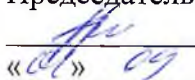
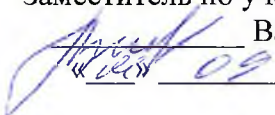


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ МАРИИ ЭЛ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ РЕСПУБЛИКИ МАРИЙ ЭЛ  
«КОЛЛЕДЖ ИНДУСТРИИ И ПРЕДПРИНИМАТЕЛЬСТВА»

Согласовано  
Председатель цикловой методической комиссии  
 Долгова Н.Е.  
«01» 09 2021г.

УТВЕРЖДАЮ  
Заместитель по учебной работе  
 Васюкова Е.Д.  
«01» 09 2021г.

**Методические указания**  
**по выполнению лабораторных и практических работ**  
**дисциплина ОП.04 Материаловедение**

профессия 13.01.10 Электромонтер по ремонту и обслуживанию  
электрооборудование (по отраслям)

Козьмодемьянск, 2021г.

Методические указания по выполнению лабораторных и практических работ  
дисциплина ОП.04 Материаловедение. – Козьмодемьянск: ГБПОУ  
Республика Марий Эл «Колледж индустрии и предпринимательства»

Организация разработчик: ГБПОУ Республика Марий Эл «Колледж  
индустрии и предпринимательства»

Разработчик:

Казанцева Г.Х., преподаватель ГБПОУ Республики Марий Эл «КИиП»

Рассмотрено цикловой методической комиссией преподавателей  
общеобразовательных и профессиональных циклов

Протокол заседания ЦМК

№ 1 от «01» 09 2021г.

Н.Е. Долгова Долгова Н.Е.

## ВВЕДЕНИЕ

Материаловедение является общепрофессиональной дисциплиной, устанавливающей базовые знания для освоения профессии 13.01.10 Электромонтер по ремонту и обслуживанию электрооборудования (по отраслям).

Лабораторные и практические работы – важнейшая составная часть обучения материаловедения. Они имеют большое теоретическое и практическое значение.

Целью работ является развить у обучающихся навыки к самостоятельной работе, дать возможность практически освоить методы определения твердости материалов. Описание работы составлено по следующему плану. Вначале дается задание и цель работы. Далее указывается, какие приборы, материалы и инструмент необходимы для выполнения работы. Дается описание устройства и работы машины, прибора, методика испытания, где подробно, по пунктам, указано, как обучающийся должен провести работу. Имеется теоретическая часть и заканчивается указаниями по составлению отчета. Лабораторные работы каждый обучающийся выполняет самостоятельно, а некоторые работы выполняются малыми группами.

Методические указания по выполнению лабораторных работ по материаловедению разработаны в соответствии с рабочей программой дисциплины.

К выполнению лабораторных работ обучающиеся приступают после подробного изучения соответствующего теоретического материала. Перед проведением лабораторной работы необходимо ознакомиться с устройством оборудования и приборов, ознакомиться с правилами обращения с ними. При проведении испытаний необходимо соблюдать правила техники.

К лабораторным работам допускаются только те обучающиеся, которые ознакомились с правилами техники безопасности, прошли общий инструктаж и инструктаж на каждом рабочем месте и расписались в журнале по технике безопасности. Нельзя без разрешения преподавателя включать рубильники и пускатели, приводить в действие лабораторные машины и оборудование, использовать. Запрещается самостоятельно устранять какие – либо неисправности без разрешения руководителя.

Каждая работа имеет четко составленное задание, где указаны цель и назначение работы, и рассчитана на выполнение в течение одного занятия. Обучающийся, прежде всего, знакомится с оборудованием, после ознакомления с теоретической частью и ходом работы можно приступать к работе. После окончания занятий обучающийся приводит в порядок лабораторное оборудование и рабочее место. В процессе выполнения лабораторной работы и после окончания ее обучающийся должен показать преподавателю полученные им результаты и вытекающие из них выводы. После утверждения преподавателем указанных результатов и выводов каждый студент оформляет отчет по работе, который представляется на проверку и подпись преподавателю в тот же день либо на следующем лабораторном занятии.

**Основные источники:**

1. Журалёва Л.В. Электроматериаловедение. - М: Профиздат, 2020г. - 312с.
2. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Справочник электромонтёра. - М.: Издательский центр «Академия», 2020г. - 288с.

**Дополнительные источники:**

1. Журалёва Л.В. Электроматериаловедение. - М: Профиздат, 2010г.- 312с.
2. Васильев Н.П.Лабораторные работы по электроматериал ведению. - М: Высшая школа, 1973г. - 64с.
3. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Электробезопасность при эксплуатации электроустановок промышленных предприятий. - М.: Издательский центр «Академия», 2020г. - 240с.
4. Нестеренко В.М., Мысьянов А.М. Технология электромонтажных работ. - М.: Издательский центр «Академия», 2020г. - 592с.
5. Москаленко В.В. Справочник электромонтёра. - М.: Издательский центр «Академия», 2020г. - 288с.

**Интернет-ресурсы:**

Сайт [www.technormativ.ru](http://www.technormativ.ru)  
[www.electrical](http://www.electrical)

**Отечественные журналы:** Энергетика

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛЫ ПО МЕХАНИЧЕСКИМ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ  
СВОЙСТВАМ**

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** Ознакомиться с проведением испытания на растяжение и определением показателей прочности и пластичности.

**Материально-техническое обеспечение:** Разрывная машина Р 0,5, штангенциркуль, мерительная линейка, набор проволочных образцов.

**Задание:**

1. Изучите методику проведения испытания на растяжение и определением показателей прочности и пластичности.
2. Составьте отчет о проделанной работе по форме 1
3. Ответьте на контрольные вопросы
4. Напишите вывод

### **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Металлы и сплавы, используемые в качестве конструкционных материалов, должны обладать определенными механическими свойствами – прочностью, упругостью, пластичностью, твердостью.

Прочность – это способность металла сопротивляться деформации и разрушению.

Деформацией называется изменение размеров и формы тела под действием внешних сил. Деформации подразделяются на упругие и пластические. Упругие деформации исчезают, а пластические остаются после окончания действия сил. В основе пластических деформаций – необратимые перемещения атомов от исходных положений на расстояния, большие межатомных, изменение формы отдельных зерен металла, их расположения в пространстве.

Способность металлов пластически деформироваться называется пластичностью. Пластичность обеспечивает конструктивную прочность деталей под нагрузкой и нейтрализует влияние концентраторов напряжений – отверстий, вырезов и т.п. При пластическом деформировании металла одновременно с изменением формы меняется ряд свойств, в частности при холодном деформировании повышается прочность, но снижается пластичность.

Большинство механических характеристик металла определяют в результате испытания образцов на растяжение (ГОСТ 1497-84). При растяжении образцов с площадью поперечного сечения  $F$  и рабочей (расчетной) длиной  $l$  строят диаграмму растяжения в координатах: нагрузка  $P$  – удлинение  $Dl$  образца (рис. 1).

Диаграмма растяжения характеризует поведение металла при деформировании от момента начала нагружения до разрушения образца. На диаграмме выделяют три участка: упругой деформации – до нагрузки  $P_{упр}$ ; равномерной пластической деформации от  $P_{упр}$  до  $P_{max}$  и сосредоточенной пластической деформации от  $P_{max}$  до  $P_k$ . Если образец нагрузить в пределах  $P_{упр}$ , а затем полностью разгрузить и измерить его длину, то никаких последствий нагружения не обнаружится. Такой характер деформирования образца называется упругим. При нагружении образца более  $P_{упр}$  появляется остаточная (пластическая) деформация. Пластическое деформирование идет при возрастающей нагрузке, так как металл упрочняется в процессе деформирования. Упрочнение металла при деформировании называется наклепом. При дальнейшем нагружении пластическая деформация, а вместе с ней и наклеп все более увеличиваются, равномерно распределяясь по всему объему образца. После достижения

максимального значения нагрузки  $P_{\max}$  в наиболее слабом месте появляется местное утонение образца – шейка, в которой в основном и протекает дальнейшее пластическое деформирование. В это время между деформированными зернами, а иногда и внутри самих зерен могут зарождаться трещины. В связи с развитием шейки, несмотря на продолжающееся упрочнение металла, нагрузка уменьшается от  $P_{\max}$  до  $P_k$ , и при нагрузке  $P_k$  происходит разрушение образца. При этом упругая деформация образца ( $Dl_{\text{упр}}$ ) исчезает, а пластическая ( $Dl_{\text{ост}}$ ) остается (рис. 1).

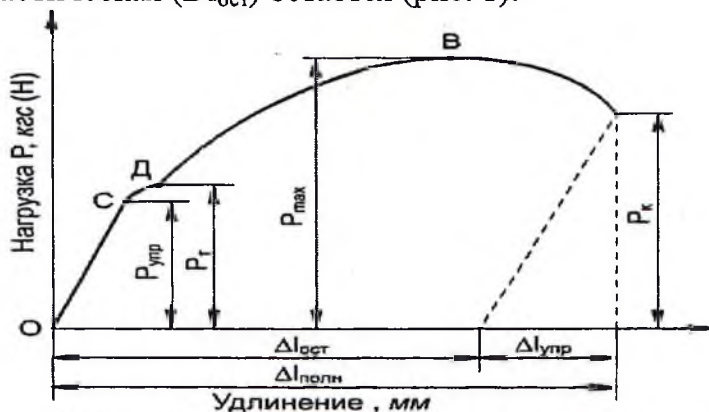


Рисунок 1- Диаграмма растяжения металла

При деформировании твердого тела внутри него возникают внутренние силы. Величину сил, приходящуюся на единицу площади поперечного сечения образца, называют напряжением. Размерность напряжения  $\text{кгс}/\text{мм}^2$ , или  $\text{МПа}$  ( $1\text{кгс}/\text{мм}^2=10\text{МПа}$ ).

Отмеченные выше нагрузки на кривой растяжения ( $P_{\text{упр}}$ ,  $P_T$ ,  $P_{\max}$ ,  $P_k$ ) служат для определения основных характеристик прочности (напряжений): предела упругости, физического предела текучести, временного сопротивления (предела прочности) и истинного сопротивления разрушению. В технических расчетах вместо предела прочности обычно используется условный предел текучести, которому соответствует нагрузка  $P_{0,2}$  (рис. 2).

