характеристики используемого в технике масла должны отвечать требованиям стандарта. Трансформаторное масло при хранении и в процессе эксплуатации периодически подвергается испытаниям.

Испытания разделяют на два вида:

А. На пробой (определение электрической прочности, наличия влаги, наличия механических примесей, содержания взвешенного углерода).

Б. Сокращенный анализ, который включает все пункты первого вида испытаний и дополнительно – определение температуры вспышки паров, содержания органических кислот и щелочей.

Масло трансформаторов подвергается испытаниям в соответствии с требованиями нормативных документов и в следующие сроки:

1. Не реже одного раза в 3 года у трансформаторов, работающих с термосифонным фильтром (сокращенный анализ).

2. Один раз в год для трансформаторов, работающих без термосифонного фильтра (сокращенный анализ).

3. После капитальных ремонтов.

Основные свойства качественного трансформаторного масла приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Нормированные характеристики трансформаторного масла

Характеристики	Нормированное значение	Единицы измерения
Цвет	Желтый	
Удельное объемное сопротивление	$10^{14}-10^{15}$	Ом·м
Плотность при 20 °С	0,88	г/см ³

Характеристики	Нормированное значение	Единицы измерения
Тангенс угла диэлектрических потерь при 20 °С и 50 Гц (не более)	0,003	–
Диэлектрическая проницаемость	2,1–2,4	–
Электрическая прочность при 20 °С и 50 Гц (не ниже)	18	кВ/мм
Рабочая температура	95	°С
Температура вспышки паров	135	°С
Температура застывания (не выше)	–45	°С
Температурный коэффициент расширения	0,0007	1/°С
Коэффициент теплопроводности при 20 °С–90 °С	0,11	Вт/(м· °С)
Кинематическая вязкость (не более): при 20 °С	30	мм ² /с
при 50 °С	90	

Методика определения электрической прочности трансформаторного масла. Методика определения электрической прочности трансформаторного масла строго стандартизирована и включает следующие условия:

1. Пробу масла следует брать в абсолютно чистую и сухую стеклянную или алюминиевую посуду, закрывать стеклянной пробкой. При взятии пробы сначала сливают отстой и эмульсию, посуду прополаскивают несколько раз.

2. Используются абсолютно чистые и сухие сосуд и электроды, после чистки и промывки нельзя прикасаться к их внутренней поверхности.

3. Используются латунные или медные шлифованные полусферические электроды диаметром 25 мм.

4. Разрядный промежуток устанавливается равным 2,5 мм.

5. Испытуемое масло берется в объеме 100–200 см³.

6. Напряжение должно подниматься со скоростью не более 1,0–1,5 кВ/с.

7. Следует делать шесть пробоев, первый из которых не учитывается при расчете среднего значения пробивного напряжения.

Пробой газов

Для газов характерен только электрический пробой. В газах присутствует незначительное число электронов и ионов, возникших в результате начальной ионизации (в результате внешних воздействий). При наложении внешнего электрического поля происходит ударная ионизация газа, которая вызывает лавинообразное размножение заряженных частиц. Лавина распространяется к аноду со скоростью около 10^5 м/с и вблизи анода достигает своего наибольшего развития. Однако прорастание одной электронной лавины еще не приводит к формированию проводящего канала, поскольку образовавшиеся электроны быстро уходят из разрядного промежутка на анод. Для полного развития пробоя ударной ионизации должны сопутствовать другие процессы, обеспечивающие восполнение и накопление числа заряженных частиц между электродами. В зависимости от характера этих сопутствующих процессов в газах различают лавинный и лавинно-стримерный пробой.

Лавинный пробой характеризуется вторичными процессами на катоде. Ионная бомбардировка поверхности катода приводит к выбиванию вторичных электронов (ионная ударная ионизация). Вторичные электроны, ускоряясь полем, образуют новые, более интенсивные лавины. Время формирования лавинного пробоя составляет 10^{-5} – 10^{-4} с.

Лавинно-стримерный пробой развивается за время 10^{-7} – 10^{-6} с, т. е. гораздо быстрее лавинного. Отличие этого вида пробоя газов в том, что часть электронов, ускоренных электрическим полем, при столкновениях с молекулами газа не ионизирует их, а переводит в возбужденное состояние, затем такая возбужденная частица, возвращаясь в основное состояние, испускает фотон. Фотоны распространяются во все стороны, в том числе по пути следования основной электронной лавины. Отдельные лавины нагоняют друг друга и сливаются в сплошной канал ионизированного газа – стример. От катода распространяется мощная электронная волна, которая проявляется в виде искры. Образовавшаяся искра может перерасти в электрическую дугу, если мощность источника питания достаточна, чтобы поддержать этот процесс.

Пробой газа в однородном и неоднородном полях протекает различно.

Однородное электрическое поле в разрядном промежутке можно получить между плоскими электродами с закругленными краями, а также между двумя сферами, если расстояние между ними не превышает их диаметра. В однородном поле пробой газа происходит внезапно, без каких-либо предварительных стадий, однако электрическая прочность газа в однородном поле не является величиной постоянной. Она зависит не только от параметров состояния газа, но и от расстояния между электродами, достигая высоких значений в малых зазорах.

Пробой газа в неоднородном поле характеризуется меньшими значениями пробивного напряжения, чем в однородном поле при одинаковых межэлектродных зазорах. Сильно неоднородное поле возникает между двумя остриями, острием и плоскостью, между двумя проводами и т. п.

Главной особенностью пробоя газа в неоднородном поле является возникновение частичного разряда, называемого короной. Корона предшествует полному разряду между электродами и возникает в местах максимальной неоднородности поля, где его напряженность в первую очередь достигает критических значений (например, вблизи острия или острой кромки электрода). При дальнейшем возрастании напряжения корона превращается в искровой разряд или в электрическую дугу.

Методика выполнения лабораторной работы

Указания к самостоятельной подготовке к занятию

1. Изучить литературу по теме лабораторной работы (электронный учебно-методический комплекс «ЭТКМ»).
2. Подготовить отчет установленной формы для выполнения лабораторной работы.

Задание 1. Изучить явления пробоя трансформаторного масла

Подготовка к работе

Испытание трансформаторного масла на электрическую прочность производится в специальном аппарате СКАТ-М100В (рисунок).

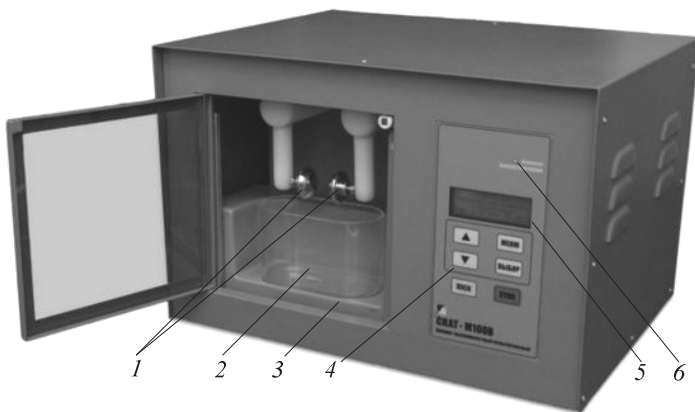


Рис. Аппарат высоковольтный испытательный SKAT-M100B:
1 – высоковольтные электроды; 2 – емкость для жидкого диэлектрика;
3 – автоматический подъемный стол; 4 – панель управления;
5 – жидкокристаллический дисплей; 6 – индикатор высокого напряжения

1. Изучить паспорт аппарата SKAT-M100B. Произвести подготовку аппарата к работе. Проверить заземление аппарата, которое должно быть выполнено гибким медным проводом сечением не менее 4 мм^2 .

Внимание! Работа без заземления запрещена.

2. Включить аппарат и произвести его настройку в соответствии с паспортом и методикой определения электрической прочности трансформаторного масла. Установленные настройки записать в отчет. Выключить аппарат.

Порядок выполнения работы

1. Залить первую пробу масла в испытательную емкость до отметки 400 мл. Установить емкость на автоматический подъемный стол и закрыть дверцу аппарата.

Внимание! Установку и выемку испытательной емкости следует производить только после выключения сетевого выключателя аппарата.

2. Включить аппарат и нажать на кнопку «ПУСК». Дальнейший процесс испытания проходит автоматически в соответствии с предварительно установленными настройками в меню аппарата.

3. По окончании испытаний занести в табл. 1.2 значения пробивного напряжения $U_{пр}$. Нажать на кнопку «▼» и занести в табл. 1.2 значения коэффициента вариации V и средней квадратичной ошибки σ_U , выведенные на дисплей аппарата.

4. Выключить аппарат, достать испытательную емкость и перелить трансформаторное масло в сосуд для хранения. Протереть испытательную емкость сухой ветошью, электроды аппарата – ветошью, смоченной обезжиривателем.

5. По заданию преподавателя произвести испытания нескольких проб трансформаторного масла в соответствии с п.п. 1–3 (повторная настройка аппарата не требуется).

6. Определить электрическую прочность $E_{пр}$ проб трансформаторного масла по формуле электрической прочности. Результаты расчета занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Электрическая прочность жидких диэлектриков

Номер пробы	h , мм	$U_{пр1}$, кВ	$U_{пр2}$, кВ	$U_{пр3}$, кВ	$U_{пр4}$, кВ	$U_{пр5}$, кВ	$U_{пр6}$, кВ	$U_{пр.ср.}$, кВ	V , %	σ_U , кВ	$E_{пр}$, кВ/мм
	2,5										
	2,5										
	2,5										

Задание 2. Изучить явления пробоя воздуха

Подготовка к работе

Изучить паспорт и инструкцию по эксплуатации аппарата АИМ–80. Произвести подготовку аппарата к работе. Проверить заземление аппарата, которое должно быть выполнено гибким медным проводом сечением не менее 4 мм².

Внимание! Работа без заземления запрещена.

Порядок выполнения работы

1. Снять зависимость напряжения пробоя $U_{пр}$ и электрической прочности $E_{пр}$ воздуха от расстояния h между электродами в однородном электрическом поле.


1.1. Установить в испытательный сосуд два полусферических электрода.

1.2. С помощью шаблона установить между осями электродов расстояние 5 мм.

1.3. Установить испытательный сосуд в аппарат АИМ-80.

Внимание! Установку и выемку испытательного сосуда следует производить только после выключения аппарата.

1.4. Включить аппарат выключателем сети «~». Проверить готовность аппарата к работе: должны гореть зеленая и желтая индикаторные лампы!

1.5. Нажать на кнопку включения испытательного напряжения «». При этом испытательное напряжение, приложенное к электродам, начнет равномерно возрастать.

1.6. Зафиксировать показание киловольтметра в момент, предшествующий пробоя. Полученное значение пробивного напряжения занести в табл. 1.3.

1.7. После пробоя дождаться возврата прибора в состояние готовности к работе (см. п. 1.4). В соответствии с п.п. 1.5–1.6 повторить измерения еще 2 раза. Результаты измерений занести в табл. 1.3.

1.8. Выключить аппарат и достать испытательный сосуд из аппарата.

1.9. В соответствии с п.п. 1.2–1.7 произвести измерения для значений расстояния между электродами 10, 15 и 20 мм. Результаты измерений занести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Зависимость напряжения пробоя и электрической прочности воздуха от расстояния между электродами в однородном электрическом поле

Расстояние между электродами h , мм	$U_{пр1}$, кВ	$U_{пр2}$, кВ	$U_{пр3}$, кВ	$U_{пр. ср.}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм
5					
10					
15					
20					

1.10. Рассчитать среднее арифметическое значение пробивного напряжения $U_{\text{пр. ср}}$. Результаты расчета занести в табл. 1.3.

1.11. Определить электрическую прочность $E_{\text{пр}}$ воздуха по формуле электрической прочности. Для расчета использовать среднее значение пробивного напряжения $U_{\text{пр. ср}}$. Результаты расчета занести в табл. 1.3.

2. Снять зависимость напряжения пробоя $U_{\text{пр}}$ и электрической прочности воздуха $E_{\text{пр}}$ от расстояния h между электродами в неоднородном электрическом поле.

2.1. Установить в испытательный сосуд электроды: 1) типа «острие» и 2) полусферический.

2.2. Произвести измерения аналогично п.п. 1.1–1.9. Результаты измерений занести в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Зависимость напряжения пробоя и электрической прочности воздуха от расстояния между электродами в неоднородном электрическом поле

Расстояние между электродами h , мм	$U_{\text{пр1}}$, кВ	$U_{\text{пр2}}$, кВ	$U_{\text{пр3}}$, кВ	$U_{\text{пр. ср}}$, кВ	$E_{\text{пр}}$, кВ/мм
5					
10					
15					
20					

2.3. Рассчитать среднее арифметическое значение пробивного напряжения $U_{\text{пр. ср}}$. Результаты расчета занести в табл. 1.4.

2.4. Определить электрическую прочность $E_{\text{пр}}$ воздуха в неоднородном электрическом поле по формуле электрической прочности. Для расчета использовать среднее значение пробивного напряжения $U_{\text{пр. ср}}$. Результаты расчета занести в табл. 1.4.

3. По данным табл. 1.3 и 1.4:

- построить графики зависимости $U_{\text{пр. ср}} = f(h)$ в однородном и неоднородном электрическом поле в одной системе координат;
- построить графики зависимости $E_{\text{пр}} = f(h)$ в однородном и неоднородном электрическом поле в одной системе координат.

Выводы

Сделать и записать выводы по результатам расчетов и построенным графическим зависимостям. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Таблицы 1.1–1.4 с результатами измерений и расчетов.
4. Расчетная формула электрической прочности.
5. Графики зависимости $U_{пр. ср} = f(h)$ и $E_{пр} = f(h)$ в однородном и неоднородном электрическом поле.
6. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Какое явление называется электрическим пробоем?
2. Дайте определение понятиям «пробивное напряжение» и «электрическая прочность».
3. В чем сущность процесса старения?
4. В чем сущность электрического, теплового и электрохимического механизмов пробоя?
5. Дайте определение понятию «поверхностный пробой».
6. Приведите примеры природных и синтетических жидких электроизоляционных материалов.
7. Как рассчитывается электрическая прочность диэлектрика?
8. Перечислите назначение и основные характеристики трансформаторного масла.
9. Перечислите достоинства и недостатки трансформаторного масла.
10. От каких факторов зависит электрическая прочность трансформаторного масла?
11. Какими способами очищают трансформаторное масло?

12. В чем сущность лавинного пробоя газообразных диэлектриков?
13. В чем сущность лавинно-стримерного пробоя газообразных диэлектриков?
14. Объясните особенности пробоя газообразных диэлектриков в однородном электрическом поле.
15. Объясните особенности пробоя газообразных диэлектриков в неоднородном электрическом поле.
16. Есть ли различия в состоянии газа и жидкости после пробоя? Восстанавливают ли они свою электрическую прочность?

Лабораторная работа № 2

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: исследовать удельные объемное и поверхностное сопротивления различных диэлектриков и получить навыки в работе с мегаомметром.

Задачи работы:

1. Изучить мегаомметр и порядок работы с ним при измерении сопротивления.
2. Определить удельное объемное сопротивление заданных образцов диэлектриков.
3. Определить удельное поверхностное сопротивление заданных образцов диэлектриков.
4. Снять зависимость объемного тока одного из образцов от величины приложенного напряжения.

Краткие теоретические сведения

Диэлектрики – материалы, способные поляризоваться, т. е. способные создавать электростатическое поле.

По механизму поляризации диэлектрики делят на *пассивные* (линейные), поляризующиеся только во внешнем электрическом поле, и *активные* (нелинейные), способные поляризоваться и в поле, и без него.

Проводимость диэлектриков хотя и очень мала по сравнению с проводимостью проводников, но не равна нулю. В технических диэлектриках всегда есть небольшое количество примесных свободных зарядов, которые перемещаются в электрическом поле. Кроме того, при приложении постоянного либо переменного напряжения к диэлектрику в нем обязательно реализуются какие-либо виды поляризации, механизм которых определяется как природой диэлектрика, так и внешними условиями.

Полный ток в диэлектрике, или ток утечки I_y , представляет собой сумму трех составляющих:

$$I_y = I_{\text{ск}} + I_{\text{см}} + I_{\text{абс}}, \quad (2.1)$$

где $I_{ск}$ – сквозной ток, А;
 $I_{см}$ – ток смещения, А;
 $I_{абс}$ – абсорбционный ток, А.

Сквозной ток $I_{ск}$ обусловлен движением свободных носителей заряда, привнесенных в диэлектрик токопроводящими примесями.

Ток смещения $I_{см}$ возникает благодаря мгновенным видам поляризации, состоящей в смещении связанных зарядов в веществе. Эти процессы по времени протекают до момента установления равновесного состояния, создавая ток смещения $I_{см}$ в диэлектриках.

Абсорбционные токи $I_{абс}$ – это токи различных видов замедленной поляризации.

При *переменном напряжении* токи протекают в течение всего времени действия электрического поля на диэлектрик.

При *постоянном напряжении* сквозной ток существует в течение всего времени действия электрического поля на диэлектрик, а поляризационные токи, меняя свое направление, протекают только в моменты включения и выключения напряжения. Токи смещения мгновенных видов поляризации очень кратковременны и их не удастся зафиксировать приборами. Токи абсорбции, обусловленные замедленной поляризацией, протекают по времени до ~1 мин (рис. 2.1).

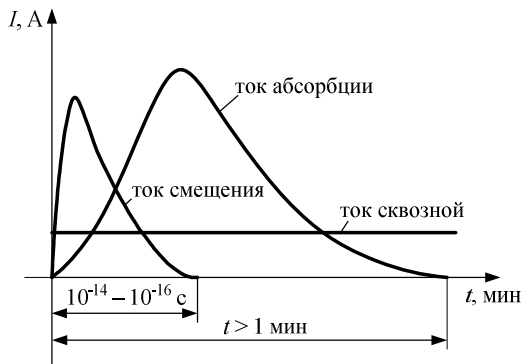


Рис. 2.1. Графики зависимости токов в диэлектрике от времени

Временем окончания поляризационных процессов принято считать 1 мин, поэтому истинная величина сопротивления изоляционного

материала фиксируется через указанный промежуток времени после начала измерения.

Учитывая, что по времени токи смещения и абсорбционные токи при постоянном напряжении играют существенную роль только в моменты включения-выключения напряжения, график зависимости тока утечки от времени часто изображают как кривую, экспоненциально убывающую от максимального значения тока (рис. 2.2).

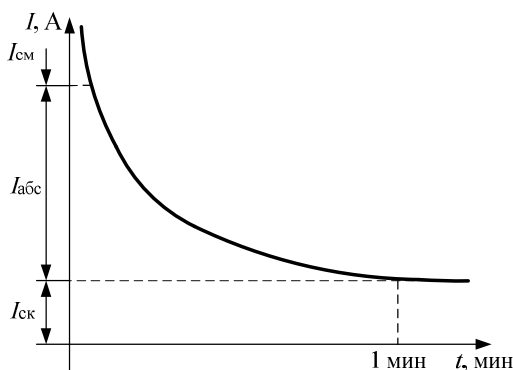


Рис. 2.2. График зависимости тока утечки через диэлектрик от времени

Ток утечки, протекающий через твердый диэлектрик под действием приложенного напряжения, состоит из объемного и поверхностного токов утечки. То есть сопротивление твердого диэлектрика складывается из объемного (внутренних областей) и поверхностного (внешних слоев) и может значительно различаться. Разделение тока (сопротивления) твердого диэлектрика на поверхностный и объемный связано с тем, что внешние факторы (например, загрязнения, влага и т. п.) значительно сильнее влияют на поверхностные слои, не проникая внутрь материала. В результате на поверхности диэлектрика возникает значительно большее количество токопроводящих примесей, электропроводность наружных слоев диэлектрика становится больше, чем проводимость внутренних областей. Поверхностное сопротивление, соответственно, становится меньше объемного.

При расчетах пользуются такими характеристиками, как удельное объемное сопротивление ρ_v и удельное поверхностное сопротивление ρ_s .

В системе измерений (СИ) удельное объемное сопротивление ρ_v равно объемному сопротивлению куба с ребром в 1 м, мысленно вырезанного из исследуемого материала, если ток проходит сквозь куб от одной его стороны к противоположной.

Удельное поверхностное сопротивление ρ_s равно сопротивлению квадрата, мысленно вырезанного из исследуемого материала, если ток проходит по поверхности квадрата от одной его стороны к противоположной.

При повышении температуры удельное сопротивление электроизоляционных материалов уменьшается. У твердых диэлектриков это явление объясняется, главным образом, увеличением числа носителей заряда при нагревании.

Удельное сопротивление диэлектриков в ряде случаев зависит также от величины приложенного напряжения, уменьшаясь при ее возрастании. Эта зависимость обнаруживается при неплотном прилегании электродов к поверхности изоляции. Она также наблюдается и у пористых материалов в результате перераспределения влаги в капиллярах под действием приложенного напряжения, а также в случае образования объемных зарядов в диэлектрике, создающих электродвижущую силу высоковольтной поляризации. Подразумеваются значения напряжений, далекие от пробивных.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для измерения объемного и поверхностного сопротивлений представлена на рис. 2.3.



*Рис. 2.3. Лабораторная установка:
1 – измерительная электродная система; 2 – мегаомметр*

Измерения производятся при постоянном напряжении. Для определения электрического сопротивления твердых диэлектриков используется измерительная система, состоящая из трех металлических электродов, к которым подключается мегаомметр (рис. 2.4).

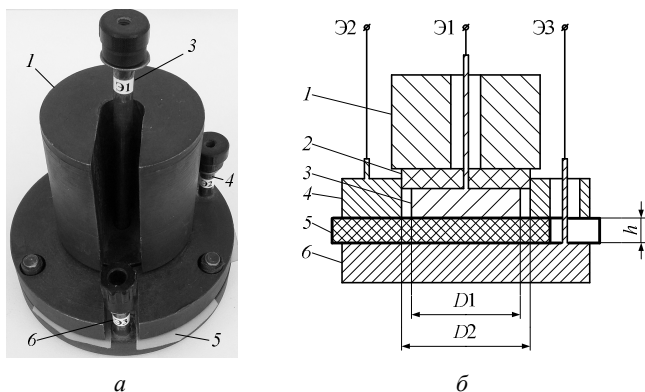


Рис. 2.4. Измерительная электродная система:
a – общий вид; *б* – вид в разрезе; 1 – прижимной цилиндр;
 2 – изолирующая вставка; 3, 4, 6 – измерительные электроды
 Э1, Э2 и Э3 соответственно; 5 – исследуемый материал

Для измерения объемного R_V и поверхностного R_S сопротивлений к электродам Э1, Э2 и Э3 по схемам (рис. 2.5) подключаются измерительные клеммы r_x мегаомметра («←» и «Э») и клемма с охраняемым кольцом (ОК).

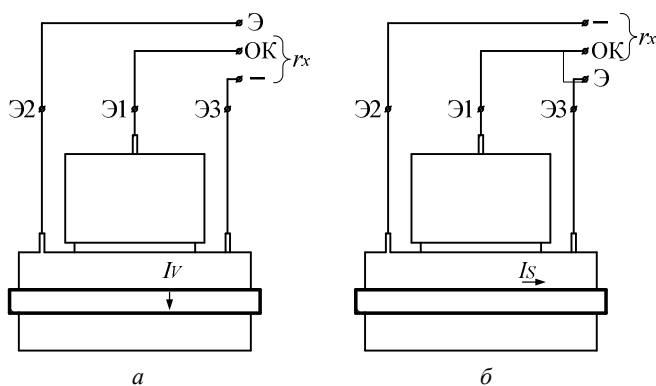


Рис. 2.5. Схема измерения объемного R_V (*a*)
 и поверхностного R_S (*б*) сопротивления исследуемого материала

При измерении объемного сопротивления исследуемого материала (рис. 2.5, а) постоянное напряжение U подается на электроды Э1 и Э3. Между ними через объем диэлектрика протекает ток. Электрод Э2 заземлен через клемму «Э». Поэтому ток, протекающий по поверхности исследуемого материала, отводится на землю и не измеряется измерительным прибором. Заземление Э2 обеспечивает выравнивание электрического поля у краев электродов. Для учета неоднородности поля принимается, что ток протекает через поперечное сечение диаметром D_0 , м:

$$D_0 = \frac{D_1 + D_2}{2}, \quad (2.2)$$

где D_1 – диаметр электрода Э1, м;
 D_2 – внутренний диаметр электрода Э2, м.

Удельное объемное электрическое сопротивление ρ_V (Ом·м) диэлектрика определяют по формуле

$$\rho_V = \frac{R_V S}{h}, \quad (2.3)$$

где R_V – объемное сопротивление, Ом;
 S – площадь поперечного сечения, перпендикулярная направлению прохождения тока, м²;
 h – толщина диэлектрика, м.

Площадь поперечного сечения S (м²) при протекании объемного тока составит:

$$S = \frac{\pi D_0^2}{4} = \frac{\pi(D_1 + D_2)^2}{16}. \quad (2.4)$$

Следовательно, удельное объемное сопротивление ρ_V равно:

$$\rho_V = R_V \frac{\pi(D_1 + D_2)^2}{16h}. \quad (2.5)$$

Объемный ток I_V (А) рассчитывается по формуле

$$I_V = \frac{U}{R_V}, \quad (2.6)$$

где U – приложенное к диэлектрику постоянное напряжение, В.

При измерении поверхностного сопротивления (рис. 2.5, б) напряжение подается на электроды Э1 и Э2. Электрод Э3 заземлен, поэтому объемный ток, протекающий через исследуемый материал, отводится на землю и не измеряется измерительным прибором.

Удельное поверхностное электрическое сопротивление ρ_S (Ом) диэлектрика определяют по формуле

$$\rho_S = \frac{R_S d}{l}, \quad (2.7)$$

где R_S – поверхностное сопротивление, Ом;

d – ширина параллельно расположенных электродов, м;

l – расстояние между электродами, м.

Поверхностный ток протекает по пути длиной l , м:

$$l = \frac{D_2 - D_1}{2}. \quad (2.8)$$

Ширина d (м) параллельно расположенных электродов составит:

$$d = \frac{\pi(D_2^2 - D_1^2)}{4}. \quad (2.9)$$

Тогда удельное поверхностное электрическое сопротивление ρ_S можно рассчитать по формуле

$$\rho_S = R_S \frac{\pi(D_2^2 - D_1^2)}{2(D_2 - D_1)}. \quad (2.10)$$

Поверхностный ток I_S (А) рассчитывается по формуле

$$I_S = \frac{U}{R_S}. \quad (2.11)$$

Методика выполнения лабораторной работы

Указания к самостоятельной подготовке к занятию

1. Изучить литературу по теме лабораторной работы (электронный учебно-методический комплекс «ЭТКМ»).

2. Подготовить отчет установленной формы для выполнения лабораторной работы.

Подготовка к работе

1. Изучить паспорт мегаомметра.
2. Вставить вилку мегаомметра в розетку «~220 В».
3. Включить автоматические выключатели **QF1** и **QF3**.
4. Произвести калибровку мегаомметра в соответствии с методикой, описанной в паспорте прибора.
5. Выключить автоматический выключатель **QF3**.
6. Получить у преподавателя пронумерованные образцы диэлектрических материалов и определить их наименование по табл. 2.1.

Таблица 2.1

Наименование образцов электроизоляционных материалов

№ позиционного обозначения	Наименование образца
1	Электротехнический картон
2	Полиэтилен
3	Гетинакс
4	Гетинакс металлизированный
5	Стеклотекстолит
6	Изофлекс
7	Оргстекло
8	Резина
9	Текстолит (пластик)

7. Записать наименование исследуемых диэлектриков в табл. 2.2 и 2.3.

Задание 1. Определить удельное объемное сопротивление ρ_v образцов диэлектрических материалов

Порядок выполнения работы

1. Измерить толщину исследуемых образцов с помощью штангенциркуля. Полученные данные записать в табл. 2.2.
2. Исследуемые образцы поочередно поместить в установку с электродами.

3. Подключить к электродам клеммы мегаомметра (рис. 2.5, а).
4. Переключателем мегаомметра установить измерительное напряжение 1000 В и включить **QF3**.
5. Произвести измерения объемного сопротивления R_V различных образцов диэлектрических материалов. *Показания мегаомметра снимать через 1 мин после включения прибора.* Результаты измерений занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Удельное объемное сопротивление твердых диэлектриков

№ образца	Наименование исследуемого диэлектрика	h , м	U , В	R_V , МОм	ρ_V , Ом·м	I_V , А
1			1000			
2						
3						
4						
5						

6. Выключить **QF3**.
7. Рассчитать значение удельного объемного сопротивления ρ_V по формуле (2.5). Принять диаметры электродов $D_1 = 0,05$ м и $D_2 = 0,055$ м.
8. Рассчитать объемный ток I_V по формуле (2.6).
9. Результаты расчета занести в табл. 2.2.