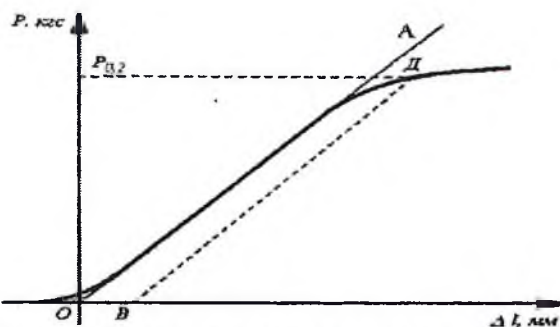


Рисунок 2- Участок диаграммы растяжения металла

При растяжении образец удлиняется, а его поперечное сечение непрерывно уменьшается. Но поскольку площадь поперечного сечения образца в каждый данный момент определить сложно, то при расчете предела упругости, предела текучести и временного сопротивления пользуются условными напряжениями, считая, что поперечное сечение образца остается неизменным. Истинное напряжение рассчитывается только при определении сопротивления разрушению.

Условный предел текучести ( $s_{0,2}$ ) – это напряжение, при котором образец получает остаточное (пластическое) удлинение, равное 0,2 % своей расчетной длины:

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}$$

где  $P_{0,2}$  – нагрузка, вызывающая остаточное (пластическое) удлинение; равное 0,2

%, кгс (Н);

$F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>.

Временное сопротивление (предел прочности)  $s_b$  – это напряжение, соответствующее наибольшей нагрузке, предшествующей разрушению образца.

$$\sigma_b = \frac{P_{\max}}{F_0};$$

где  $P_{\max}$  – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению, кгс (Н). Временное сопротивление (предел прочности) характеризует несущую способность материала, его прочность, предшествующую разрушению.

Истинное сопротивление разрушению ( $S_k$ ) – истинное напряжение, предшествующее моменту разрушения образца

$$S_k = \frac{P_k}{F_k},$$

где  $P_k$  – нагрузка, непосредственно предшествующая моменту разрушения, кгс (Н).  $F_k$  – площадь поперечного сечения образца в месте разрушения, мм<sup>2</sup>.

Несмотря на то, что  $P_{\max}$  больше  $P_k$ , истинное сопротивление разрушению  $S_k > s_b$ , поскольку площадь поперечного сечения образца в месте разрушения  $F_k$  значительно меньше начальной площади поперечного сечения  $F_0$ .

Для оценки пластичности металла служат относительное остаточное удлинение образца при растяжении ( $d_p$ , %) и относительное остаточное сужение площади поперечного сечения образца ( $y_p$ , %).

Относительное остаточное удлинение ( $d_p$ , %) определяется по формуле:

$$\delta_p = \frac{l_k - l_0}{l_0} 100\%$$

где  $l_k$  – рабочая длина образца после испытания, мм;  $l_0$  – рабочая длина до испытания, мм.

Относительное остаточное сужение ( $y_p$ , %) определяется из выражения:

$$\psi_p = \frac{F_0 - F_k}{F_0} 100\%$$

где  $F_0$  – начальная площадь поперечного сечения образца, мм<sup>2</sup>;

$F_k$  – площадь сечения образца вместе разрушения, мм<sup>2</sup>.

Практически для определения нагрузки, которая вызывает деформацию, соответствующую условному пределу текучести, следует выполнить следующие действия.

На диаграмме растяжения провести прямую ОА (рис. 2), совпадающую с прямолинейным участком диаграммы растяжения.

Определить положение точки О. Через точку О провести ось ординат ОР. Масштаб записи диаграммы по нагрузке: одному миллиметру ординаты соответствует 2 кгс нагрузки. Численная величина искомой нагрузки Р (кгс) равна соответствующей ординате диаграммы (мм), умноженной на масштаб диаграммы (2 кгс/мм).

Для определения нагрузки, соответствующей условному пределу текучести  $R_{0,2}$ , необходимо от начала координат по оси абсцисс отложить отрезок ОВ, величина которого равна заданному остаточному удлинению 0,2 %. Длина отрезка ОВ (мм) рассчитывается исходя

$$OB = \frac{l_0 \cdot 0,2 \cdot M}{100},$$

где  $l_0$  – рабочая длина образца, мм; М – масштаб записи диаграммы по деформации.

Из точки В провести прямую ВД, параллельную прямолинейному участку диаграммы растяжения (рис. 2), до пересечения с диаграммой. Используя известный

масштаб записи диаграммы по нагрузке, определить численные значения нагрузок  $P_{0,2}$ ,  $P_{max}$ ,  $P_K$ , после чего рассчитать соответствующее напряжения:  $s_{0,2}$ ,  $s_b$ ,  $s_k$ . Полученные данные занести в протокол испытания.

## ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЯ

Марка материала \_\_\_\_\_

№ п/п	Снимаемые параметры	Обозначение	Размер	Численные величины
<b>Исходные данные</b>				
1.	Рабочая длина образца до испытания	$l_0$	мм	
2.	Диаметр образца до испытания	$d_0$	мм	
3.	Площадь поперечного сечения образца до испытания	$F_0$	мм <sup>2</sup>	
4.	Масштаб записи диаграммы по деформации	$M$		
<b>Результаты испытаний</b>				
5.	Нагрузка, соответствующая пластическому удлинению образца на 0,2 %	$P_{0,2}$	кгс	
6.	Максимальная нагрузка при испытании	$P_{max}$	кгс	
7.	Нагрузка в момент разрушения	$P_K$	кгс	
8.	Диаметр образца в месте разрушения	$d_K$	мм	
9.	Площадь поперечного сечения образца в месте разрушения	$F_K$	мм <sup>2</sup>	
10.	Рабочая длина образца после испытания	$l_K$	мм	
<b>Характеристика прочности и пластичности</b>				
11.	Условный предел текучести	$\sigma_{0,2}$	кгс/мм <sup>2</sup>	
12.	Временное сопротивление (предел прочности)	$\sigma_b$	кгс/мм <sup>2</sup>	
13.	Истинное сопротивление разрушению	$s_k$	кгс/мм <sup>2</sup>	
14.	Относительное остаточное удлинение	$\delta_p$	%	
15.	Относительное остаточное сужение	$\psi_p$	%	

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Диаграмма растяжения (рис. 1).
4. Определения основных характеристик прочности и пластичности.
5. Протокол испытаний.
6. Выводы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какими механическими свойствами характеризуются конструкционные материалы?
2. Что такое прочность?
3. Что называется деформацией?
4. Что называется упругой деформацией?
5. Что называется пластической деформацией?
6. Как влияет холодная пластическая деформация на прочность и пластичность?
7. Какие характерные участки можно выделить на диаграмме растяжения?
8. Почему пластическая деформация идет при возрастающей нагрузке?
9. Что такое наклеп, напряжение?
10. Почему различают истинные и условные напряжения?
11. Что такое условный предел текучести, временное сопротивление и истинное сопротивление разрушению?
12. Какие вы знаете характеристики пластичности?



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛЫ ПО МЕХАНИЧЕСКИМ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ  
СВОЙСТВАМ**

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** Усвоить понятие твердости, изучить сущность ее определения различными методами. Научиться самостоятельно измерять твердость наиболее распространенными методами.

**Материально-техническое обеспечение:** Приборы Бринелля и Роквелла, образцы из горячекатаной и термически упрочненной углеродистой стали и цветных сплавов, эталонные бруски известной твердости.

**Задание:**

1. Изучите методику определения твердости по Бринеллю и Роквеллу
2. Определите твердость металлов и сплавов различными способами
3. Составьте отчет о проделанной работе по форме 1
4. Ответьте на контрольные вопросы
5. Напишите вывод, сравнивая при этом достоинства и недостатки данных способов.

**ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Под твердостью материала понимают его способность сопротивляться пластической или упругой деформации при внедрении в него более твердого тела (индентора).

Этот вид механических испытаний не связан с разрушением металла и, кроме того, в большинстве случаев не требует приготовления специальных образцов.

Все методы измерения твердости можно разделить на две группы в зависимости от вида движения индентора: статические методы и динамические. Наибольшее распространение получили статические методы определения твердости.

Статическим методом измерения твердости называется такой, при котором индентор медленно и непрерывно вдавливается в испытуемый металл с определенным усилием. К статическим методам относят следующие: измерение твердости по Бринеллю, Роквеллу и Виккерсу (рис. 1).

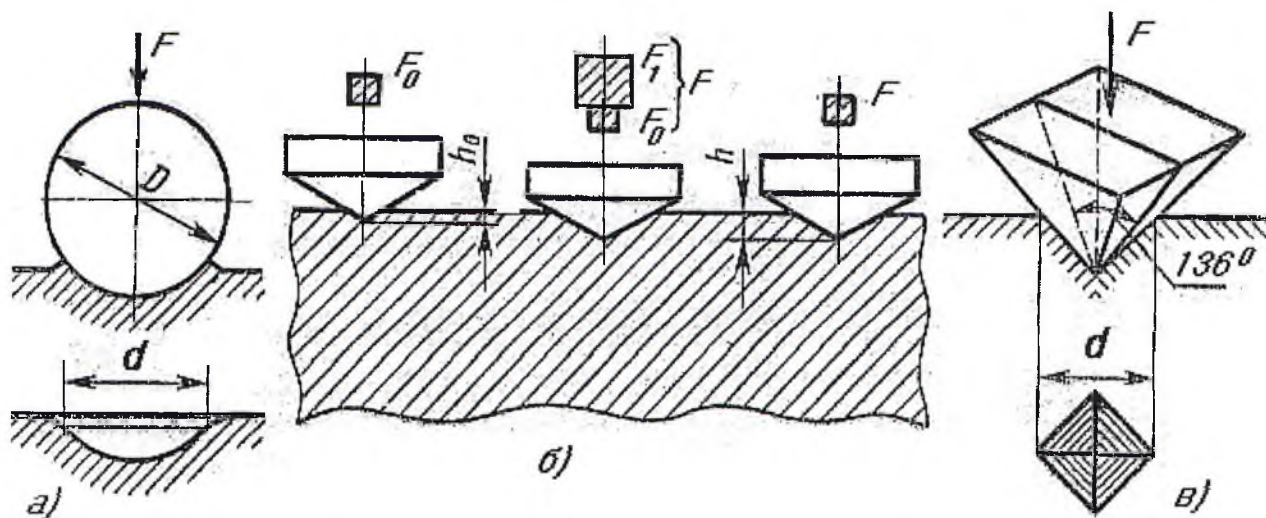


Рисунок 3- Схема определения твердости:  
а) по Бринеллю; б) по Роквеллу; в) по Виккерсу

При динамическом испытании контролируется величина отскока испытательного инструмента от поверхности испытываемого образца. К динамическим методам относят следующие: твердость по Шору, по Польди.

**ИЗМЕРЕНИЕ ТВЕРДОСТИ ПО БРИНЕЛЛЮ.** Сущность метода заключается в том, что шарик (стальной или из твердого сплава) определенного диаметра под действием усилия, приложенного перпендикулярно поверхности образца, в течение определенного времени вдавливается в испытуемый металл (рис. 1а). Величину твердости по Бринеллю определяют исходя из измерений диаметра отпечатка после снятия усилия.

При измерении твердости по Бринеллю применяются шарики (стальные или из твердого сплава) диаметром 1,0; 2,0; 2,5; 5,0; 10,0 мм.

При твердости металлов менее 450 единиц для измерения твердости применяют стальные шарики или шарики из твердого сплава. При твердости металлов более 450 единиц - шарики из твердого сплава.

Величину твердости по Бринеллю рассчитывают как отношение усилия  $F$ , действующего на шарик, к площади поверхности сферического отпечатка  $A$ :

$$HB (HBW) = \frac{F}{A} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

где  $HB$  – твердость по Бринеллю при применении стального шарика;

( $HBW$  твердость по Бринеллю при применении шарика из твердого сплава),  $MПа$  ( $кгс$ );

$F$  – усилие, действующее на шарик,  $H$  ( $кгс$ );

$A$  – площадь поверхности сферического отпечатка,  $мм^2$ ;

$D$  – диаметр шарика,  $мм$ ;

$d$  – диаметр отпечатка,  $мм$ .

Одинаковые результаты измерения твердости при различных размерах шариков получаются только в том случае, если отношения усилия к квадратам диаметров шариков остаются постоянными. Исходя из этого, усилие на шарик необходимо подбирать по следующей формуле:

$$F = K \cdot D^2 \quad (2)$$

Диаметр шарика  $D$  и соответствующее усилие  $F$  выбирают таким образом, чтобы диаметр отпечатка находился в пределах:

$$0,24 \cdot D \leq d \leq 0,6 \cdot D \quad (3)$$

Если отпечаток на образце получается меньше или больше допустимого значения  $d$ , то нужно увеличить или уменьшить усилие  $F$  и произвести испытание снова. Коэффициент  $K$  имеет различное значение для металлов разных групп по твердости. Численное, же значение его должно быть таким, чтобы обеспечивалось выполнение требования, предъявляемого к размеру отпечатка (3). Толщина образца должна не менее, чем в 8 раз превышать глубину отпечатка.

### **ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ПО БРИНЕЛЛЮ.**

Подготовка образца, выбор условий испытания, получение отпечатка, измерение отпечатка и определение числа твердости производится в строгом соответствии ГОСТ 9012-59. Необходимые для замера твердости значения выбираются из таблиц этого ГОСТа. Значение  $K$  выбирают в зависимости от металла и его твердости в соответствии с табл. 1.

Таблица 1 - Испытание твердости по Бринеллю

Диаметр шарика D, мм	Прикладываемое усилие F, Н				
	$K=F/D^2$				
	30	10	5	2,5	1
10	29420	9807	4903	2452	980,7
5	7355	2452	1226	612,9	245,2
2,5	1839	612,9	306,5	153,2	61,3
1	294,2	98,1	49,0	24,5	9,81
Диапазон твердости НВ	55 – 650	35 – 200	<55	8 – 55	3 – 20
Измеряются	Сталь, чугун, медь и ее сплавы, легкие сплавы	Чугун, сплавы меди, легкие сплавы	Медь и ее сплавы, легкие сплавы	Легкие сплавы	Свинец, олово

Усилие, F в зависимости от значения K и диаметра шарика D устанавливают в соответствии с табл. 1. Рекомендуемое время выдержки образца под нагрузкой для сталей составляет 10 с, для цветных сплавов 30 с (при K=10 и 30) или 60 с (при K=2.5).

Данные замеров занести в протокол.

### ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

Марка металла	D шарика, мм	F, Н (кгс)	Продол. выдержки, с	Диаметр отпечатка, мм		Среднее арифм., $d_{cp}$ , мм	НВ (НВW)
				d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>		

### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ТВЕРДОСТИ ПО РОКВЕЛЛУ.

Шкалу испытания (А, В или С) и соответствующие ей условия испытания (вид наконечника, общее усилие) выбирают в зависимости от предполагаемого интервала твердости испытываемого материала по табл. 2.

Таблица 2 - Выбор нагрузки и наконечника для испытания твердости по Роквеллу

Примерная твердость по Виккерсу	Обозначение шкалы	Вид наконечника	Общее усилие, кгс	Обозначение твердости по Роквеллу	Допускаемые пределы шкалы
60 – 240	В	Стальной шарик	100	HRB	25 – 100
240 – 900	С	Алмазный конус	150	HRC	20 – 67
390 – 900	А	То же	60	HRA	70 – 85

Измерение твердости по Роквеллу осуществляется в строгом соответствии ГОСТ 9013-59. Данные замеров занести в протокол.

## ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

Марка металла	Обозначение шкалы	Вид наконечника	Общее усилие, кгс	Результаты измерения	Примечание

### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Протокол испытаний твердости по методу Бринелля.
4. Протокол испытаний твердости по методу Роквелла.
5. Выводы.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Что такое твердость?
2. Классификация методов измерения твердости.
3. Сущность измерения твердости по Бринеллю.
4. До какого значения твердости при испытании по Бринеллю используются стальные шарики?
5. Какого диаметра шарики используются при испытании на твердость по Бринеллю?
6. Из каких условий выбирается диаметр шарика при испытании на твердость по Бринеллю?
7. Пример записи твердости по Бринеллю?
8. Сущность измерения твердости по Роквеллу?
9. При замере какой твердости снимается отсчет показаний по шкалам А, С, В?
10. Пример формы записи твердости по Роквеллу?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ ПО ФИЗИЧЕСКИМ СВОЙСТВАМ.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ.** Ознакомиться с работой приборов и методами измерения сопротивления проводников. Определение удельного сопротивления проводника.

**Материально-техническое обеспечение:** миниблок «Сопротивление проводника» (рис. 4.), источник постоянного напряжения, мультиметры, магазин сопротивлений, миниблоки «Резистор» (рис. 5). Миниблок «Сопротивление проводника» (рис. 4) предназначен для определения удельного сопротивления проводника (выводы АВ). На блоке указаны длина и диаметр проводника.



Рисунок 4- Миниблок «Сопротивление проводника»

В миниблоке размещается проволочный проводник в виде спирали, намотанной в один слой на тороидальный изолятор. В нём имеется подвижный контакт, помощью которого можно регулировать сопротивление. На панели миниблока нанесена шкала для определения длины проводника  $L$  и указан диаметр его поперечного сечения  $d$ .

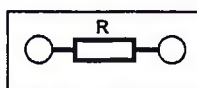


Рисунок 5- Миниблок «Резистор»

Электрическое сопротивление характеризует противодействие проводника или электрической цепи упорядоченному перемещению носителей тока. Согласно закону Ома, сила тока в однородном участке цепи равна отношению напряжения  $U$  на его концах к сопротивлению этого участка  $R$ :

$$I = \frac{U}{R} \quad (4)$$

В этом случае электрическое сопротивление называют **омическим** или **активным**. Оно зависит от материала проводника, его размеров и формы. Для однородного по составу линейного проводника с поперечным сечением  $S$  и длиной  $l$

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (5)$$

где  $\rho$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий материал проводника. Называется этот коэффициент **удельным электрическим**

*сопротивлением* и численно равен сопротивлению однородного цилиндрического проводника, изготовленного из данного материала, имеющего единичную длину и единичную площадь поперечного сечения.

Из формулы (5) следует

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad (6)$$

то есть, чтобы определить удельное сопротивление однородного по химическому составу проводника, имеющего постоянную площадь поперечного сечения, необходимо измерить его сопротивление постоянному току и геометрические параметры.

### *Методы измерений сопротивления проводника*

Три метода измерения сопротивления проводника:

- 1) технический метод – по измеренным значениям тока и напряжения;
- 2) мостовой метод;
- 3) с использованием омметра.

1. *Технический метод* осуществляют по схеме, приведённой на рис. 3.1.

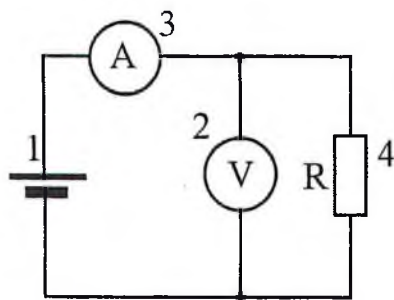


Рисунок 6- Электрическая схема измерения сопротивления проводника.

1 – регулируемый источник постоянного напряжения (0...+15 В); 2 – вольтметр;

При этом измеряют ток  $I$  через резистор и падение напряжения на нём  $U$ . Это позволяет рассчитать неизвестное сопротивление резистора  $R$  (рис.6):

$$R = \frac{U}{I}. \quad (7)$$

2. Метод измерений с помощью моста постоянного тока. Измерительные мосты – это **высокоточные** приборы, предназначенные для измерения электрических сопротивлений, ёмкостей, индуктивностей и других параметров методом уравновешенных мостовых цепей. На рис. 7 приведена схема простейшего моста (*мостик Уитстона*), который используется для измерения сопротивлений.