Задание 2. Определить удельное поверхностное сопротивление ρ_s образцов диэлектрических материалов

Порядок выполнения работы

1. Поочередно поместить в установку с электродами те же исследуемые образцы, которые использовались при выполнении задания 1.
2. Подключить к электродам клеммы мегаомметра (см. рис. 2.5, б).
3. Переключателем мегаомметра установить измерительное напряжение 1000 В и включить **QF3**.
4. Произвести измерения поверхностного сопротивления R_S различных образцов диэлектрических материалов. *Показания мегомметра снимать через 1 мин после включения прибора.* Результаты измерений занести в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Удельное поверхностное сопротивление твердых диэлектриков

№ образца	Наименование исследуемого диэлектрика	U , В	R_S , МОм	ρ_S , Ом	I_S , А
1		1000			
2					
3					
4					
5					

5. Выключить **QF3**.

6. Рассчитать значение удельного поверхностного сопротивления ρ_S по формуле (2.10). Принять диаметры электродов $D_1 = 0,05$ м и $D_2 = 0,055$ м.

7. Рассчитать поверхностный ток I_S по формуле (2.11).

8. Результаты расчета занести в табл. 2.3.

Задание 3. Снять зависимость объемного сопротивления R_V от величины приложенного напряжения U для одного из образцов

Порядок выполнения работы

1. По заданию преподавателя выбрать один из исследуемых образцов и записать его наименование в табл. 2.4.

2. Собрать схему согласно рис. 2.5, а. Включить **QF3**.

3. Измерить объемное сопротивление R_V выбранного образца при различных измерительных напряжениях мегаомметра. Результаты измерений занести в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Зависимость объемного сопротивления от приложенного напряжения

Наименование исследуемого диэлектрика	Величина напряжения, В	R_V , МОм	I_V , А	ρ_V , Ом·м
	100			
	500			
	1000			
	2500			

4. Выключить **QF1** и **QF3**.
5. Рассчитать удельное объемное сопротивление ρ_V и объемный ток I_V по формулам (2.5) и (2.6) соответственно. Результаты расчета занести в табл. 2.4.
6. По данным табл. 2.4 построить графические зависимости $I_V = f(U)$ и $R_V = f(U)$.

Выводы

Сделать и записать выводы по результатам расчетов и построенным графическим зависимостям. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Схемы включения установки для измерения удельного объемного R_V и поверхностного R_S сопротивлений (см. рис. 2.5, а, б).
4. Таблицы 2.2–2.4 с результатами измерений и расчетов.
5. Расчетные формулы (2.5), (2.6), (2.10) и (2.11).
6. Графики зависимости $I_V = f(U)$ и $R_V = f(U)$ по данным табл. 2.4.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Почему диэлектрики проводят электрический ток?
2. Какие носители электрического тока в диэлектриках?
3. Начертите график зависимости тока утечки от времени и перечислите составляющие тока утечки.
4. От каких факторов зависит проводимость диэлектриков?
5. Почему у твердых диэлектриков различают объемное и поверхностное электрические сопротивления?
6. Через какой промежуток времени измеряют ток утечки?
7. В каких единицах измеряют удельное объемное и удельное поверхностное электрическое сопротивление?
8. Как и почему изменяются величины ρ_V и ρ_S при изменении влажности и температуры образца диэлектрика?

Лабораторная работа № 3

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: изучить электротехнические характеристики проводников.

Задачи работы:

1. Снять зависимость сопротивления различных проводников от температуры.
2. Рассчитать удельные сопротивления проводников.
3. Построить графики зависимостей сопротивления различных проводников от температуры.
4. Получить навыки работы на лабораторном стенде НТЦ-08.47.1 «Электромонтажный комплекс».

Краткие теоретические сведения

Проводники – материалы, имеющие свободные носители заряда.

Удельное сопротивление проводника: $\rho < 10^{-5}$, Ом·м.

Проводниками электрического тока могут быть (по агрегатному состоянию) *твердые тела, жидкости*, и при определенных условиях – *газы*.

Важнейшими, практически применяемыми в электротехнике твердыми проводниковыми материалами, являются *металлы и их сплавы*. Носителями электрического тока в металлах как в твердом, так и в жидком (расплавленном) состоянии являются свободные электроны.

Природа проводимости в металлах. Свойства металлов, в том числе электрические, связаны с их особым строением. Большинство металлов в свободном виде имеют кристаллическую структуру, т. е. атомы в пространстве занимают только определенные места (узлы). Однако согласно классической модели в узлах кристаллической решетки металлов находятся не атомы, а положительно заряженные «ионные остовы». Ионный остов – это атом, отдавший один-два валентных электрона в общее пользование. Образуется общий электронный газ, окружающий ионные остовы атомов. Коллективизированные электроны совершают хаотичное тепловое

движение со средней скоростью порядка 10^5 м/с. Ионные остовы в это время совершают колебания около равновесных положений в узлах решетки. В отсутствие внешнего поля на макроскопическом уровне металл остается электрически нейтральным. При наложении электрического поля электрон получает направление движения (к положительному электроду) и дополнительную энергию eU , что приводит к увеличению скорости движения электрона (на несколько миллиметров в секунду). В результате в металле течет электрический ток.

Основными электротехническими характеристиками проводников являются удельная проводимость γ и удельное сопротивление ρ .

Удельная проводимость металлов, согласно классической теории металлов, является коэффициентом пропорциональности между плотностью j тока и напряженностью E (См/м) электрического поля:

$$j = \gamma E, \quad (3.1)$$

$$\gamma = \frac{e^2 n_0 \lambda}{2mV_T}, \quad (3.2)$$

где e – заряд электрона, Кл;

n_0 – число свободных электронов в единице объема металла, м^{-3} ;

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

m – масса электрона, кг;

V_T – средняя скорость теплового движения свободного электрона в металле, м/с.

С ростом температуры скорости электронов растут, однако длина свободного пробега значительно снижается, что ведет к снижению проводимости, согласно формуле (3.2). Причина уменьшения длины свободного пробега электрона в том, что с ростом температуры растут амплитуды колебаний ионных остовов. Направленнодвигающиеся электроны сталкиваются с остовами и отклоняются от направления движения. Таким образом, *с ростом температуры удельная проводимость металлов падает, соответственно, удельное сопротивление растет.*

Удельное сопротивление ρ (Ом·м) – величина, обратная проводимости:

$$\rho = \frac{1}{\gamma}, \quad (3.3)$$

$$\rho = R \frac{S}{l}, \quad (3.4)$$

где S – площадь поперечного сечения проводника, м²;
 l – длина проводника, м.

Значения удельного сопротивления некоторых металлов при температуре $t = 20$ °С приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Удельное сопротивление некоторых металлов

Наименование металла	Удельное сопротивление $\rho_0 \cdot 10^{-6}$, Ом·м
Алюминий	0,028
Вольфрам	0,055
Железо	0,098
Золото	0,023
Константан	0,44–0,52
Латунь	0,025–0,06
Манганин	0,42–0,48
Медь	0,0175
Молибден	0,057
Никелин	0,39–0,45
Никель	0,100
Олово	0,115
Ртуть	0,958
Свинец	0,221
Серебро	0,016
Тантал	0,155
Нихром	1,05–1,40
Фехраль	1,1–1,3
Хром	0,027
Цинк	0,059

Температурный коэффициент удельного сопротивления TK_ρ , или α_ρ , (K^{-1}) – это характеристика, показывающая изменение удельного сопротивления при изменении температуры на 1 градус:

$$TK_\rho = \alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}. \quad (3.5)$$

Температурный коэффициент удельного сопротивления – величина, равная относительному изменению удельного сопротивления материала при изменении температуры на единицу.

На практике, на ограниченном отрезке температур допустима линейная аппроксимация удельного сопротивления металла от T_k до $T_{\text{плав}}$ (рис. 3.1).

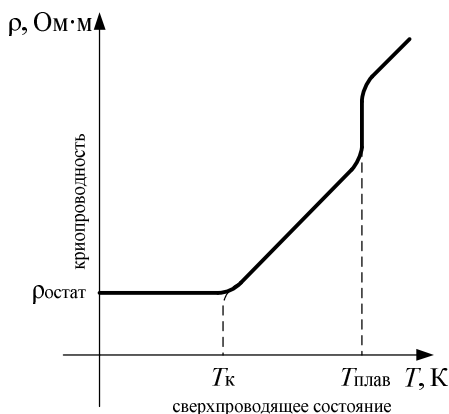


Рис. 3.1. График зависимости удельного сопротивления металла от температуры

В таком случае в узком диапазоне температур от T_1 до T_2 можно предельно точно определить удельное сопротивление ($Om \cdot m$) для любой температуры, используя формулу:

$$\rho_2 = \rho_1 (1 + \bar{\alpha}_\rho (T_2 - T_1)), \quad (3.6)$$

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

$\bar{\alpha}_\rho$ – средний температурный коэффициент удельного сопротивления данного материала в диапазоне температур от T_1 до T_2 , K^{-1} .

Удельная проводимость металлов – величина, обратная удельному сопротивлению, следовательно, она снижается, что связано с уменьшением средней длины свободного пробега электрона λ .

Значения температурных коэффициентов сопротивления некоторых металлов приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Температурные коэффициенты сопротивления металлов

Наименование металла	Температурный коэффициент $\alpha_p \cdot 10^{-3}, \text{K}^{-1}$
Алюминий	4,2
Алюминиевый провод	3,8
Вольфрам	5,0
Железо	6,0
Константан (сплав Ni + Cu + Mn)	0,05
Латунь	0,1–0,4
Манганин (сплав Cu + Mn + Ni-приборный)	0,01
Медь	4,0
Никелин (сплав Cu + Ni)	0,1
Нихром (сплав Ni + Cr + Fe + Mn)	0,1
Олово	3,9
Платина	1,0
Ртуть	3,7
Свинец	4,1
Серебро	
Фехраль (сплав Cr (12–15 %) + Al (3,5–5,5 %) + + Si (1 %) + Mn (0,7 %) + Fe	0,1
Цинк	4,2
Чугун	1,0

Из данных табл. 3.2 видно, что существуют металлы, для которых коэффициент α_p имеет крайне малую величину, т. е.

металлы, удельное сопротивление которых мало зависит от температуры.

Условно проводники классифицируют следующим образом:

1. Проводники с высокой удельной проводимостью: $\rho < 10^{-7}$, Ом·м (медь, золото, алюминий, серебро).

2. Проводники с высоким удельным сопротивлением (как правило, это сплавы – константан, фехраль, нихром и др.), их удельное сопротивление ρ лежит в области от 10^{-5} до 10^{-7} , Ом·м.

3. Контактные материалы.

4. Кристо- и сверхпроводники (см. рис. 3.1).

К наиболее распространенным проводникам высокой проводимости относят *медь* и *алюминий*. К наиболее распространенным проводникам высокого электрического сопротивления относят сплавы на основе меди – *константан*, *манганин*, на основе железа – *нихром*, *фехраль* и др. Они используются для изготовления образцовых резисторов, электронагревательных приборов, деталей электроизмерительных приборов. Большинство сплавов этой группы имеют малый температурный коэффициент удельного сопротивления.

Манганин – наиболее типичный и широко применяемый сплав высокого сопротивления, примерный его состав: Cu – 85 %, Mn – 12 %, Ni – 3 %.

Константан – сплав, содержащий около 60 % меди и 40 % никеля. Он обладает малой величиной температурного коэффициента сопротивления, часто принимаемой равной нулю. Однако в паре с медью он создает большую термоЭДС. Константановая проволока выпускается с эмалевой, эмалево-шелковой и эмалево-хлопчатобумажной изоляцией.

Нихром, **фехраль** являются жаростойкими материалами, применяемыми в электронагревательных приборах и печах, где необходима длительная работа при температурах от 800 °С до 1200 °С. Для данных сплавов характерна стойкость к окислению при высоких температурах.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для измерения зависимости сопротивления проводников от температуры представлена на рис. 3.2.

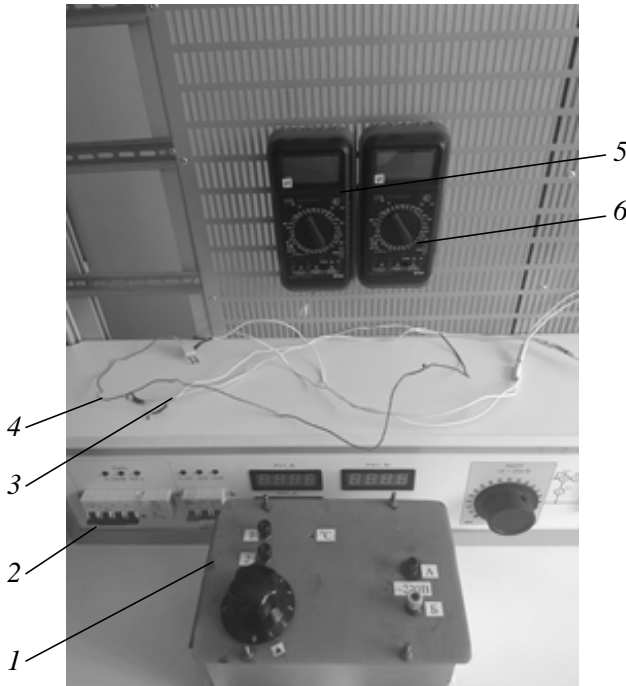


Рис. 3.2. Лабораторная установка (общий вид):

- 1* – испытательная емкость;
- 2* – базовый стенд НТЦ-08.47.1 «Электромонтажный комплекс»;
- 3* – измерительные провода; *4* – датчик температуры (термопара);
- 5, 6* – многофункциональные цифровые мультиметры Mastech MY64, соответственно, M1 и M2

Установка представляет собой базовый стенд НТЦ-08.47.1 «Электромонтажный комплекс» 2, на который установлена испытательная емкость 1. Мультиметр 5 (M1) и датчик температуры (термопара) 4 используются для измерения температуры проводниковых материалов, загруженных в испытательную емкость 1. Мультиметр 6 (M2) с помощью измерительных проводов 3 подключается к испытательной емкости 1 для измерения сопротивления образцов проводников. Измерительная панель испытательной емкости представлена на рис. 3.3.