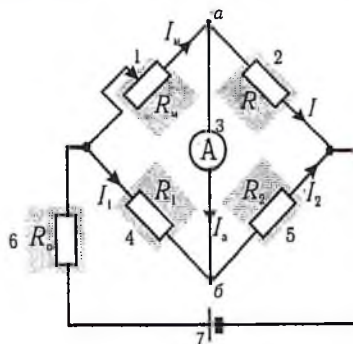


Рисунок 7- Электрическая схема простейшего моста Уитстона:

1 – магазин сопротивлений  $R_M$ , 2 – измеряемое сопротивление  $R$ , 3 – амперметр,  
4 – сопротивление  $R_1 = 100$  Ом, 5 – сопротивление  $R_2 = 10$  Ом,; 6 – сопротивление  $R_0 = 470$  Ом,  
7 – источник постоянного напряжения «+15 В»

Подбирая значение сопротивления магазина  $R_M$ , добиваются равенства потенциалов точек **a** и **б**, при этом ток  $I_A$ , текущий через амперметр, обращается в нуль. В таком уравновешенном состоянии моста выполняются равенства:

$$I_M R_M = I_1 R_1; \quad IR = I_2 R_2; \quad I_M = I; \quad I_1 = I_2. \quad (8)$$

Из этих соотношений следует расчётная формула

$$R = R_M \frac{R_2}{R_1}. \quad (9)$$

Резистор  $R_0$  в схеме служит для ограничения тока, протекающего через мост.

3. *Использование омметра* является наиболее простым методом: достаточно подключить измеряемый резистор к входам омметра и считать показания прибора. В основе работы омметров обычно лежит приближённый технический метод: шкалу прибора градуируют с использованием формулы (7) при фиксированном напряжении  $U$  батареи питания. Этот метод применяют, когда не нужна высокая точность измерений.

### Порядок выполнения работы

#### 1. Технический метод измерения сопротивления

1.1. Переключатель рода работ мультиметра 2 (рис. 4) перевести в положение «V  $\rightarrow$ » и установить предел измерения «20 В», мультиметра 3 – в положение «A  $\rightarrow$ » и установить предел измерения «200 м».

1.2. Собрать электрическую цепь, приведённой на рис. 4.

**Внимание!** На общий вход **СОМ** мультиметров 2 и 3 подаётся отрицательное напряжение («L»), на входы **V $\Omega$**  и **mA** – положительное напряжение.

1.3. Записать геометрические параметры проводника  $L$  и  $d$  в табл. 3.

1.4. Кнопками «СЕТЬ» включить питание блоков генераторов напряжений и мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка».

1.5. Кнопкой  $\Delta$  «Установка напряжения 0 ... +15 В» на регулируемом источнике постоянного напряжения по мультиметру 3 установить ток  $I$  в цепи примерно 10 мА. По мультиметру 2 определить напряжение  $U$ . Значения величин записать в табл. 3 (столбец 1).

1.6. Увеличивая последовательно ток примерно на 10 мА, провести ещё не менее четырёх измерений. Результаты записать в табл. 3 (столбец 1).

1.7. Нажать кнопку «Исходная установка» и левой кнопкой «СЕТЬ» **выключить** питание генераторов напряжений.

#### 2. Измерение сопротивления омметром

2.1. Переключатель рода работ одного из мультиметров перевести в положение « $\Omega$ » и установить предел измерения «200». С помощью одного проводника подключить клемму «СОМ» мультиметра с клеммой С на наборном поле (рис. 6). Другим проводником соединить клемму «V $\Omega$ » мультиметра и клеммой D на наборном поле.

2.2. Включить мультиметр. Показания прибора записать в табл. 3 (столбец 3).

### Обработка результатов измерений

1. По формуле (7) рассчитать сопротивление проводника  $R$ , измеренное техническим методом.
2. Вычислить по формуле (9) сопротивление проводника  $R$ , измеренное с помощью моста.
3. Оценить погрешности измерения сопротивления проводника по каждому из перечисленных методов измерения.
4. Используя наиболее точное значение сопротивления  $R$ , рассчитать по формуле (5) удельное сопротивление проводника. Определить материал проводника, сравнив полученное значение  $\rho$  с табличными значениями.

Таблица 3- Удельное сопротивление металлов и сплавов

материал	$\rho$ , нОм·м (при 20 °С)
Алюминий	25,3
Вольфрам	55,0
Медь	17,1
Свинец	190,0
Серебро	15,0
Нихром	1100,0

5. Оформить отчёт о выполнении работы в соответствии с прилагаемым образцом.

### ОТЧЁТ

по лабораторной работе №3

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

*Цель работы:* ....

*Оборудование:* ....

Таблица 3.1- Средства измерений и их характеристики

Наименование прибора	Предел допускаемой относительной погрешности (в % от измеренного значения)
Вольтметр (2)	$\Delta U / U = 0,5 \%$
Амперметр (3)	$\Delta I / I = 1,5 \%$
Омметр	$\Delta R / R = 0,8\%$

Таблица 3.2- Результаты измерений

Технический метод				Метод омметра
№	$I$ , мА	$U$ , В	$R$ , Ом	
1				$R = \quad \text{Ом}$
2				
3				
4				
Среднее сопротивление $R = \quad \text{Ом}$				

1.  $R = \dots \text{ Ом}$     2.  $\Delta R = \dots \text{ Ом}$     3.  $\rho = \dots \text{ Ом}\cdot\text{м}$ .

4. Сравнить удельное сопротивление проводника с табличными значениями (табл. 3.2) и сделайте вывод.



# ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 1

## ПОДБОР ОСНОВНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ СО СХОДНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ.** Ознакомиться с электроизоляционными, проводниковыми и магнитными материалами, методами их получения, основными характеристиками, свойствами, областями применения.

**Материально-техническое обеспечение:** образцы электроизоляционных материалов, проводниковых материалов, магнитных материалов, полупроводниковые изделия; таблицы: «Классы нагревостойкости», «Физические свойства металлов».

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Размеры, стоимость, вес и надежность работы электрических машин и аппаратов в первую очередь зависят от того, насколько удачно подобраны электротехнические материалы, идущие на их изготовление. Вот для чего необходимо знать эти материалы.

По назначению все электротехнические материалы, в зависимости от их электрических свойств, подразделяются на:

- диэлектрические (изоляционные);
- проводниковые;
- полупроводниковые;
- магнитные.

➤ **Электроизоляционные материалы.** Наиболее многочисленной группой, чрезвычайно важной для электротехники, являются диэлектрические материалы. Они предназначаются для ограничения путей электрического тока и по агрегатному состоянию их разделяют на: *газообразные; жидкие; твердеющие; твердые.*

По происхождению диэлектрики делятся на: *природные (естественные); искусственные.*

По химической природе изоляционные материалы разделяют на: *органические; неорганические.*

По строению их делят на: *аморфные; кристаллические; волокнистые.*

Указанная классификация в определенной степени влияет на свойства электроизоляционных материалов, которые оцениваются многочисленным рядом характеристик. Из них в практической деятельности, для каждого широко используемого материала, инженеру-электрику следует постоянно помнить две:

- электрическую прочность (пробивную напряженность), т.к. диэлектрик теряет изоляционные свойства если напряженность поля превысит критическое значение (МВ/м или кВ/мм);

- нагревостойкость, определяемую температурой, при которой электроизоляционный материал может работать длительно (в течение ряда лет). В соответствии с ГОСТ 8865-70 все электроизоляционные материалы по нагревостойкости разделены на классы.

Таблица 4- Классы нагревостойкости электроизоляционных материалов

Классы нагревостойкости	Допустимая рабочая температура, °С	Классы нагревостойкости	Допустимая рабочая температура, °С
У	90	F	155
A	105	H	180
E	120	C	более 180
B	130		

*Примечание.* Температуры классов нагревостойкости электроизоляционных материалов не следует путать с допустимыми температурами обмоток электрических машин и аппаратов.

➤ **Проводниковые материалы.** Проводниковые материалы могут быть: *твердыми; жидкими; газообразными (при определенных условиях).*

Твердые (металлические) проводниковые материалы разделяют на: *металлы высокой проводимости; сплавы высокого сопротивления.*

Из металлов высокой проводимости для электротехники наибольший интерес представляют медь, алюминий и их сплавы.

Таблица 5- Физические свойства металлов

Металл	Плотность, Мг/м <sup>3</sup>	Температура плавления, °С	Удельное сопротивление, мкОм·м
Медь	8,9	1083	0,0172
Алюминий	2,7	657	0,028

На электрические свойства этих материалов оказывают влияние примеси (особенно на проводимость) и способ обработки (на механические характеристики).

В ремонтной практике электрических машин и аппаратов из проводниковых материалов широко используются обмоточные провода. Они изготавливаются из электролитической меди (ММ) и алюминия (АМ). Из меди марки М1, с содержанием примеси не более 0,1 %, можно получить провод диаметром до 0,03 – 0,02 мм, а из бескислородной меди марки МО, с содержанием примесей не более 0,05 %, в том числе кислорода не свыше 0,02 %, можно получать провод ещё меньшего диаметра.

Марки обмоточных проводов определяются как материалом провода, так и их изоляцией. Например, марка ПЭЛ – провод медный, покрыт лаковой эмалью на масляно-смоляной основе. АПЭЛ – изоляция та же, но материал провода – алюминий, на это указывает первая буква марки (А), при медном проводе специальных указаний не делается.

Изоляцию обмоточных проводов по её роду классифицируют на:

- эмалевую, например марки ПЭЛ, ПЭВ, ПЭМ, ПЭТВ, ПЭЛР и др.;
- волокнистую или стекловолокнистую – ПВД, ПВД, ПВД и др.;
- комбинированную – ПЭЛБО, ПЭЛБД, ПЭЛШО, ПЭЛЛО, ПЭВЛО, ПЭТВЛО, ПЭВТЛЛО и др.

Эмалевые изоляции проводов отличаются высокой электрической прочностью при малой толщине, что очень важно для лучшего использования площади пазов электрических машин или окон магнитопроводов трансформаторов. Однако они, как правило, имеют недостаточную механическую прочность.

Провода с волокнистой или стекловолокнистой изоляцией обладают большей механической прочностью, но, к сожалению, и большей толщиной, особенно из хлопчатобумажной или асбестовой пряжи.

Комбинированная изоляция проводов удачно сочетает преимущества двух указанных видов.