В отверстие 1 опускается датчик температуры, подключенный к мультиметру M1. К зажимам 2 («1» и «2») через пакетный

переключатель 3 внутри емкости подсоединены образцы проводниковых материалов. Для измерения их сопротивления к зажимам 2 с помощью измерительных проводов подключается мультиметр М2. К зажимам 4 («А» и «Б») внутри емкости подсоединен нагреватель. С помощью измерительных проводов зажимы 4 подключаются к стенду НТЦ-08.47.1 «Электромонтажный комплекс» для питания установки от сети переменного напряжения 220 В.

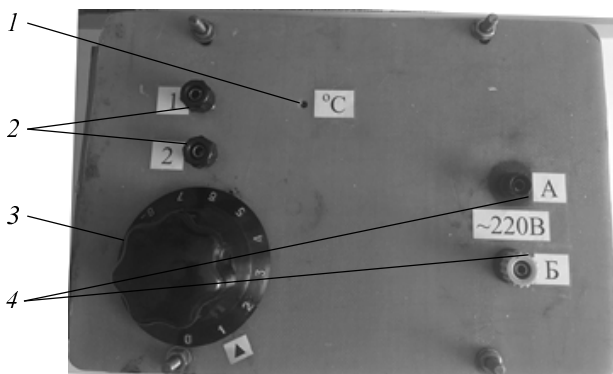


Рис. 3.3. Измерительная панель испытательной емкости:

- 1 – отверстие для датчика температуры;
- 2 – зажимы для подключения мультиметра М2; 3 – пакетный переключатель;
- 4 – зажимы для подключения к источнику питания

Лабораторная установка работает следующим образом. При подаче напряжения питания на нагреватель через зажимы «А» и «Б» идет нагрев трансформаторного масла, которым заполнена испытательная емкость. В результате образцы проводниковых материалов, которые погружены в трансформаторное масло, также нагреваются. При отключении напряжения питания трансформаторное масло, которое обладает хорошей теплопроводностью, повышает скорость охлаждения нагревателя и проводниковых материалов.

При отключенном напряжении питания измеряются сопротивления образцов проводниковых материалов при начальной (комнатной) температуре. Измерения проводятся поочередно, с помощью пакетного переключателя. Далее в режиме нагрева производится измерение сопротивления проводников при значениях температуры, указанных преподавателем.

Методика выполнения лабораторной работы

Указания к самостоятельной подготовке к занятию

1. Изучить литературу по теме лабораторной работы (электронный учебно-методический комплекс «ЭТКМ»).
2. Подготовить отчет установленной формы для выполнения лабораторной работы.

Подготовка к работе

1. Изучить инструкцию по эксплуатации мультиметра Mastech MY64.
2. На мультиметре M1 выбрать режим измерения температуры. Подключить к мультиметру измерительную термопару.
Внимание! Для корректной работы в верхнее гнездо разъема мультиметра «ТЕМР» должен быть вставлен контакт «К» термопары.
3. Опустить спай термопары в испытательную емкость примерно до середины ее глубины.
4. На мультиметре M2 выбрать режим измерения сопротивления. Подключить к мультиметру измерительные провода и присоединить их к зажимам «1» и «2» испытательной емкости.
5. Подключить измерительные провода: одним концом к зажимам «А», «Б» нагревателя, вторым – к розетке «~220 В» стенда НТЦ-08.47.1.

Задание 1. Измерить сопротивление проводниковых материалов при различной температуре

Порядок выполнения работы

1. Включить автоматический выключатель **QF1** и запустить мультиметры M1 и M2.
2. Занести в табл. 3.3 значение начальной температуры T_H в испытательной емкости (показание мультиметра M1).
3. Перевести пакетный переключатель в **позицию 4**. Измерить при значении начальной температуры T_H начальное сопротивление R_H первого образца проводникового материала. Результаты занести в табл. 3.3.
4. Аналогично п. 1.3. произвести измерения для других образцов проводниковых материалов, поочередно переводя переключатель в **позиции 5, 6 и 7** соответственно. Результаты занести в табл. 3.3.

5. Включить однополюсный автоматический выключатель **QF3**. Нагреть исследуемые образцы до температуры, указанной преподавателем. С помощью мультиметра М2 измерить сопротивление четырех проводниковых материалов в контрольных точках температуры. Для снижения влияния инерционности процесса нагрева на точность измерений при снятии показаний мультиметра рекомендуется отключать нагреватель от сети (однополюсный автоматический выключатель **QF3**).

Результаты измерений занести в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Зависимость сопротивления проводниковых материалов от температуры

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Сопротивление R , Ом			
	переключатель в позиции			
	4	5	6	7
T_H				
30				
40				
50				
60				
70				
80				
90				

6. Выключить **QF1** и **QF3**.

7. По результатам измерений построить графические зависимости $R = f(T)$ для четырех проводниковых материалов.

Задание 2. Определить наименование проводниковых материалов под каждым номером и рассчитать температурный коэффициент их удельного сопротивления

Порядок выполнения работы

1. Проводниковые материалы изготовлены из проволоки известной длины l круглого сечения известного диаметра d (табл. 3.4, см. номер указанного преподавателем лабораторного стенда).

Таблица 3.4

Данные для расчета проводниковых материалов

№ позиции	Длина провода l , м	Диаметр провода d , м
<i>Лабораторный стенд № 4</i>		
4	205	$0,112 \cdot 10^{-3}$
5	2,5	$0,21 \cdot 10^{-3}$
6	14	$0,12 \cdot 10^{-3}$
7	100	$0,4 \cdot 10^{-3}$
<i>Лабораторный стенд № 8</i>		
4	370	$0,14 \cdot 10^{-3}$
5	12	$0,21 \cdot 10^{-3}$
6	14	$0,12 \cdot 10^{-3}$
7	2257	$0,5 \cdot 10^{-3}$

2. Выписать данные из табл. 3.4 в зависимости от номера лабораторного стенда в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Определение температурного коэффициента
удельного сопротивления проводниковых материалов

№ поз.	l , м	d , м	S , м ²	ρ_H , Ом·м	Наименование материала	ρ_0 , Ом·м	ρ_K , Ом·м	α_{ρ} , К ⁻¹	T_X , °С	ρ_X , Ом·м
4										
5										
6										
7										

3. Определить площадь поперечного сечения образцов, м²:

$$S = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (3.7)$$

4. Определить удельное сопротивление ρ_H (Ом·м) проводниковых материалов при начальной температуре T_H :

$$\rho_{\text{H}} = \frac{R_{\text{H}}S}{l}, \quad (3.8)$$

где R_{H} – сопротивление проводникового материала при начальной температуре T_{H} (см. табл. 3.3, первая строка), Ом.

5. Используя рассчитанное значение удельного сопротивления ρ_{H} , по табл. 3.1 определить наименование проводниковых материалов и записать их в табл. 3.5.

6. Уточнить из данных табл. 3.1 значения удельного сопротивления проводниковых материалов ρ_0 и занести их в табл. 3.5.

7. Определить удельное сопротивление ρ_{K} (Ом·м) проводниковых материалов при конечной температуре T_{K} :

$$\rho_{\text{K}} = \frac{R_{\text{K}}S}{l}, \quad (3.9)$$

где R_{K} – сопротивление проводникового материала при конечной температуре (см. табл. 3.3, последняя строчка), Ом.

8. Определить температурный коэффициент удельного сопротивления α_{p} , K^{-1} :

$$\alpha_{\text{p}} = \frac{1}{\rho} \frac{\rho_{\text{K}} - \rho_{\text{H}}}{T_{\text{K}} - T_{\text{H}}}. \quad (3.10)$$

9. Сравнить расчетное значение температурного коэффициента удельного сопротивления α_{p} со справочным значением (см. табл. 3.2).

10. По заданию преподавателя, определить удельное сопротивление ρ_{X} (Ом·м) исследуемых проводниковых материалов при температуре T_{X} (задается преподавателем) внутри интервала температур ($T_{\text{K}}-T_{\text{H}}$) по формуле

$$\rho_{\text{X}} = \rho_0 (1 + \alpha_{\text{p}}(T_{\text{X}} - T_{\text{H}})). \quad (3.11)$$

Результаты расчета занести в табл. 3.5.

Выводы

Сделать и записать выводы по проделанной работе с объяснением полученных зависимостей. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Таблицы 3.3 и 3.5 с результатами измерений и расчетов.
4. Графики зависимости $R = f(T)$ для четырех проводниковых материалов по данным табл. 3.3.
5. Расчетные формулы (3.7)–(3.11).
6. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение проводнику.
2. Какова природа проводимости в металлах?
3. Какие частицы являются носителями электрического тока в металлах?
4. Начертите график зависимости удельного сопротивления от температуры для проводника.
5. Почему в области низких температур кривая $R = f(T)$ (общий вид) раздваивается?
6. Какой знак имеет температурный коэффициент удельного сопротивления металлов и почему?
7. Назовите классы, на которые условно делят проводники.
8. Одинаково ли изменяется сопротивление с ростом температуры для проводников с высоким удельным сопротивлением и высокой удельной проводимостью в области температур 20 °С–100 °С?
9. Приведите примеры проводников с высокой удельной проводимостью.
10. Приведите примеры проводников высоким удельным сопротивлением.

Лабораторная работа № 4

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: изучить электротехнические характеристики полупроводниковых материалов и компонентов.

Задачи работы:

1. Получить навыки работы на лабораторном стенде НТЦ-08.47.1 «Электромонтажный комплекс».
2. Снять зависимость сопротивления различных полупроводниковых компонентов от температуры.
3. Построить графики зависимостей сопротивления различных полупроводниковых компонентов от температуры.

Краткие теоретические сведения

Полупроводники – материалы с управляемой проводимостью.

Удельное сопротивление полупроводников: $10^{-5} \leq \rho \leq 10^8$, Ом·м.

Собственные (идеальные) полупроводники в технике практически не применяют. На их основе получают полупроводниковые компоненты (элементы).

Полупроводниковые компоненты – это простейшие устройства, состоящие из нескольких полупроводников с разными свойствами.

Механизм собственной электропроводности полупроводников. Химическая связь (*ковалентная*) между соседними атомами в полупроводнике осуществляется за счет взаимодействия их валентных электронов, которые образуют общие для соседних атомов электронные пары. В идеальном полупроводнике все валентные электроны участвуют в образовании химической связи, и свободных электронов нет.

При низких температурах у идеальных полупроводников свободные носители заряда (электроны) отсутствуют, и они абсолютно не проводят электрический ток.

Чтобы в полупроводнике появились свободные носители заряда, надо разорвать ковалентную связь, т. е. сообщить электрону дополнительную энергию активации ΔW_a , равную энергии разрыва ковалентной связи.

Полупроводник, в котором электропроводность возникает за счет разрыва собственных ковалентных связей, называют *собственным*.

Электрон, освободившийся из ковалентной пары, оставляет после себя одно вакантное место. Этому вакантному электронному месту приписывается положительный заряд, и оно рассматривается как фиктивная, положительно заряженная частица (*дырка*). То есть *электроны и дырки* – носители электрического тока в полупроводниках.

Беспримесный полупроводник (собственный), т. е. совершенно чистый полупроводник без дефектов кристаллической решетки, имеет одинаковую концентрацию электронов и дырок: $n = p$.

Собственная электропроводность полупроводника складывается из электронной γ_n и дырочной γ_p проводимостей, См:

$$\gamma = \gamma_n + \gamma_p. \quad (4.1)$$

Собственная проводимость – это проводимость полупроводников, обусловленная разрывом собственных ковалентных связей.

Примесная проводимость – это проводимость полупроводников, обусловленная наличием в них примесей. Именно примесные полупроводники широко применяются в электротехнике.

Легирование – целенаправленное введение примесей в материал с целью придания нужных свойств.

От типа примеси зависит, чего больше – электронов или дырок – в легированном полупроводнике. Чтобы получить преобладание электронов, полупроводник необходимо легировать примесью с большей валентностью, чем его собственная (*донорная примесь*). Чтобы получить полупроводник с преобладанием дырок, его нужно легировать примесью с меньшей валентностью, чем его собственная (*акцепторная примесь*).

Если в полупроводнике наблюдается электронная проводимость, его называют полупроводником n -типа. Если преобладают дырки – проводимость дырочная (p -тип).

Собственная проводимость идеального полупроводника не относится ни к n -типу, ни к p -типу. Собственная проводимость полупроводников существует только в теоретических построениях, так как совершенно чистых веществ не существует.

Основными электротехническими характеристиками полупроводниковых материалов так же, как и для металлов, являются удельное сопротивление ρ и удельная проводимость γ .

Удельные электронная γ_n и дырочная γ_p (См) проводимости полупроводника рассчитываются по формулам:

$$\gamma_n = \mu_n n_0 q, \quad (4.2)$$

$$\gamma_p = \mu_p n_0 q, \quad (4.3)$$

где μ_n и μ_p – подвижность электронов и дырок соответственно, м²/В·с;
 n_0 – концентрация электронов (дырок), м⁻³;
 q – заряд электрона, Кл.

Подвижность носителей заряда, м²/В·с:

$$\mu = \frac{V}{E}, \quad (4.4)$$

где V – средняя скорость их дрейфа в электрическом поле, м/с;
 E – напряженность электрического поля, В/м.

Температура влияет на собственную электропроводность полупроводников. Подвижность носителей заряда μ , определяемая их эффективной массой, скоростью и частотой столкновений с узлами и дефектами кристаллической решетки, слабо зависит от температуры. На характер зависимости электропроводности полупроводника от температуры основное влияние оказывает концентрация носителей заряда.

Если за счет внешней энергии повысить температуру полупроводника, то некоторые слабо связанные электроны атомов примесей могут перейти в зону проводимости. Им для перехода в зону проводимости нужна энергия много меньшая, чем энергия активации электронов самого полупроводника.

С ростом температуры концентрация носителей заряда в полупроводнике возрастает, следовательно, *проводимость растет, а сопротивление падает* (рис. 4.1).

Температурный коэффициент удельного сопротивления собственного полупроводника, как и для металла, показывает относительное изменение удельного сопротивления при изменении температуры на один градус.

Следовательно, температурный коэффициент удельного сопротивления собственных полупроводников отрицательный.

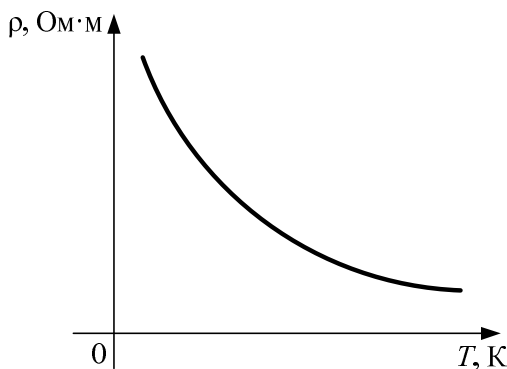


Рис. 4.1. График зависимости удельного сопротивления полупроводников от температуры

На основе полупроводников изготавливается большое количество различных простейших полупроводниковых приборов – компонентов.

С точки зрения использования в электротехнике важнейшими используемыми эффектами в полупроводниках являются эффекты выпрямления (соответствующие компоненты – *диоды*), усиления (*транзисторы*), фотоэлектрический эффект (*фоторезисторы*), термоэлектрический (*терморезисторы*) и др. Зависимость удельной проводимости некоторых полупроводников от напряжения используется для создания *варисторов*, которые широко используются для искрогашения на контактах реле и защиты от перенапряжений элементов электрических цепей.

Большая зависимость удельной электрической проводимости полупроводников от температуры используется для создания температурно-зависимых резисторов-терморезисторов, в том числе датчиков температуры.

Терморезистор – простейший полупроводниковый компонент с температурнозависимым электрическим сопротивлением. Изобретенный в 1930 году ученым Самюэлем Рубеном, компонент находит самое широкое применение в современной технике.

Изготавливают терморезисторы из особых, специфичных полупроводниковых материалов, температурный коэффициент сопротивления (ТКС) которых достаточно высок (рис. 4.2).

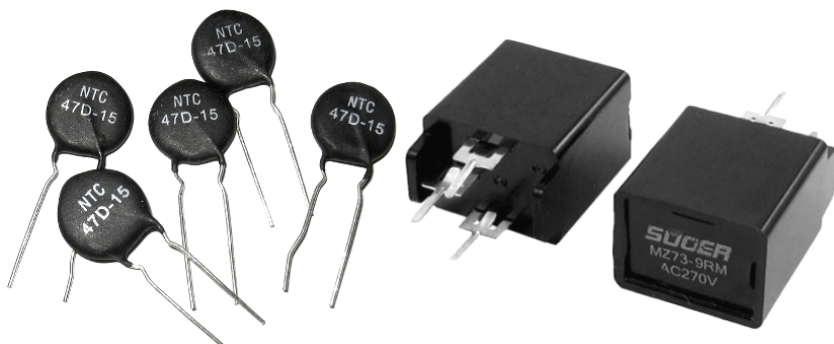


Рис. 4.2. Терморезисторы (общий вид)

По характеру зависимости сопротивления элемента от температуры терморезисторы разделяют на две большие группы – позисторы и термисторы.

Позисторы обладают положительным ТКС; их применяют для защиты электродвигателей от перегрузки, для задержки времени включения импульсных блоков питания, в измерительных приборах, в устройствах памяти, в качестве саморегулирующихся нагревательных элементов и др.

Термистор – температурнозависимый резистор, имеющий высокую чувствительность и обладающий отрицательным ТКС. Применяется для контроля изменения температуры в бытовой технике (морозильники, фены, холодильники и т. д.); автомобильной электронике (измерение охлаждения антифриза, масла, контроль выхлопных газов и др.); кондиционерах (распределение тепла, контроль температуры в помещении); отопительных котлах, теплых полах, печах; электронике и др.

С возрастанием температуры корпуса позистора растет и его сопротивление, и с ростом температуры термистора – его сопротивление, соответственно, уменьшается. По этой причине позисторы еще называют *PTC-термисторами*, термисторы – *NTC-термисторами*.

Материалами для терморезисторов служат смеси поликристаллических оксидов переходных металлов, таких как кобальт, марганец, медь и никель, соединений $A^{III}B^V$ -типа, а также смеси легированных, стеклообразных полупроводников, таких как кремний и германий.

Графическая характеристика температурной зависимости сопротивления термистора и позистора показана на рис. 4.3.

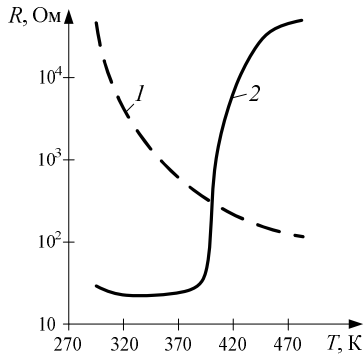


Рис. 4.3. Графики зависимости сопротивления термистора (линия 1) и позистора (линия 2) от температуры

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для измерения зависимости сопротивления полупроводников от температуры представлена на рис. 4.4.

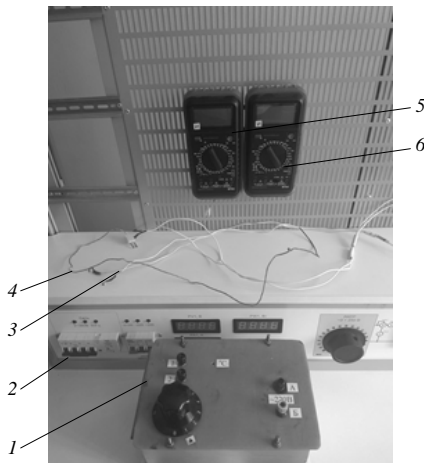


Рис. 4.4. Лабораторная установка (общий вид):

1 – испытательная емкость; 2 – базовый стенд НТЦ-08.47.1 «Электромонтажный комплекс»; 3 – измерительные провода; 4 – датчик температуры (термопара); 5, 6 – многофункциональные цифровые мультиметры Mastech MY64, соответственно, M1 и M2

Лабораторная установка представляет собой базовый стенд НТЦ-08.47.1 «Электромонтажный комплекс» 2, на который установлена испытательная емкость 1. Мультиметр 5 (М1) и датчик 4 температуры (термопара) используются для измерения температуры полупроводниковых материалов, загруженных в испытательную емкость 1. Мультиметр 6 (М2) с помощью измерительных проводов 3 подключается к испытательной емкости 1 для измерения сопротивления образцов полупроводников.

Измерительная панель испытательной емкости представлена на рис. 4.5.

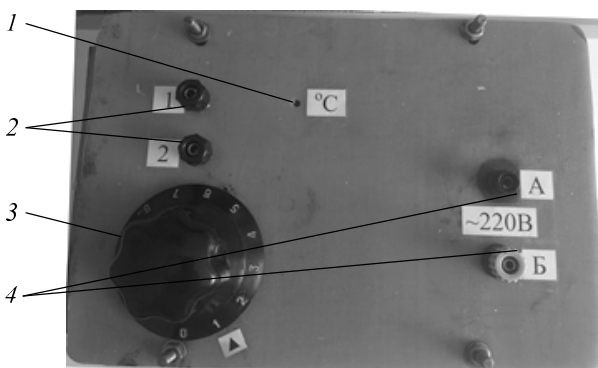


Рис. 4.5. Измерительная панель испытательной емкости:

- 1 – отверстие для датчика температуры;
- 2 – зажимы для подключения мультиметра М2; 3 – пакетный переключатель;
- 4 – зажимы для подключения к источнику питания

В отверстие 1 опускается датчик температуры, подключенный к мультиметру М1. К зажимам 2 («1» и «2») через пакетный переключатель 3 внутри емкости подсоединены образцы полупроводниковых компонентов. Для измерения их сопротивления к зажимам 2 с помощью измерительных проводов подключается мультиметр М2. К зажимам 4 («А» и «Б») внутри емкости подсоединен нагреватель. С помощью измерительных проводов зажимы 4 подключаются к стенду НТЦ-08.47.1 «Электромонтажный комплекс» для питания установки от сети переменного напряжения 220 В.

Лабораторная установка работает следующим образом. При подаче напряжения питания на нагреватель через зажимы «А» и «Б»

происходит нагрев трансформаторного масла, которым заполнена испытательная емкость. В результате образцы полупроводниковых компонентов, которые погружены в трансформаторное масло, также нагреваются.

Методика выполнения лабораторной работы

Указания к самостоятельной подготовке к занятию

1. Изучить литературу по теме лабораторной работы (электронный учебно-методический комплекс «ЭТКМ»).
2. Подготовить отчет установленной формы для выполнения лабораторной работы.

Подготовка к работе

1. Изучить инструкцию по эксплуатации мультиметра Mastech MY64.
2. На мультиметре M1 выбрать режим измерения температуры. Подключить к мультиметру термопару.

Внимание! Для корректной работы в верхнее гнездо разъема мультиметра «ТЕМР» должен быть вставлен контакт «К» термопары.

3. Опустить активную часть термопары в испытательную емкость примерно на глубину 8–10 см.

4. На мультиметре M2 выбрать режим измерения сопротивления. Подключить к мультиметру измерительные провода и присоединить их к зажимам «1» и «2» испытательной емкости.

5. Подключить измерительные провода: одним концом к зажимам «А», «Б» нагревателя, вторым – к розетке «~220 В» стенда НТЦ-08.47.1.

Задание 1. Измерить сопротивление полупроводниковых компонентов при различной температуре

Порядок выполнения работы

1. Включить автоматический выключатель **QF1** и запустить мультиметры M1 и M2.
2. Значение начальной температуры T_H в испытательной емкости (показание мультиметра M1) занести в таблицу.

3. Перевести пакетный переключатель в *позицию 1*. Измерить при начальной температуре T_H сопротивление первого полупроводникового образца. Результаты занести в таблицу.

4. Аналогично п. 3. произвести измерения для других образцов, поочередно переводя переключатель *в позиции 2, 3, 4, 5, 6* соответственно. Результаты занести в таблицу.

5. Включить однополюсный автоматический выключатель *QF3*. Нагреть исследуемые образцы до температуры, указанной преподавателем. С помощью мультиметра М2 измерить сопротивление шести полупроводниковых компонентов в контрольных точках температуры. Для снижения влияния инерционности процесса нагрева на точность измерений при снятии показаний мультиметра рекомендуется отключать нагреватель от сети (однополюсный автоматический выключатель *QF3*).

Результаты измерений занести в таблицу.

Таблица

Зависимость сопротивления полупроводниковых компонентов от температуры

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Сопротивление R , Ом					
	переключатель в позиции					
	1	2	3	4	5	6
$T_H =$						
25						
30						
35						
40						
45						
50						
55						
60						
65						
70						
75						
80						
85						
90						

6. Выключить $QF1$ и $QF3$.

7. По результатам измерений построить графические зависимости $R = f(T)$ для шести образцов полупроводниковых компонентов.

8. Сравнить построенные графические зависимости $R = f(T)$ с температурными зависимостями термистора и позистора (см. рис. 4.3) и определить наименование полупроводниковых компонентов.

Выводы

Сделать и записать выводы по проделанной работе с объяснением полученных зависимостей. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Таблица с результатами измерений.
4. Графики зависимости $R = f(T)$ для полупроводниковых компонентов по данным таблицы.
5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение классу материалов «полупроводники».
2. Какие носители тока в полупроводнике?
3. Дайте определение полупроводниковым компонентам.
4. Назовите основные свойства полупроводниковых материалов.
5. Объясните механизм собственной электропроводности полупроводников.
6. Охарактеризуйте собственный полупроводник.
7. Дайте определение легированию полупроводника.
8. Охарактеризуйте примесный полупроводник.

9. Какие носители тока имеются в легированных полупроводниках n - p -типов? Какие преобладают?
10. Дайте определение понятию «дырка».
11. Какие примеси называют донорными, какие – акцепторными?
12. Как на основе 4-валентного полупроводника получить полупроводник p -типа, и как – n -типа? Какой должна быть валентность примеси?
13. Как влияет на электропроводность полупроводников температура?
14. Где в электротехнике применяются простейшие полупроводниковые компоненты, и какие именно?

Лабораторная работа № 5

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КОМПОНЕНТОВ ОТ ОСВЕЩЕННОСТИ

Цель работы: изучить электротехнические характеристики полупроводниковых компонентов.

Задачи работы:

1. Получить навыки работы на лабораторном стенде НТЦ-08.47.1 «Электромонтажный комплекс».
2. Снять зависимость электротехнических характеристик различных полупроводниковых компонентов от освещенности.
3. Построить графики зависимостей электротехнических характеристик различных полупроводниковых компонентов от освещенности.

Краткие теоретические сведения

Полупроводники – материалы с управляемой проводимостью.

Удельное сопротивление полупроводников: $10^{-5} \leq \rho \leq 10^8$, Ом·м.

Собственные полупроводники не используются в технике. Используют полупроводниковые компоненты – простейшие устройства, состоящие из нескольких полупроводников, имеющих разные свойства.

В квантовомеханической зонной теории для объяснения различий материалов по проводимости все материалы разделяют соответственно распределению их электронов по энергиям. Это так называемая зонная теория проводимости. Считается, что все связанные электроны в материале могут иметь только значения энергии из зоны валентности, а свободные электроны – из зоны проводимости. От того, есть ли между этими зонами зазор (запрещенная зона) зависит в целом, будет ли материал проводником, полупроводником или диэлектриком (рис. 5.1).

Предположим теперь, что на полупроводник перпендикулярно его поверхности падает поток монохроматического света с частотой ν . Этот световой поток представляет собой поток фотонов, каждый из которых обладает энергией:

$$\varepsilon = h\nu. \tag{5.1}$$



Рис. 5.1. Материалы согласно зонной теории

Попадая в полупроводник, фотоны взаимодействуют с валентными электронами полупроводника (рис. 5.2, а) и стремятся передать им свою энергию. Если энергия падающих фотонов превышает ширину запрещенной зоны ΔW или равна ей, то:

$$h\nu \geq \Delta W . \quad (5.2)$$

Тогда благодаря приобретенной энергии валентные электроны способны перейти в зону проводимости (рис. 5.2, б). При этом в зоне проводимости появляются *дополнительные свободные электроны*, в валентной зоне – *дырки*.