В особую группу целесообразно выделить провода с высокой нагревостойкостью:

- с эмалевой изоляцией ПЭТ-155 (155 °С), ПНЭТ-имид (200 °С);
- с волокнистой изоляцией ПСД (155 °С), ПСДК (180 °С);
- с комбинированной ПЭТЛО (130 °С) и др.

Сплавы высокого сопротивления получили широкое применение при изготовлении электроизмерительных приборов, образцовых резисторов и нагревательных элементов: никелин, хромель, константан.

В первых двух случаях от них требуется высокое удельное сопротивление и его высокая стабильность во времени. Малый температурный коэффициент термо-ЭДС: в паре данного сплава с медью. В последнем случае от сплава требуется способность длительно работать на воздухе при высоких температурах (1000 °С и более). Кроме того они должны быть дешёвы и по возможности не содержать дефицитных составляющих.

К проводниковым материалам относят также припой, специальные материалы, применяемые при пайке.

В зависимости от температуры плавления припои делят на две группы:

– мягкие (до 400 °С) – припой оловянно-свинцовые (марка ПОС) применяются там, где требуется хороший электрический контакт;

– твёрдые (выше 500 °С) – припой медно-цинковые (ПМЦ), серебряные – ПСр и др., применяются для получения и хорошего электрического контакта и механически прочного соединения.

Флюсы – это вспомогательные материалы при пайке. Они способны хорошо растворять и удалять окислы из расплава, создавать на его поверхности прочную пленку для защиты металлов от окисления, улучшать растекаемость припоя. В электротехнике в качестве флюса используется канифоль, бура и др.

➤ **Полупроводниковые материалы.** Полупроводниковыми называют вещества с электронной электропроводностью, удельное сопротивление которых при нормальной температуре лежит между проводниками и диэлектриками. Управляемость электропроводностью полупроводников температурой, светом, электрическим полем, механическим усилием и пр. положено в основу работы многих специальных устройств. Используемые в практике полупроводниковые материалы подразделяют на:

- простые полупроводниковые (элементы) к ним относятся кремний, германий;
- полупроводниковые химические соединения – тирит, вилит, силит.

➤ **Магнитные материалы.** В качестве магнитных материалов используются материалы с высокой магнитной проницаемостью ( $\mu > 1$ ) – железо, никель, кобальт и сплавы различного состава.

В зависимости от величины коэрцитивной силы ( $H_c$ ) магнитные материалы принято делить на две большие группы: магнитно-мягкие, используемые в основном как проводники магнитного потока; магнитно-твёрдые, используемые как источники магнитного поля.

Магнитно-мягкие (с малым значением  $H_c$ ) обладают высокой магнитной проницаемостью, малыми потерями на гистерезис. К ним относятся технически чистое железо, листовая электротехническая сталь, различные сплавы (пермаллой, альсиферы). Используются для изготовления магнитопроводов электрических машин и аппаратов.

У магнитно-твёрдых материалов (с большим значением  $H_c$ ) магнитная проницаемость ниже, чем у магнитно-мягких. Причём чем выше  $H_c$ , тем ниже магнитная проницаемость. К ним относятся легированные стали, закаливаемые на мартенсит, литые магнитно-твёрдые сплавы, магниты из порошков, магнитно-твёрдые ферриты. Используются для изготовления постоянных магнитов.

В электротехнике самое широкое применение получила листовая электротехническая сталь. Это сталь легированная кремнием, который резко повышает её удельное электрическое сопротивление, что снижает потери на вихревые токи, кроме того несколько увеличивает магнитную проницаемость и снижает потери на гистерезис, однако кремний понижает механические свойства стали.

Электротехническая сталь (толщиной 0,35 или 0,5 мм) по ГОСТ 21427.0-75 подразделяется на 38 марок. Она изготавливается в виде рулонов, листов и резной ленты и предназначена для изготовления магнитопроводов электрических машин, аппаратов и приборов.

Обозначения марок электротехнических сталей осуществляется в соответствии с их классификацией.

В обозначении марки цифры означают:

**первая** – класс по структурному состоянию и виду прокатки (1 – горячекатаная изотропная; 2 – холоднокатаная изотропная; 3 – холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой);

**вторая** – содержание кремния:

0 – с массовой долей кремния до 0,4 % включительно,

1 – с массовой долей кремния св. 0,4 до 0,8 % включительно,

2 – с массовой долей кремния св. 0,8 до 1,8 % включительно,

3 – с массовой долей кремния св. 1,8 до 2,8 % включительно,

4 – с массовой долей кремния св. 2,8 до 3,8 % включительно,

5 – с массовой долей кремния св. 3,8 до 4,8 % включительно;

**третья** – группа по основной нормируемой характеристике:

0 – удельные потери при магнитной индукции  $B = 1,7$  Тл и частоте 50 Гц ( $P_{1,7/50}$ ),

1 – удельные потери при магнитной индукции  $B = 1,5$  Тл и частоте 50 Гц ( $P_{1,5/50}$ ),

2 – удельные потери при магнитной индукции  $B = 1,0$  Тл и частоте 400 Гц ( $P_{1/400}$ ) для горячекатаной или холоднокатаной изотропной стали и удельные потери при магнитной индукции  $B = 1,5$  Тл и частоте 400 Гц ( $P_{1,5/400}$ ), для холоднокатаной анизотропной стали,

6 – магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности поля  $H = 0,4$  А/м ( $B_{0,4}$ ),

7 – магнитная индукция в средних магнитных полях при напряженности поля  $H = 10$  А/м ( $B_{10}$ ) или 5 А/м ( $B_5$ );

**четвертая** – порядковый номер типа стали.

Горячекатаная изотропная электротехническая сталь изготавливается в виде листов по ГОСТ 21427.3-75 следующих марок: 1211, 1212, 1213, 1311, 1311, 1312, 1313, 1411, 1412, 1413, 1511, 1512, 1513, 1514, 1521, 1561, 1562, 1571, 1572.

По точности прокатки по толщине подразделяют на сталь нормальной (Н) и повышенной (П) точности.

По состоянию поверхности на сталь: с травленной (Т) и НТ – нетравленной поверхностью. Пример условного обозначения листа толщиной 0,5 мм, шириной 1000 мм, длиной 2000 м, повышенной точности прокатки, класса 2 с травленной поверхностью, из стали марки 1512: лист 0,50x1000x2000-П-2-Т-1512.

На холоднокатаную анизотропную сталь распространяется ГОСТ 21427.1-83 (с целью ориентации в направлении намагничивания) марки: 3311, 3412, 3413, 3414, 3415, 3416, 3404, 3405, 3406. Выпускается в рулонах, листах, в виде ленты.

По виду покрытия: с электроизоляционным термостойким покрытием ЭТ, М – мягкое покрытие, БП – без изоляционного покрытия.

Тонколистовая холоднокатаная изотропная электротехническая сталь выпускается в виде рулонов, листов резной ленты следующих марок по ГОСТ 21427.2-83: 2011, 2013, 2111, 2112, 2211, 2212, 2311, 2312, 2411, 2412, 242.

По типу покрытия, как у стали холоднокатаной анизотропной.

**Железно-никелевые сплавы.** В этих сплавах важнейшей составной частью является никель Ni. В зависимости от содержания Ni меняются магнитные свойства сплава (Рис. 1). При 27% Ni сплав NiFe является немагнитным. Индукция  $B_S$  достигает максимум при 50% Ni.

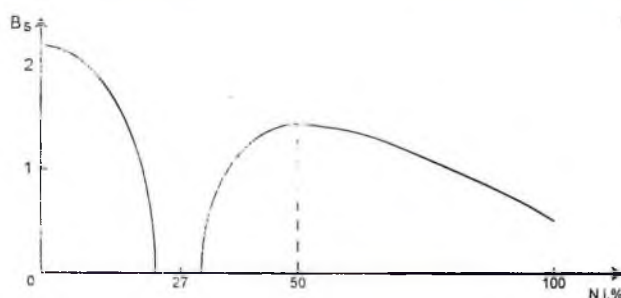


Рисунок 8-. Величина индукции насыщения  $B_S = f(Ni, \%)$

При намагничивании в переменном поле существенное значение имеет величина активного электрического сопротивления сплава, т.к. от нее зависит величина потерь на вихревые токи. Из рис. 2 видно, что наибольшее активное сопротивление имеет сплав с содержанием Ni 30 – 35 %.

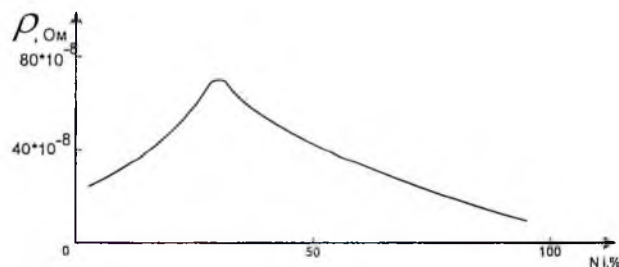


Рисунок 9- Удельное сопротивление  $\rho$  сплавов

Магнитные материалы этого типа называются пермаллоями. Эти сплавы по составу делятся на 4 группы: 1 – с содержанием кремния больше 75 %; 2 – около 65 %; 3 – 50 %; 4 – около 35 %.

Марки этих сплавов и химические составы устанавливаются по ГОСТ 10994-74 и приведены в [6]. Марки сплавов состоят из двужаночного числа, обозначающего среднее содержание элемента в % и буквенных обозначений элементов. Буква П означает, что в результате особой технологии изготовления и режима термостойкости сплав обладает прямоугольной петлей гистерезиса (Рис. 3). А – суженные пределы химического состава.

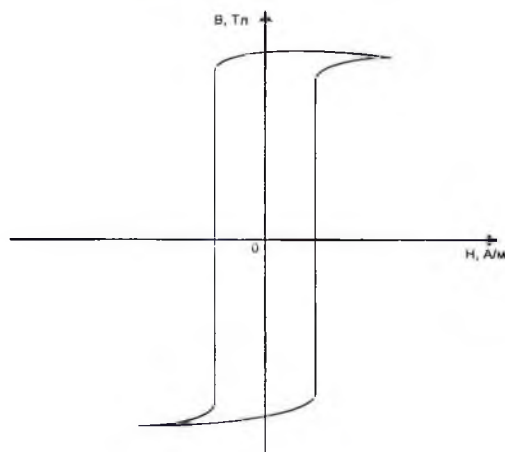


Рисунок 10- Осциллограммы петли гистерезиса 50 Гц

Наибольшее распространение получил сплав 79НМ:

Si = 0,3–0,5 %, Mn = 0,6–1,1 %, Ni = 78,5–80 % Mo = 3,8–4,1 %, Cu = 0,2 %, плотность 8,6 Мг/м<sup>3</sup>.