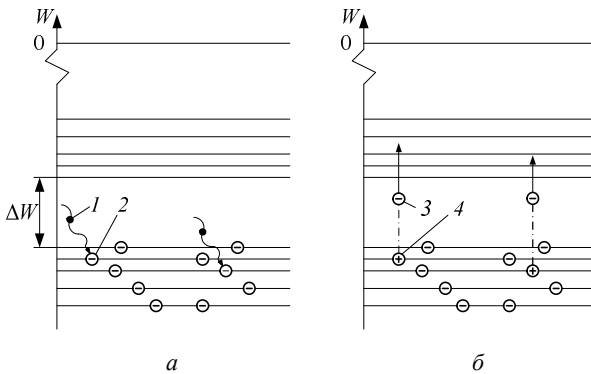


Рис. 5.2. Переход электронов из зоны валентности в зону проводимости через запрещенную зону энергии:
 1 – фотоны; 2 – валентные электроны; 3 – свободные электроны; 4 – дырки

Внутренний фотоэффект – переход электронов из валентной зоны в зону проводимости под действием света.

Электроны, перешедшие в зону проводимости под действием квантов света, называют фотоэлектронами.

Таким образом, облучение полупроводника светом достаточно высокой частоты приводит к увеличению концентрации свободных носителей зарядов и, следовательно, к увеличению собственной проводимости полупроводника.

Фотопроводимость – увеличение проводимости полупроводника под действием света.

Фоторезисторы – полупроводниковые приборы, проводимость которых меняется под действием света. Они используются, например, в турникетах метро, широко применяются в автоматике, фотометрии, оптической спектроскопии и т. д.

Простейший фотодиод представляет собой обычный полупроводниковый диод, в котором обеспечивается возможность воздействия света на *p-n*-переход.

Фотоприемник – устройство на основе *p-n*-перехода, в основе работы лежит явление внутреннего фотоэффекта, при котором в результате поглощения фотонов с энергией, превышающей энергию запрещенной зоны, происходит переход электронов из валентной зоны в зону проводимости.

Описание лабораторной установки

Лабораторная установка для измерения зависимости электротехнических характеристик полупроводников от температуры представлена на рис. 5.3.

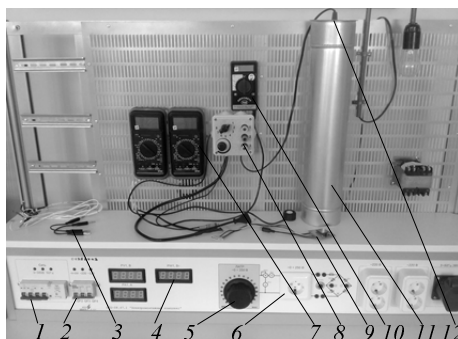


Рис. 5.3. Лабораторный стенд для изучения зависимости электротехнических характеристик полупроводниковых компонентов от освещенности (общий вид)

Подача питания на лабораторный стенд осуществляется с помощью четырехполюсного автоматического выключателя 1 (*QF1*). С помощью однополюсного автоматического выключателя 2 (*QF2*) осуществляется подача питания на розетку 6 ($\sim 0\div 250$ В) через автотрансформатор 5 (ЛАТР $\sim 0\div 250$ В). Соединение элементов установки осуществляется с помощью измерительных проводов 3. С помощью мультиметра Mastech MY64 (M1) 7 производится измерения электрических параметров полупроводниковых компонентов. Блок управления 8 (БУ) предназначен для выбора режима работы лабораторной установки. Основная часть установки представляет собой металлическую трубу 11. В верхней части трубы установлен источник света 12, который подключается к сети переменного напряжения 220 В через розетку 6. В нижней части трубы располагается плата с исследуемыми полупроводниковыми компонентами 9. Применение такой конструкции позволяет минимизировать влияние на результаты измерений естественной освещенности. Изменение мощности P источника света, который подключается к розетке 6, осуществляется с помощью автотрансформатора 5 и контролируется ваттметром 4. Значение освещенности E в плоскости расположения исследуемых компонентов измеряется с помощью люксметра 10.

Плата с исследуемыми полупроводниковыми компонентами подключается к блоку управления, внешний вид платы и блока представлен на рис. 5.4.

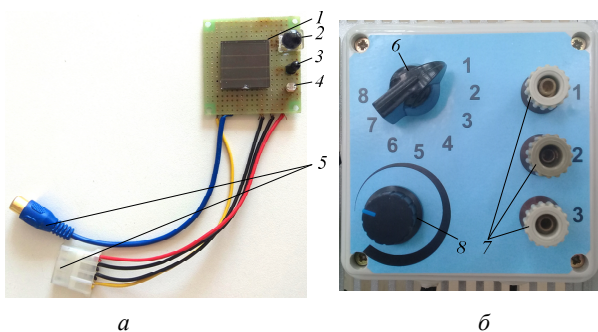


Рис. 5.4. Плата с исследуемыми полупроводниковыми компонентами (а) и блок управления (б):

- 1 – фоторезистор; 2 – солнечный элемент; 3 – фотодиод;
- 4 – фототранзистор; 5 – разъемы для подключения к блоку управления;
- 6 – жакимы для подключения мультиметра M1; 7 – переключатель;
- 8 – потенциометр

Внутри блока управления зажимы 7 («1», «2» и «3») через переключатель 6 подсоединены к полупроводниковым компонентам, потенциометру 8 и нагрузочному резистору. Для измерения электротехнических характеристик полупроводниковых компонентов к зажимам 7 с помощью измерительных проводов подключается мультиметр М1.

Лабораторный стенд работает следующим образом. При включении стенда НТЦ-08.47.1 производится измерение электротехнических характеристик полупроводниковых компонентов при отключенном источнике света ($P = 0$). Далее с помощью ручки ЛАТРа по стендовому ваттметру устанавливаются значения мощности источника света, указанные преподавателем. В каждой контрольной точке измеряются электротехнические характеристики полупроводниковых компонентов.

Методика выполнения лабораторной работы

Указания к самостоятельной подготовке к занятию

1. Изучить литературу по теме лабораторной работы (электронный учебно-методический комплекс «ЭТКМ»).
2. Подготовить отчет установленной формы для выполнения лабораторной работы.

Подготовка к работе

1. Изучить инструкцию по эксплуатации мультиметра Mastech MY64.
2. Подключить плату с исследуемыми полупроводниковыми компонентами к блоку управления и поместить ее в нижнюю часть испытательной емкости.
3. Подключить источник света к розетке « $\sim 0 \div 250$ В» на стенде НТЦ-08.47.1.
4. Для значений мощности источника света, указанных преподавателем, определить значения освещенности по экспериментальной кривой $E = f(P)$ (рис. 5.5). Результаты записать в таблицу.

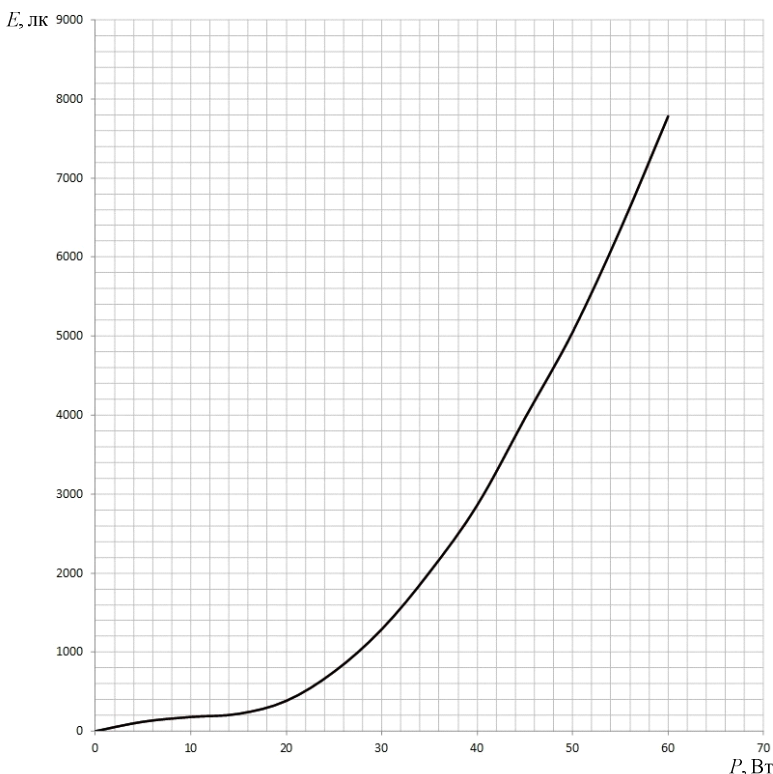


Рис. 5.5. Калибровочный график зависимости $E = f(P)$

Задание 1. Измерить сопротивление фоторезистора при различной освещенности

Порядок выполнения работы

1. Подключить разъемы мультиметра с помощью измерительных проводов к зажимам блока управления по схеме: «COM» → «2»; «Ω» → «1».

2. Включить автоматические выключатели **QF1** и **QF2** и запустить мультиметр. Установить переключатель мультиметра в режим измерения сопротивления.

3. Перевести переключатель блока управления **в позицию 1**. Измерить сопротивление фоторезистора при отключенном источнике света ($P = 0$). Результаты занести в таблицу.

4. С помощью ручки ЛАТРа на стендовом ваттметре поочередно установить значения мощности источника света, указанные в таблицу, и измерить сопротивление фоторезистора. Результаты занести в таблицу.

5. Выключить **QF1** и **QF2**.

6. Построить график зависимости $R = f(E)$ для фоторезистора.

Задание 2. Измерить выходное напряжение солнечной панели при различной освещенности

Порядок выполнения работы

1. Подключить разъемы мультиметра с помощью измерительных проводов к зажимам блока управления по схеме: «СОМ» → «2»; «V» → «1».

2. Включить автоматические выключатели **QF1** и **QF2** и запустить мультиметр. *Установить переключатель мультиметра в режим измерения постоянного напряжения.*

3. Перевести переключатель блока управления **в позицию 2**. Измерить выходное напряжение солнечной панели при отключенном источнике света ($P = 0$). Результаты занести в таблицу.

4. С помощью ручки ЛАТРа по стендовому ваттметру поочередно установить значения мощности источника света, указанные в таблице, и измерить выходное напряжение солнечной панели. Результаты занести в таблицу.

5. Выключить **QF1** и **QF2**.

6. Построить график зависимости $U_{\text{вых}} = f(E)$ для солнечной панели.

Задание 3. измерить сопротивление фотодиода в прямом и обратном направлениях при различной освещенности

Порядок выполнения работы

1. Подключить разъемы мультиметра с помощью измерительных проводов к зажимам блока управления по схеме: «СОМ» → «2»; «Ω» → «1».

2. Включить автоматические выключатели **QF1** и **QF2** и запустить мультиметр. *Установить переключатель мультиметра в режим измерения сопротивления.*

3. Перевести переключатель блока управления *в позицию 3*. Измерить сопротивление фотодиода в прямом направлении при отключенном источнике света ($P = 0$). Результаты занести в таблицу (колонка «пр.»).

4. С помощью ручки ЛАТРа по стендовому ваттметру поочередно установить значения мощности источника света, указанные в таблице, и измерить сопротивление фотодиода в прямом направлении. Результаты занести в таблицу (колонка «пр.»).

5. Выключить **QF1** и **QF2**. Подключить разъемы мультиметра к зажимам блока управления по схеме: «СОМ» → «1»; «Ω» → «2».

6. Включить **QF1** и **QF2**. Измерить сопротивление фотодиода в обратном направлении в тех же контрольных точках мощности (в соответствии с п.п. 3.3–3.4). Результаты занести в таблицу (колонка «пр.»).

Внимание! Значения сопротивления, выходящие за пределы измерения мультиметра, а также неопределенные показания мультиметра в переходном режиме фотодиода уточняйте у преподавателя.

7. Выключить **QF1** и **QF2**.

8. Построить графики зависимости $R_{пр} = f(E)$ и $R_{обр} = f(E)$ для фотодиода в прямом и обратном направлениях соответственно.

Задание 4. Измерить выходное напряжение фототранзистора при различной освещенности

Порядок выполнения работы

1. Подключить разъемы мультиметра с помощью измерительных проводов к зажимам блока управления по схеме: «СОМ» → «2»; «V» → «1».

2. Включить автоматические выключатели **QF1** и **QF2** и запустить мультиметр. *Установить переключатель мультиметра в режим измерения постоянного напряжения.*

3. Перевести переключатель блока управления *в позицию 4*. Измерить выходное напряжение фототранзистора при отключенном источнике света ($P = 0$). Результаты занести в таблицу.

4. С помощью ручки ЛАТРа по стендовому ваттметру поочередно установить значения мощности источника света, указанные в таблице, и измерить выходное напряжение фототранзистора. Результаты занести в таблицу.

5. Выключить **QF1** и **QF2**.

6. Построить график зависимости $U_{\text{вых}} = f(E)$ для фототранзистора.

Таблица

Зависимость электротехнических параметров полупроводниковых компонентов от освещенности

Мощность источника света P , Вт	Освещенность E , лк	Фоторезистор R , Ом	Солнечная панель $U_{\text{вых}}$, В	Фотодиод R , Ом		Фототранзистор $U_{\text{вых}}$, В
				пр.	обр.	
0						
5						
10						
15						
20						
25						
30						
35						
40						
45						
50						
55						
60						

Выводы

Сделать и записать выводы по проделанной работе с объяснением полученных зависимостей. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Таблица с результатами измерений.

4. Графики зависимости $R = f(E)$ – для фоторезистора, $R_{\text{пр}} = f(E)$ и $R_{\text{обр}} = f(E)$ – для фотодиода, $U_{\text{вых}} = f(E)$ – для фототранзистора и солнечной панели (по данным таблицы).

5. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Назовите основное свойство класса материалов «полупроводники».
2. Что является носителями электрического тока в полупроводниках?
3. Какие носители тока в примесных полупроводниках?
4. Дайте определение собственным и примесным полупроводникам.
5. Какие полупроводники применяют в технике?
6. Дайте определение легированию.
7. «Дырка» в теории полупроводников. Что это такое?
8. Какой полупроводник называют полупроводником p -типа, какой – n -типа?
9. Дайте определение полупроводниковому компоненту.
10. Как в зонной теории представлены распределения электронов по энергиям для различных материалов?
11. Дайте определение внутреннему фотоэффекту.
12. Каков характер зависимости собственной проводимости полупроводника от освещенности?

Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТОМЯГКИХ ФЕРРИТОВ

Цель работы: изучить магнитные свойства материалов.

Задачи работы:

1. Изучить основные магнитные характеристики материалов.
2. Снять параметры петли гистерезиса исследуемых образцов ферромагнитных материалов.
3. Построить кривые намагничивания $B = f(H)$ и графики зависимости $\mu_r = f(H)$ для исследуемых образцов магнитных материалов.

Краткие теоретические сведения

Магнитные свойства материалов обусловлены элементарными внутриатомными токами: вращением электронов вокруг собственной оси (электронный спин) и орбитальным вращением электронов вокруг ядра.

Для описания магнитных свойств материалов используют следующие характеристики:

- магнитный поток Φ ;
- магнитная индукция B ;
- магнитная проницаемость μ ;
- напряженность магнитного поля H .

Важнейшей характеристикой магнитных свойств материала является абсолютная магнитная проницаемость μ , Гн/м:

$$\mu = \frac{B}{H}, \quad (6.1)$$

где B – магнитная индукция, Тл;

H – напряженность магнитного поля, А/м.

На практике удобнее пользоваться относительной магнитной проницаемостью μ_r :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}, \quad (6.2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная.

Эта величина позволяет сравнить между собой разные материалы: *диамагнетики* (относительная магнитная проницаемость $\mu_r < \sim 1$), *парамагнетики* ($\mu_r \sim > 1$) и *ферромагнетики* ($\mu_r \gg 1$). На практике в электротехнических устройствах используют только ферромагнитные материалы.

Все ферромагнетики характеризуются:

- 1) кристаллическим строением;
- 2) большим значением магнитной проницаемости, нелинейной зависимостью ее от напряженности поля;
- 3) способностью намагничиваться до насыщения при обычных температурах даже в слабых полях;
- 4) явлением гистерезиса – отставанием индукции магнитного поля в образце от напряженности магнитного поля в вакууме в циклах намагничивания-размагничивания;
- 5) наличием точки Кюри, т. е. температуры, выше которой материал теряет ферромагнитные свойства (переходит в парамагнитное состояние).

В ферромагнетиках, даже в отсутствие внешнего магнитного поля, имеются микроскопические области, называемые магнитными доменами, в которых магнитные моменты электронов выстроены параллельно друг другу. Магнитные моменты отдельных доменов ориентированы неупорядоченно, вследствие чего суммарная намагниченность их по всему материалу равна нулю. При наложении внешнего поля происходит поворот магнитных моментов доменов и выстраивание их в направлении поля, в результате чего ферромагнетик намагничивается.

Магнитные свойства ферромагнетиков характеризуются зависимостями магнитной индукции B от напряженности поля H и потерь на перемагничивание P от индукции и частоты.

Кривые намагничивания – это зависимости вида $B = f(H)$. Кривую намагничивания $B = f(H)$ и зависимость относительной магнитной проницаемости от напряженности поля $\mu_r = f(H)$ можно рассмотреть на примере электротехнической стали (рис. 6.1).

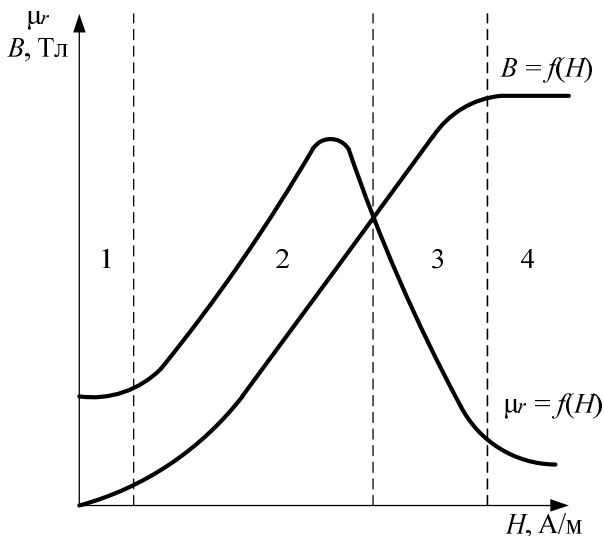


Рис. 6.1. Кривая намагничивания $B = f(H)$ и график зависимости $\mu_r = f(H)$ электротехнической стали

В области очень слабых магнитных полей (участок 1) магнитная индукция растет линейно с ростом напряженности, магнитная проницаемость остается постоянной. В области средних полей (участок 2) магнитная проницаемость резко возрастает и проходит через максимум. Магнитная индукция на этом участке кривой резко увеличивается, затем наступает замедление роста. В области средних полей (участок 3) происходит лишь слабое увеличение магнитной индукции, в области сильных полей (участок 4) она почти прекращается. Здесь наступает насыщение, т. е. завершается поворот всех векторов доменов. Магнитная проницаемость на этих участках уменьшается.

Начальная кривая намагничивания (рис. 6.1) получена при условии, что вещество предварительно было размагничено.

При циклическом изменении напряженности магнитного поля от $+H_{\max}$ до $-H_{\max}$ кривая изменения индукции примет форму замкнутой кривой – *петли гистерезиса* (рис. 6.2). Петлю гистерезиса, полученную при условии достижения материалом намагниченности насыщения, называют предельной.

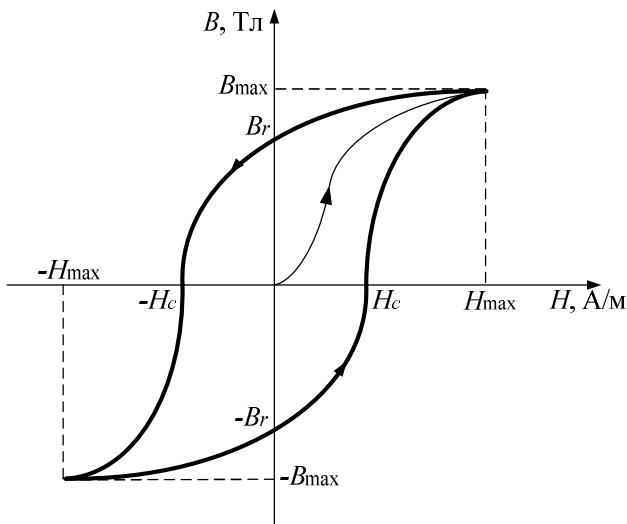


Рис. 6.2. Петля гистерезиса ферромагнитного материала

Основными характеристиками петли гистерезиса являются:

- остаточная индукция B_r ;
- коэрцитивная сила H_c ;
- индукция насыщения B_{\max} ;
- напряженность насыщающего магнитного поля H_{\max} ;
- площадь петли, характеризующая потери на гистерезис w , за один цикл перемагничивания.

Остаточная индукция B_r – это индукция, которая остается в предварительно намагниченном образце после снятия внешнего магнитного поля H .

Коэрцитивная сила H_c – размагничивающее поле, которое должно быть приложено к предварительно намагниченному образцу для того, чтобы индукция B в нем стала равной нулю.

Циклическое перемагничивание материала происходит с определенной потерей энергии, выделяющейся внутри материала в виде тепла. Потери энергии на один цикл перемагничивания пропорциональны площади петли гистерезиса и равны сумме потерь на перемагничивание и на вихревые токи. При перемагничивании сердечника происходит переориентация доменов, что требует определенных затрат энергии. Энергия также расходуется

на создание электродвижущей силы и связанных с ней вихревых токов в сердечнике.

Общепринято выделение двух основных групп магнитных материалов – магнитомягкие и магнитотвердые.

Магнитомягкие материалы обладают характерными свойствами: малая коэрцитивная сила, значит, узкая петля гистерезиса; способность намагничиваться до насыщения даже в слабых полях (высокая магнитная проницаемость); малые потери на перемагничивание.

Магнитотвердые материалы (материалы для постоянных магнитов) характеризуются большой коэрцитивной силой, значит, широкой петлей гистерезиса с большой площадью, и большой удельной энергией. Так как эта энергия пропорциональна площади петли, то энергия тем больше, чем больше остаточная индукция B_r и коэрцитивная сила H_c материала.

Разница в коэрцитивной силе магнитотвердых и магнитомягких материалов достигает больших значений. Для лучших промышленных магнитомягких материалов коэрцитивная сила может достигать $H_c \sim 0,4$ А/м, для магнитотвердых – $H_c \sim 800\,000$ А/м, т. е. различие составляет $2 \cdot 10^6$ раз.

Большую часть применяемых в технике магнитотвердых материалов составляют литые сплавы, которые получают с помощью термомагнитной обработки (охлаждение сплава от $1250\text{ }^\circ\text{C}$ до $500\text{ }^\circ\text{C}$ в магнитном поле). Этот метод позволяет получить кристаллическую магнитную текстуру. Широко применяют также магнитотвердые ферриты: бариевый ($\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$), стронциевый ($\text{SrO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$), феррит кобальта $\text{CoO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

К магнитомягким материалам относятся, например, технически чистое железо, электротехническая сталь, а также магнитомягкие ферриты.

Ферриты – магнитные материалы состава $\text{MeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (MeO – окислы различных металлов), получаемые по керамической технологии, т. е. спеканием порошков при температуре значительно ниже температур их плавления.

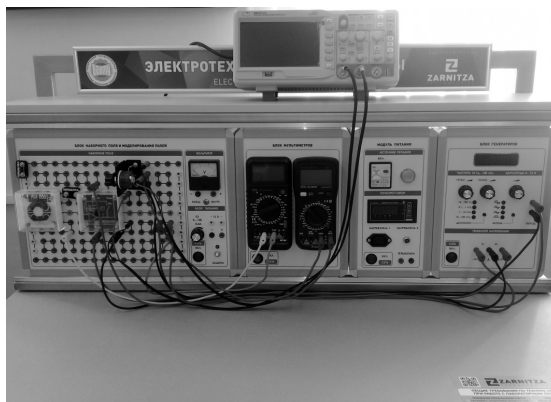
К наиболее используемым магнитомягким ферритам относятся никель-цинковые ($\text{NiO} \cdot \text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) и марганец-цинковые ($\text{MnO} \cdot \text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$).

Описание лабораторной установки

Для изучения параметров петли гистерезиса исследуемых образцов ферромагнитных материалов используют лабораторный стенд «Электротехнические материалы» (рис. 6.3, а) и стенд с собранной для изучения материала электрической схемой (рис. 6.3, б).



а



б

Рис. 6.3. Лабораторный стенд «Электротехнические материалы» (а) и стенд с собранной электрической схемой для изучения образцов ферромагнитных материалов (б) (общий вид)

Петлю гистерезиса наблюдают на экране осциллографа АКПП-4115/1А.

На пластины горизонтальной развертки осциллографа (вход X) подается сигнал, меняющийся со временем пропорционально напряженности магнитного поля H , на пластины вертикальной развертки (вход Y) – сигнал, пропорциональный индукции магнитного поля B . Луч на экране осциллографа будет описывать петлю гистерезиса $B = f(H)$.

Исследуемый образец из ферромагнитного материала в форме тороида является сердечником двух обмоток (рис. 6.4): первичной (намагничивающей) с числом витков N_1 и вторичной с числом витков N_2 , предназначенной для измерения величины B .

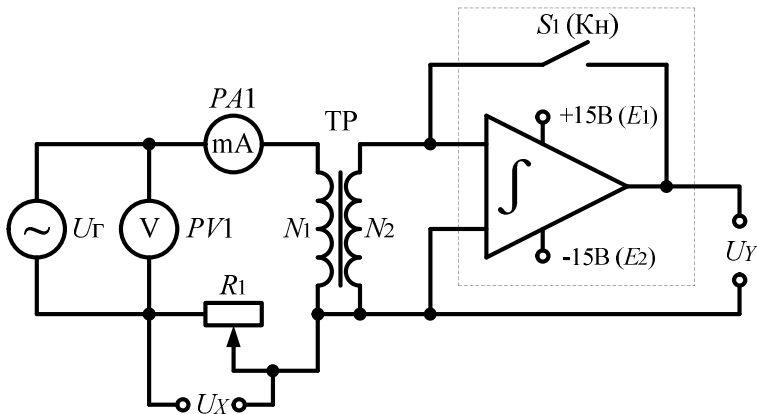


Рис. 6.4. Электрическая схема установки для снятия параметров петли гистерезиса ферромагнитных материалов:

U_{Γ} – генератор сигналов специальной формы;

R_1 – миниблок «Реостат» с сопротивлением R_1 ;

$PA1$ – мультиметр (режим А ~ 20 мА, входы COM, mA);

$PV1$ – мультиметр (режим В ~ 20 В, входы COM, V);

TP – миниблок «Ферромагнетик»

(тороид с первичной N_1 и вторичной N_2 обмотками);

S_1 (Кн) – ключ (входит в состав интегратора тока);

\int – миниблок «Интегратор тока»;

U_X – напряжение, подаваемое на вход X осциллографа ($U_X = UR \sim I \sim H$);

U_Y – напряжение, подаваемое на вход Y осциллографа ($U_Y = U_{\text{инт}} \sim Q \sim B$)

Первичная N_1 и вторичная N_2 обмотки намотаны на кольцевой сердечник, который изготовлен из исследуемого ферромагнитного материала. Первичную обмотку, по которой протекает переменный

ток, используют для намагничивания магнетика и по ее параметрам определяют напряженность H при градуировке шкалы X осциллографа. Для измерения мгновенных значений H переменного магнитного поля на вход X осциллографа подают сигнал с реостата R_1 .

Вторичная обмотка предназначена для измерения мгновенных значений индукции магнитного поля в сердечнике B . С этой целью на вход Y осциллографа подают напряжение с интегратора.

Режим генератора сигналов специальной формы – синусоидальный сигнал (светится индикатор формы «~»).

Напряженность магнитного поля H в образце при протекании в первичной обмотке тока I можно рассчитать по формуле, А/м:

$$H = \frac{IN_1}{l}, \quad (6.3)$$

где N_1 – число витков первичной обмотки;

l – длина средней осевой линии тороида, м.

На вход X осциллографа подают падение напряжения на сопротивлении R_1 (см. рис. 6.4), пропорциональное току I в первичной обмотке тороида. Следовательно, напряженность магнитного поля в образце пропорциональна отклонению луча x по оси X :

$$H = n \cdot x, \quad (6.4)$$

где n – коэффициент пропорциональности.

Величину n можно найти, измеряя x для известного значения H . Для этого используют максимальное смещение луча x_{\max} (в мм) в вершине петли гистерезиса, которое соответствует амплитуде напряженности $H_{\max} = n \cdot x_{\max}$ и амплитудному значению тока в первичной обмотке, А:

$$I_{\max} = \sqrt{2} \cdot I, \quad (6.5)$$

где I – действующее значение тока, измеряемое мультиметром, А.