**Ферриты.** Ферриты – магнитные материалы на основе оксидов металлов. Промышленные магнитно-мягкие ферриты – это в основном поликристаллические материалы, синтезируемые по керамической технологии, включающей в себя составление смеси оксидов в заданной пропорции, ферризацию смеси, формирование изделий и их последующее спекание.

Наибольшее распространение получили 2 группы магнитно-мягких ферритов:

1. Mn-Zn марганцево-цинковые – твердые растворы феррита марганца (MnFeO) и феррита цинка ZnFeO;
2. Ni-Zn никель-цинковые – твердые растворы феррита никеля (NiFeO) и феррита цинка ZnFeO.

Разнообразие марок Mn-Zn и Ni-Zn ферритов определяется соотношением основных компонентов, наличием легирующих присадок и режимов синтеза.

По своим электрическим свойствам ферриты являются полупроводниковыми материалами. Их проводимость увеличивается с ростом температуры.

Исходя из условий эксплуатации и области применения ферритовых сердечников, магнитно-мягкие ферриты делятся на 2 группы.

Ферриты общего применения (1-я группа) включает в себя Ni-Zn ферриты марок 100НН, 400НН, 900НН, 600НН, 1000НН, 2000НН, и Mn-Zn ферриты марок 1000НМ, 1500НМ, 2000НМ, 3000НМ. Ферриты данной группы используются в слабых и сильных полях в диапазоне частот до 30 МГц в качестве сердечников трансформаторов, дросселей магнитных антенн и в другой

аппаратуре, где нет особых требований к температурной и временной стабильности параметров.

Магнитные потери Mn-Zn ферритов значительно ниже, чем Ni-Zn при близких значениях начальной магнитной проницаемости. Ширина петли гистерезиса у них меньше ввиду меньших значений остаточной индукции и коэрцитивной силы при достаточно высоких значениях индукции.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Характеристика групп электротехнические материалы

В отчете, используя литературные источники каждому образцу электроизоляционных материалов, дайте краткую характеристику: метод получения, электрическая прочность, класс нагрев стойкости, области применения, достоинства и недостатки.

2. По литературным источникам каждому образцу проводниковых и полупроводниковых материалов, составьте характеристику:

а) медь, алюминий, латунь, бронза - получение, содержание примесей, марки, основные свойства, влияние обработки, области применения;

б) обмоточные провода - материал провода, его изоляция, допустимые температуры нагрева, области применения;

в) константан, нихром - содержание элементов, основные параметры, области применения;

г) припой - тип по температуре плавления, характерные особенности, области применения;

д) флюсы - группы по действию, оказываемому на металл, особенности, области применения;

е) угольные щётки - тип, основные параметры, области применения;

ж) кремний, германий, вилит, тирит, силит - получение, основные параметры, области применения.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО  
СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ**

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ.** Ознакомление с краткой теорией температурной зависимости сопротивления металлов и экспериментальное определение температурного коэффициента сопротивления.

**Материально-техническое обеспечение:** электроплитка, 220 В, 600 Вт; водный термостат; испытуемый проволочный образец; омметр (цифровой измерительный прибор или мост постоянного тока Р577); термометр ртутный.

**ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Зависимость сопротивления проводника от температуры.

Сопротивление проводника прямо пропорционально его длине и обратно пропорционально его поперечному сечению

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

Где  $\rho$  — коэффициент пропорциональности, или Удельное сопротивление проводника,  $l$  — длина проводника,  $S$  — поперечное сечение проводника.

Удельным сопротивлением Является сопротивление проводника из данного вещества единичной длины и единичного поперечного сечения. Удельное сопротивление проводника зависит от материала проводника.

В СИ единица измерения удельного сопротивления

$$\rho = \frac{1 \text{ Ом} \cdot 1 \text{ м}^2}{1 \text{ м}} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Зависимость сопротивления проводника от температуры

Сопротивление проводников зависит от температуры. Величина, характеризующая зависимость изменения сопротивления проводника от температуры, называется Температурным коэффициентом сопротивления и обозначается  $\alpha$ . Температурный коэффициент сопротивления показывает, на какую часть первоначального сопротивления изменяется сопротивление этого проводника при нагревании от  $0^\circ \text{C}$  до  $T^\circ \text{C}$ , то есть

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t^\circ}.$$

Из этой формулы можно получить единицы измерения температурного коэффициента сопротивления

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t^\circ} = \frac{\Delta R}{R_0 t^\circ}, [\alpha] = \frac{\text{Ом}}{\text{Ом} \cdot \text{град}} = \text{град}^{-1}.$$

Прделав соответствующие преобразования, получим

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t^\circ).$$

Сопротивление всех металлов при нагревании возрастает, их температурные коэффициенты сопротивления положительны. Сопротивление растворов солей, кислот, щелочей, а также угля при нагревании уменьшается, их температурные коэффициенты отрицательны, для них формулу зависимости сопротивления от температуры можно записать так:

$$R_t = R_0 (1 - \alpha t^0).$$

В формуле (1), заменив

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{S},$$

Получим общую формулу сопротивления

$$R_t = \rho_0 \frac{l}{S} (1 + \alpha t^0),$$

Где  $\rho_0$  — удельное сопротивление проводника при  $0^\circ$  С. Если в формуле (2) заменить

$$R_t = \rho_t \frac{l}{S},$$

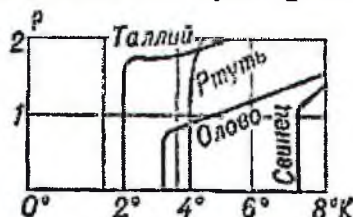
То получим

$$\rho_t = \rho_0 (1 + \alpha t^0),$$

Где  $\rho_t$  — удельное сопротивление проводника при температуре  $t^\circ$  С.

Сверхпроводимость.

С приближением температуры чистых металлов к абсолютному нулю их сопротивление резким скачком падает до нуля (рис. 77).



Ток, идущий по замкнутому проводнику, при температурах, близких к абсолютному нулю, может циркулировать в нем достаточно долгое время. Такое явление называется Сверхпроводимостью.

Изучение зависимости сопротивления металлов от температуры имеет важное значение для экспериментальной физики и техники. Большинство точных измерений температуры в настоящее время производится с помощью так называемых термометров сопротивления. Они представляют собой проволочные сопротивления, температурная зависимость которых тщательно проградуирована в специальных термостатах. Эти термометры точнее, удобнее в использовании и диапазон их сравнительно шире, чем у ртутных и других жидкостных термометров. Платиновый термометр сопротивления, например, применяется в интервале от  $-263$  до  $+1000^\circ$ С. Точность таких термометров составляет несколько сотых долей градуса.

Схема измерительного стенда представлена на рис. 11. Оборудование: 1 - электроплитка, 220 В, 600 Вт; 2 - водный термостат; 3 - испытуемый проволочный образец; 4 - омметр (цифровой измерительный прибор или мост постоянного тока Р577); 5 - термометр ртутный. Сопротивление проводника измеряется омметром, температура ртутным термометром.

Таблица 6- Данные измерений при нагреве

№ изм.	Нагрев		Охлаждение	
	$T, ^\circ\text{C}$	$R_T, \text{Ом}$	$T, ^\circ\text{C}$	$R_T, \text{Ом}$



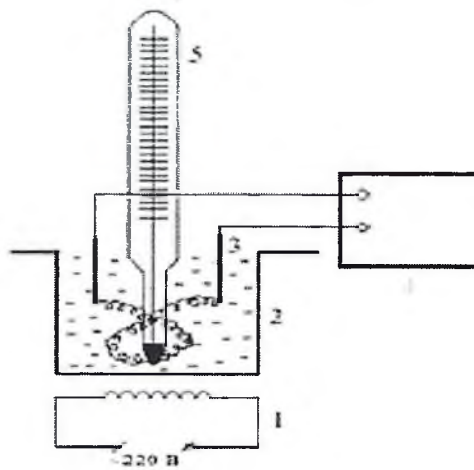


Рисунок 11- Схема измерительного стенда

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему по рис. 11.

а) вода в термостате должна покрывать образец и ртутный баллон термометра, но не должна быть налита до краев;

б) познакомиться с правилами пользования мостом Р577 или цифровым прибором в режиме измерения сопротивления;

2. Пригласить преподавателя для проверки схемы.

3. Записать названия приборов и их характеристики.

4. Включить измерительный прибор в сеть 220 В и прогреть его в течение некоторого времени. Включение и выключение измерительного прибора осуществляется по инструкции.

5. Измерить начальную температуру воды в термостате и сопротивление проводника. Данные занести в табл. 6 (нагрев).

6. Провести измерения сопротивления проводника при различных температурах с интервалом примерно в  $10^{\circ}\text{C}$ :

а) включить электроплитку в сеть 220 В и внимательно следите за показаниями термометра;

б) как только показания термометра станут на 2-3 градуса ниже желаемой температуры, выключить плитку и измерить сопротивление проводника, затем считать показания термометра и записать в таблицу значения температуры и сопротивления;

в) снова включить плитку и продолжить измерения при других температурах таким же образом;

г) после измерения при температуре кипения воды выключить плитку, снять термостат на подставку к произвести измерения также примерно через  $10^{\circ}\text{C}$  при охлаждении воды, данные записать в табл. 6 (охлаждение).

7. По результатам эксперимента построить график зависимости  $R(T)$ . При этом нужно учесть, что:

а) кривая (прямая) должна полностью занимать площадь графика;

б) координатная сетка должна быть близка к квадрату;

в) масштаб должен быть равномерным, оси координат - обозначены;

- г) экспериментальные точки должны быть размером не менее 1-2 мм<sup>2</sup> и иметь форму геометрических фигур (▲, ●, ■ и т.д.);
- д) кривая (прямая) должна быть плавной и усредненной относительно экспериментальных точек;
- е) точки, полученные при нагревании и охлаждении, должны быть обозначены разными фигурами.
8. Произвести расчет температурного коэффициента сопротивления образца  $\alpha$  по формуле (1.3), где  $R_T$  - сопротивление при температуре  $T$  и  $R_0$  - сопротивление при 0°C, полученное путем экстраполяции прямой на нулевую температуру, либо обработать эксперимент методом наименьших квадратов на ЭВМ (по выбору преподавателя).
9. Оценить погрешность измерения  $\alpha$ .
10. Записать результаты и сделать выводы.
11. Показать результаты преподавателю и получить разрешение на разборку схемы.



Рисунок 12- Температурная зависимость сопротивления металла и полупроводника

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков механизм электропроводности металлов?
2. Как и почему изменяется сопротивление металлов при изменении их температуры?
3. Каков физический смысл температурного коэффициента сопротивления металла? От чего он зависит?
4. Как измеряется коэффициент  $\alpha$ ?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** Изучение физических основ явления пробоя твердых диэлектриков. Экспериментальное определение электрической прочности твердых диэлектриков.

### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

#### 1.1 Электропроводность твердых диэлектриков.

По своему назначению электроизоляционные материалы не должны под действием постоянного приложенного напряжения пропускать электрический ток (под действием переменного приложенного напряжения всякий диэлектрик пропускает переменный емкостной ток). Однако, любой твердый диэлектрик (картон, бумага, лак, эмаль, компаунд, полимер, стекло, керамика), используемый в электротехнике, содержит в своем составе некоторое количество различных примесей, и следовательно, в таком диэлектрике имеется несколько видов носителей зарядов: ионы основных веществ, ионы примесей, а иногда и свободные электроны, которые под воздействием электрического поля могут перемещаться. Поэтому, твердые диэлектрики на постоянном напряжении пропускают небольшой ток, называемый сквозным током или током проводимости.

Электропроводность твердого диэлектрика чаще всего носит ионный характер. Это связано с тем, что ширина запрещенной зоны в диэлектрике  $W \gg kT$ . Поэтому оторваться от своих атомов за счет теплового движения может лишь небольшое количество электронов. Ионы же оказываются слабо связанными с узлами решетки, и энергия активации  $W$ , необходимая для их срыва, сравнима с  $kT$ . И хотя подвижность ионов меньше, чем подвижность электронов, но за счет большей концентрации свободных ионов, ионная электропроводность оказывается преобладающей над электронной

$$\mu_{\text{ион}} \cdot n_{\text{ион}} \cdot q_{\text{ион}} > \mu_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}} \cdot q_{\text{эл}} \quad (1)$$

где  $\mu_{\text{ион}}$ ,  $\mu_{\text{эл}}$  - подвижность ионов и электронов соответственно,

$n_{\text{ион}}$ ,  $n_{\text{эл}}$  - концентрация ионов и электронов соответственно,

$q_{\text{ион}}$ ,  $q_{\text{эл}}$  - заряд ионов и электронов соответственно

Под действием света, радиации, небольшом нагреве сначала ионизируются содержащиеся в диэлектриках в небольших количествах примеси и дефекты. Такими примесями могут быть органические кислоты, щелочные оксиды, влага и другие загрязнения, молекулы которых распадаются на ионы. В этом случае ток проводимости представляет собой направленное перемещение свободных ионов, образующихся в результате диссоциации молекул примесей. Образовавшиеся таким образом ионы определяют низкотемпературную примесную область электропроводности твердого диэлектрика. При повышении температуры и при приложении к твердым диэлектрикам больших напряжений в них образуются собственные свободные ионы и электроны, которые создают ток проводимости.

Удельная электропроводность твердых диэлектриков с ростом температуры растет по экспоненциальному закону:

$$\gamma = n \cdot q \cdot \mu \sim \exp(-W/kT). \quad (2)$$

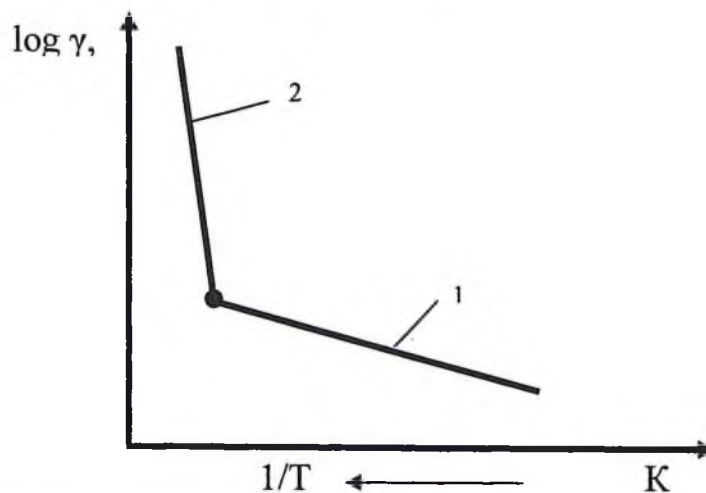
При достижении некоторой температуры удельная электропроводность резко возрастает и наступает высокотемпературная собственная электропроводность. Рисунок 1 отображает эту зависимость:

Удельная проводимость складывается из собственной с энергией активации  $W_{\text{соб}}$  и примесной с энергией активации  $W_{\text{пр}}$ .

$$\gamma = A_1 \exp(-W_{\text{пр}}/kT) + A_2 \exp(-W_{\text{соб}}/kT), \quad (3)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – коэффициенты, объединяющие в себе подвижность ( $\mu$ ) и концентрацию ( $n$ ) свободных собственных и свободных примесных ионов соответственно,

$W$  – ширина запрещенной зоны,  
 $k$  – постоянная Больцмана,  
 $T$  – термодинамическая температура.



- 1 – низкотемпературная примесная область,  
 2 – высокотемпературная собственная область.

Рисунок 12 – Зависимость удельной электропроводности твердого диэлектрика от температуры.

Температура, при которой наблюдается излом зависимости  $\log \gamma(1/T)$ , сильно зависит от степени чистоты и совершенства кристалла. При увеличении содержания примесей и дефектов примесная удельная электропроводность растет и будет сдвигаться в сторону высоких температур.

Удельную электропроводность твердого диэлектрика характеризуют два параметра:

- удельная объемная электропроводность  $\gamma_v$ ,
- удельная поверхностная электропроводность  $\gamma_s$ .

Величина, обратная удельной проводимости, называется удельным сопротивлением  $\rho$ . Для твердых диэлектриков  $\rho = 10^7 - 10^{18}$  Ом·м.

Многие диэлектрики, используемые в электрической изоляции, являются гигроскопичными и величина удельного сопротивления сильно зависит от увлажнения. Чем сильнее увлажнение, тем меньшим удельным поверхностным сопротивлением обладает твердый диэлектрик. Для уменьшения удельной проводимости поверхности гигроскопичных электроизоляционных материалов покрывают гидрофобными (не смачиваемые водой) покрытиями - лаками, эмалями. Пористые электрокерамические материалы покрываются глазурью; пористые диэлектрики пропитываются жидкими или твердеющими компонентами, которые плохо увлажняются.

## 1.2 Основные виды поляризации диэлектрика

Под действием приложенного электрического напряжения диэлектрик способен поляризоваться, т. е. происходит ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация дипольных моментов.

Различают 3 основных вида поляризации:

1. Электронная поляризация – упругое смещение электронных оболочек относительно ядра в атомах диэлектрика. Это мгновенный процесс, происходящий за  $10^{-15} - 10^{-16}$  с. Электронная поляризация характерна для всех диэлектриков: полярных, неполярных, с ионной кристаллической решеткой.

2. Ионная поляризация представляет собой упругое смещение друг относительно друга подрешетки из положительных и отрицательных ионов. Ионная поляризация завершается за  $10^{-13} - 10^{-12}$  с.

Электронная и ионная поляризации относятся к быстрым, не релаксационным видам поляризации, совершаются в диэлектриках под действием электрического поля мгновенно и без рассеяния энергии, т. е. без выделения тепла.

3. Дипольная поляризация происходит в полярных диэлектриках. Она представляет собой поворот (ориентацию) полярных молекул (диполей). Для ориентации диполя в направлении электрического поля требуется некоторое время релаксации  $\tau$ . После снятия внешнего поля в течение  $\tau$  ориентация полярной молекулы под действием теплового движения уменьшается в  $e$  раз ( $e$  – основание натурального логарифма). Время релаксации прямо пропорционально вязкости диэлектрика и обратно пропорционально температуре.

Так как при повороте диполей в направлении поля ими преодолевается некоторое сопротивление, поэтому дипольная поляризация сопровождается рассеянием энергии в диэлектрике, т. е. нагреванием. Дипольная поляризация относится к неупругим, релаксационным поляризациям, нарастает и убывает замедленно и завершается за время  $10^{-8} - 10^{-1}$  с.

Различают два вида дипольной (релаксационной) поляризации:

- электронно-релаксационная;
- ионно-релаксационная.

Ионно-релаксационная поляризация характерна для твердых диэлектриков, имеющих неплотную упаковку объема частицами.

Способность диэлектрика при нанесении на него электродов и подачи напряжения, образовывать емкость, характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ .

Диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  - важнейший параметр диэлектрика,

характеризующий процесс поляризации, который может быть найден по измеренной емкости конденсатора с диэлектриком.

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 S / h \quad (4)$$

где  $C$  - емкость конденсатора, Ф;

$\varepsilon_0$  - электрическая постоянная,  $\varepsilon_0 = 8,84 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;

$\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость;

$S$  - площадь электродов, м<sup>2</sup>;

$h$  - расстояние между электродами, м.