Подставив амплитудные значения в формулы (6.3) и (6.4), получим:

$$n = \frac{\sqrt{2} \cdot IN_1}{lx_{\max}}. \quad (6.6)$$

Измерение индукции магнитного поля в ферромагнетике B проводится следующим образом. При изменении магнитного поля, созданного первичной обмоткой, во вторичной возникает ЭДС индукции ε_i (величина ее пропорциональна скорости изменения магнитного потока) и индукционный ток I_i , А:

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R_2} = \frac{N_2}{R_2} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{N_2 S}{R_2} \frac{dB}{dt}, \quad (6.7)$$

где N_2 – число витков вторичной обмотки;

Φ – магнитный поток через один виток тороида, Вб;

S – площадь поперечного сечения сердечника, м²;

B – индукция магнитного поля в тороиде, Тл;

R_2 – сопротивление цепи вторичной обмотки, Ом.

В результате протекания индукционного тока в цепи вторичной обмотки (см. рис. 6.4) на интеграторе накапливается заряд Q , Кл:

$$Q = \int_0^t I_i dt = \frac{N_2 S}{R_2} \int_0^t dB = \frac{N_2 S}{R_2} B(t). \quad (6.8)$$

Напряжение U_Y , выдаваемое с интегратора на вход Y осциллографа, будет пропорционально индукции магнитного поля:

$$U_Y = \frac{Q}{\gamma} = \frac{N_2 S}{\gamma R_2} B(t), \quad (6.9)$$

где γ – градуировочная постоянная интегратора.

Это напряжение приводит к отклонению γ (мм) луча по вертикали:

$$U_Y = \frac{K_Y}{l_{\text{дел}}}, \quad (6.10)$$

где K_Y – цена деления оси Y , зависящая от положения ручки «Усиление» потенциометра усилителя Y осциллографа;

$l_{\text{дел}}$ – длина большого деления оси Y осциллографа, мм.

Линейные соотношения (6.9) и (6.10) приводят к пропорциональности $B(t) \sim y$, которую можно представить в следующем виде:

$$B = m y, \quad (6.11)$$

где m – коэффициент, зависящий от параметров установки.

$$m = \frac{\gamma R_2}{N_2 S_{\text{дел}}} K_Y. \quad (6.12)$$

Используя формулы (6.4) и (6.11), определим удельную энергию w перемагничивания ферромагнитного материала:

$$w = \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{H} = mn \oint y dx = mn S_{\text{п}}, \quad (6.13)$$

где $S_{\text{п}}$ – площадь петли гистерезиса, мм².

Методика выполнения лабораторной работы

Указания к самостоятельной подготовке к занятию

1. Изучить литературу по теме лабораторной работы (электронный учебно-методический комплекс «ЭТКМ»).
2. Подготовить отчет установленной формы для выполнения лабораторной работы.

Подготовка к работе

В работе исследуются три образца магнитомягких марганец-цинковых феррита $\text{MnO} \cdot \text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, различающихся по соотношению компонент состава (маркировки образцов 600 нм, 1000 нм и 2000 нм). Исследуемые образцы в форме тороида являются сердечниками двух обмоток трансформатора.

1. Изучить инструкцию по эксплуатации мультиметров Mastech MY64 и MY65.
2. Изучить руководство по эксплуатации осциллографа АКПП-4115/1А.
3. На мультиметре М1 выбрать режим измерения переменного тока ($A \sim 200 \text{ мА}$), на мультиметре М2 выбрать режим измерения переменного напряжения ($V \sim 20 \text{ В}$).
4. Установить в модуль «Блок наборного поля и моделирования полей» образец № 1 (600 нм).

Выполнить задания 1–3 для образца № 1 (600 нм), данные занести в соответствующие строки табл. 6.1, 6.2, 6.3 и 6.4.

Задание 1. Произвести калибровку лабораторной установки

Порядок выполнения работы

1. Подать питание на схему:
 - включить автоматический выключатель модуля «Модуль питания»;
 - перевести клавишные выключатели «Сеть» модулей «Блок генераторов» и «Блок мультиметров» в положение «ВКЛ».
2. Включить осциллограф АКПП-4115/1А. Перевести осциллограф в режим «X-Y» и вывести электронный луч в центр экрана.
3. Замкнуть ключ S_1 (красная кнопка) интегратора тока, установленного в модуле «Блок наборного поля и моделирования полей».
4. На модуле «Блок генераторов»:
 - с помощью тактовых кнопок выбрать **диапазон «0,1–1,0 кГц»**;
 - с помощью тактовых кнопок выбрать **форму сигнала «~»**;
 - регуляторами «Грубо» и «Точно» установить **значение частоты 500 Гц**.
5. Определить постоянные осциллографа. Для этого:
 - определить цену деления K_Y оси Y осциллографа (указана на экране цифрового осциллографа как $CH2$ синим цветом);
 - определить длину большого деления оси Y осциллографа $l_{дел}$ (посчитать количество малых делений в одной клетке).Результаты занести в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Параметры лабораторной установки

Образец	N_1	N_2	$l, \text{ м}$	$S, \text{ м}^2$	$R_2, \text{ Ом}$	$\gamma, \text{ Кл/В}$	$K_Y, \text{ В}$	$l_{дел}, \text{ дел}$
600 нм	80	80	0,038	$35 \cdot 10^{-6}$	170	85,3· 10 ⁻⁸		
1000 нм	80	80	0,11	$96 \cdot 10^{-6}$	150			
2000 нм	80	80	0,11	$96 \cdot 10^{-6}$	150			

6. Регулятором «Амплитуда» на модуле «Блок генераторов», опираясь на показания мультиметра РА1, плавно увеличить ток в обмотке тороида до значения 12 мА. Поворачивая ручку осциллографа «Усиление», установить наибольшие размеры петли, которые вписываются в экран осциллографа.

7. Измерить в делениях значение x_{\max} , которое соответствует *координате вершины петли гистерезиса* по оси X экрана. Значения x_{\max} занести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Результаты калибровки лабораторной установки

Образец	I , мА	x_{\max} , дел	n , А/м·дел	m , Тл/дел
600 нм	12			
1000 нм	12			
2000 нм	12			

8. С учетом параметров установки коэффициенты n и m можно рассчитать по формулам (6.6) и (6.12) соответственно:

$$n_{600 \text{ нм}} = 2,98 \frac{I}{x_{\max}}; n_{1000 \text{ нм}} = 1,03 \frac{I}{x_{\max}}; n_{2000 \text{ нм}} = 1,03 \frac{I}{x_{\max}}, \quad (6.14)$$

$$m_{600 \text{ нм}} = 0,052 \frac{K_Y}{l_{\text{дел}}}; m_{1000 \text{ нм}} = 0,017 \frac{K_Y}{l_{\text{дел}}}; m_{2000 \text{ нм}} = 0,017 \frac{K_Y}{l_{\text{дел}}}. \quad (6.15)$$

Рассчитать коэффициенты n и m , соответственно, по формулам (6.14) и (6.15). Результаты расчета занести в табл. 6.2.

Задание 2. Измерение параметров петли магнитного гистерезиса

Порядок выполнения работы

1. Измерить в делениях координаты точек x и y петли гистерезиса, которые соответствуют величинам коэрцитивной силы H_c , остаточной индукции B_r , напряженности насыщения H_{\max} и индукции насыщения B_{\max} . Результаты измерений занести в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Результаты определения координат характерных точек петли гистерезиса

Образец	H_c		B_r		H_{\max}		B_{\max}	
	x , дел	А/м	y , дел	Тл	x , дел	А/м	y , дел	Тл
600 нм								
1000 нм								
2000 нм								

2. Рассчитать параметры петли гистерезиса H_c , H_{\max} , B_r , B_{\max} исследуемого образца ферромагнетика, используя, соответственно, формулы (6.4) и (6.11).

3. Перенести в отчет осциллограмму петли гистерезиса. Результаты расчетов занести в табл. 6.3.

Задание 3. Получение основной кривой намагничивания

Порядок выполнения работы

1. Размагнитить исследуемый образец. Для этого довести ток до нуля, постепенно уменьшая ток I в первичной обмотке с помощью регулятора уровня выходного напряжения «Амплитуда» генератора сигналов специальной формы. При этом площадь петли гистерезиса сократится до размеров точки. Убедиться, что она установлена в центре экрана.

2. Установить ток в первичной обмотке I равным 2,5 мА (табл. 6.4) и получить на экране осциллографа частный цикл петли гистерезиса.

3. Измерить координаты вершины петли x_{\max} и y_{\max} в делениях.

4. Выполнить аналогичные измерения для значений токов, указанных в табл. 6.4. Результаты измерений занести в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Результаты измерений для получения основной кривой намагничивания

Образец	I , мА	x_{\max} , дел	y_{\max} , дел	H_{\max} , А/м	B_{\max} , Тл	μ_r
600 нм	2,5					
	5,0					
	7,5					
	10,0					
	12,5					
1000 нм	2,5					
	5,0					
	7,5					
	10,0					
	12,5					
2000 нм	2,5					
	5,0					
	7,5					
	10,0					
	12,5					

5. Рассчитать параметры петли гистерезиса H_{\max} , B_{\max} исследуемого образца ферромагнетика, используя, соответственно, формулы (6.4) и (6.11).

6. Вычислить относительную магнитную проницаемость μ_r :

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (6.16)$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

Результаты расчетов занести в табл. 6.4.

Выполнить задания 1–3 для образцов № 2 (1000 нм) и № 3 (2000 нм).

Результаты измерений и расчетов занести в табл. 6.1–6.4.

По данным табл. 6.4 построить основную кривую намагничивания $B = f(H)$ и график зависимости $\mu_r = f(H)$ для трех образцов.

Выводы

Сделать и записать выводы по проделанной работе с объяснением полученных зависимостей. Подготовить отчет по проделанной работе в соответствии с установленными требованиями.

Содержание отчета

1. Тема и цель работы.
2. Краткий конспект теоретического материала.
3. Электрическая схема лабораторной установки (рис. 6.4).
4. Расчетные формулы (6.4), (6.11), (6.14)–(6.16).
5. Таблицы 6.1–6.4 с результатами измерений расчетов.
6. Графики зависимости $B = f(H)$ и $\mu_r = f(H)$ для трех образцов исследуемых ферромагнитных материалов.
7. Выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение магнитному материалу «ферромагнетик».
2. Перечислите основные свойства ферромагнетиков.
3. Дайте определение магнитной проницаемости.

4. Объясните явление магнитного гистерезиса.
5. Нарисуйте петлю гистерезиса, назовите 4 основные точки петли.
6. Дайте определение магнитному домену.
7. Дайте определение ферриту.
8. Приведите формулу феррита.
9. Перечислите общие свойства ферритов.
10. В чем отличие магнитомягких материалов от магнитотвердых?
11. По каким параметрам материал относится к магнитомягким?
12. Где применяются магнитомягкие материалы?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основной

1. Материаловедение : учебник / Б. Н. Арзамасов [и др.]. – 4-е изд., стереотип. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 646 с.
2. Сапунов, С. В. Материаловедение : учебное пособие / С. В. Сапунов. – СПб. : Лань, 2015. – 202 с.
3. Серебряков, А. С. Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы : учебное пособие / А. С. Серебряков. – М. : Маршрут, 2005. – 280 с.
4. Журавлева, Л. В. Электроматериаловедение : учебник / Л. В. Журавлева. – 7-е изд., испр. – М. : Академия, 2012. – 352 с.
5. Готтштайн, Г. Физико-химические основы материаловедения = Physical Foundations of Materials Science / Г. Готтштайн; под ред. В. П. Зломанова. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 400 с.
6. Электротехнические и конструкционные материалы : учебное пособие / В. Н. Бородулин [и др.]; под общ. ред. В. А. Филикова. – М. : Мастерство : Высшая школа, 2001. – 280 с.

Дополнительный

7. Лахтин, Ю. М. Материаловедение: учебное пособие / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – М. : Машиностроение, 1980. – 493 с.
8. Солнцев, Ю. П. Материаловедение / Ю. П. Солнцев, Е. И. Пряхин. – СПб. : Химиздат, 2007. – 784 с.
9. Петрова, Л. Г. Электротехнические материалы: учебное пособие / Л. Г. Петрова, М. А. Потапов, О. В. Чудина. – М. : МАДИ (ГТУ), 2008. – 198 с.
10. Агеева, Н. Д. Электротехническое материаловедение : учебное пособие / Н. Д. Агеева, Н. Г. Винаковская, В. Н. Лифанов. – Владивосток : ДВГТУ, 2006. – 115 с.
11. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т. / под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – Т. 1. – 367 с.
12. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т. / под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – Т. 2. – 464 с.
13. Справочник по электротехническим материалам. В 3 т. / под ред. Ю. В. Корицкого, В. В. Пасынкова, Б. М. Тареева. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3. – 728 с.

Технические нормативные правовые акты

14. Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования (с Изменениями № 2 от 01.01.1988 и № 3 от 01.01.1991): ГОСТ 10434–82 / Государственный комитет СССР по стандартам. – Взамен ГОСТ 10434–76; введ. 01.01.1983. – М. : Издательство стандартов, 1986. – 18 с.

15. Материалы электроизоляционные композиционные гибкие. Определения и общие требования: ГОСТ 28602.1–91 (МЭК 626-1–79). – Введ. 01.01.1993. – М. : Издательство стандартов, 1992. – 8 с.

16. Кремний полупроводниковый и кварц. Метод определения примесей: ГОСТ 26239.5–84. – Введ. 01.01.1986. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 20 с.

17. Магниты постоянные для электротехнических изделий. Общие технические требования: ГОСТ 24936–89. – Взамен ГОСТ 24936–81; введ. 01.01.1991. – М. : Издательство стандартов, 1989. – 26 с.

18. Медь. Марки: ГОСТ 859–2014. – Взамен ГОСТ 859–2001; введ. 01.04.2017. – Минск : Госстандарт, 2016. – 8 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

Ткаченко Тамара Михайловна,
Нефедов Святослав Святославович,
Барайшук Сергей Михайлович

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск *С. М. Барайшук*
Редактор *Т. В. Каркоцкая*
Компьютерная верстка *Д. О. Бабаковой*
Дизайн обложки *А. А. Покало*

Подписано в печать 04.10.2021. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 4,88. Уч.-изд. л. 3,82. Тираж 99 экз. Заказ 243.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/359 от 09.06.2014.
№ 2/151 от 11.06.2014.
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.