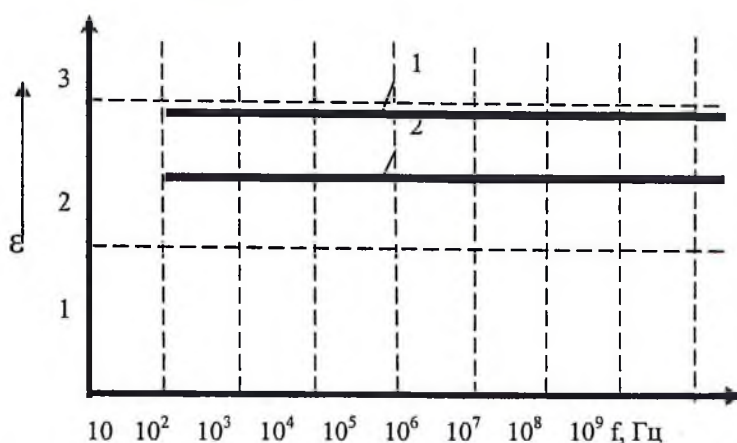
Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  зависит от интенсивности процессов поляризации, протекающих в диэлектриках под действием приложенного напряжения.

Неполярные диэлектрики однородной структуры имеют только электронную поляризацию, поэтому их диэлектрическая проницаемость невелика  $\varepsilon = 1-2,2$ , т.е.  $\varepsilon \approx n^2$ , где  $n$  - показатель преломления света.

Диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков определяется постоянным электрическим (дипольным) моментом молекулы и размером молекулы, лежит в пределах от 2 до 80, т.е.  $\varepsilon > n^2$ .

Диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  зависит от многих факторов: температуры, частоты приложенного напряжения, влажности и др.

Для неполярных диэлектриков имеет место только электронная поляризация. Поскольку электронная поляризация происходит мгновенно, то даже при наиболее высоких частотах, применяемых в современной электро- и радиотехнике, поляризация неполярных диэлектриков успевает полностью установиться за время, которое несравнимо мало по сравнению с полупериодом переменного напряжения. Поэтому диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$  неполярных диэлектриков не зависит от частоты переменного напряжения. Рисунок 2 отображает эту зависимость



1 - фторопласт-4, 2 - полистирол

Рисунок 13 - Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты для твердых неполярных диэлектриков

На рисунке 14 показана зависимость диэлектрической поляризации от частоты для полярных диэлектриков. Дипольная поляризация может происходить в переменных полях до определенной частоты. При очень высоких частотах этот вид поляризации не возникает, так как время одного полупериода очень мало и

полярные молекулы не могут осуществить свой поворот под действием сил внешнего электрического поля. Диэлектрическая проницаемость с ростом частоты снижается и при высоких частотах определяется только процессом электронной поляризации

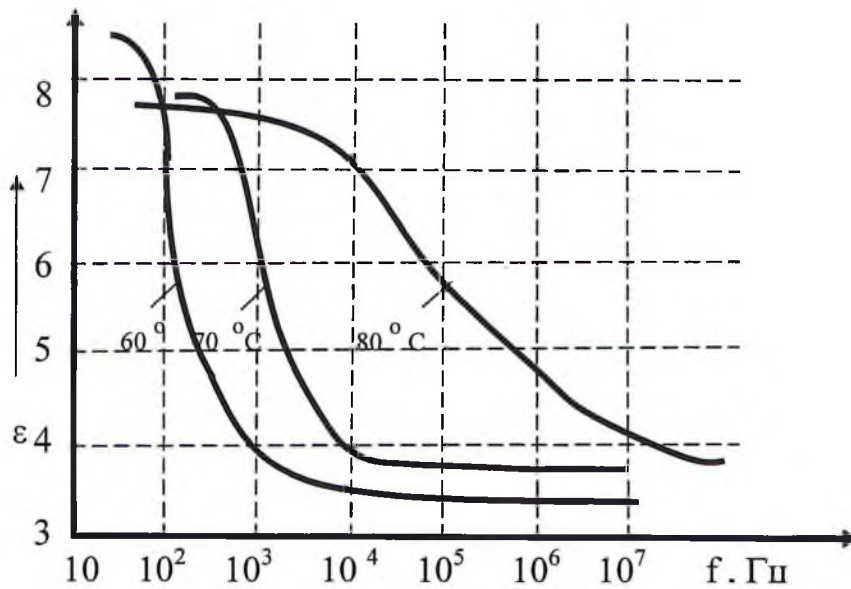


Рисунок 14 – Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты для полярного диэлектрика (поливинилацетата) при различных температурах.

Температура диэлектрика также оказывает влияние на диэлектрическую проницаемость. Рисунки 12, 13, 14 иллюстрируют эту зависимость для диэлектриков различного строения.

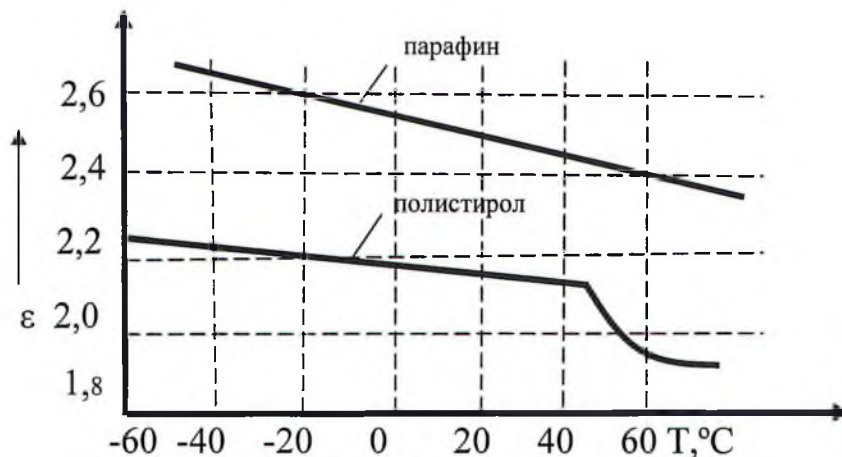


Рисунок 15 – Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для неполярных диэлектриков

На электронную поляризацию температура оказывает небольшое влияние. Так как неполярные диэлектрики характеризуются только электронной поляризацией, то некоторое уменьшение диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  неполярного диэлектрика с повышением температуры объясняется уменьшением плотности вещества (рисунок 15).

В случае полярных диэлектриков величина диэлектрической проницаемости заметно изменяется с ростом температуры. Рисунок 5 наглядно показывает эту зависимость. В твердых полярных диэлектриках возможны все виды поляризации и для них характерны те же закономерности, что и для жидких полярных

диэлектриков. Процесс дипольной поляризации состоит в деформации участков или ориентации отдельных полярных групп молекул. При низких температурах вязкость полярного диэлектрика большая и полярные молекулы не могут ориентироваться в направлении поля. (на рисунке 16 это соответствует участку *ab*). Здесь имеет место только электронная поляризация и диэлектрическая проницаемость уменьшается. С увеличением температуры вязкость снижается, и полярные молекулы могут осуществить поворот под действием сил электрического поля. На участке *бв* происходит процесс дипольной поляризации и  $\epsilon$  возрастает.

При дальнейшем повышении температуры тепловая энергия полярных молекул возрастает, и поворот их уже затрудняется. В результате этого диэлектрическая проницаемость падает. Уменьшение диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  на участке *вг* вызвано разориентацией полярных молекул в результате теплового движения.

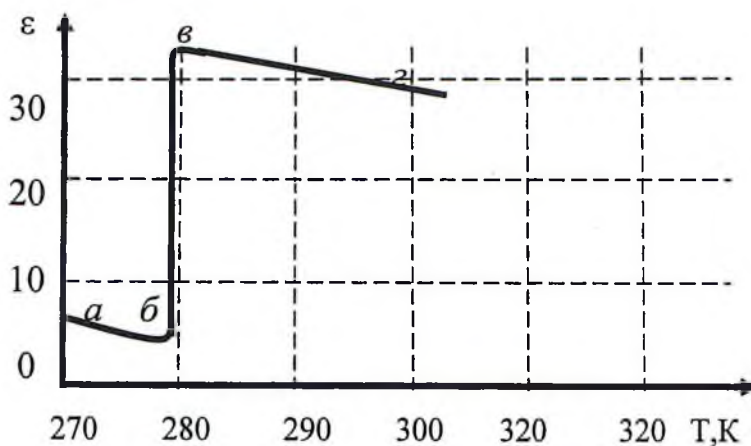


Рисунок 16 – Зависимость диэлектрической проницаемости полярного диэлектрика (нитробензола) от температуры при  $f=50$  Гц

Твердые кристаллические диэлектрики с плотной упаковкой частиц обладают электронной и ионной поляризацией. С ростом температуры диэлектрическая проницаемость ионных кристаллов увеличивается. Рисунок 6 показывает эту зависимость. Это объясняется тем, что с ростом температуры увеличивается межионное расстояние, которое приводит к ослаблению сил связи между ионами и к увеличению их смещения в электрическом поле.

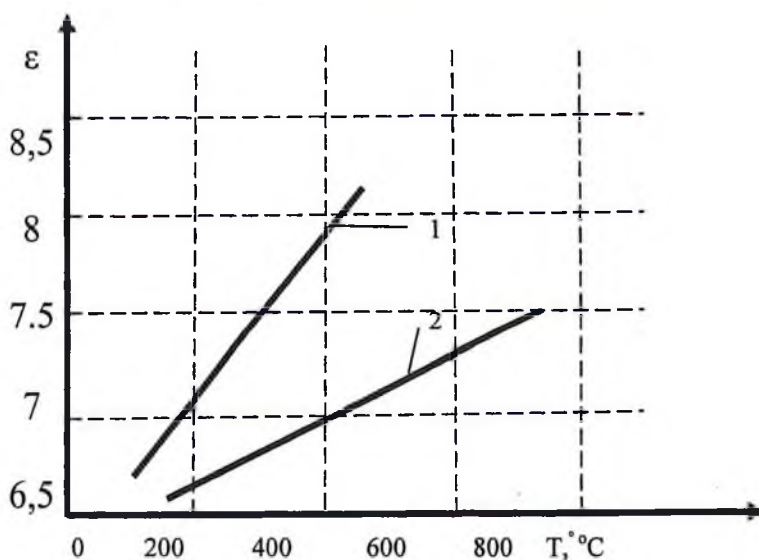




Рисунок 17 – Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для диэлектриков ионного строения при  $f=50$  Гц

1 – бесщелочное стекло; 2 - обычное стекло

### 1.3 Пробой твердого диэлектрика

При повышении напряжения, приложенного к слою изоляции сверх допустимого значения происходит пробой изоляции. Сквозной ток, протекающий через диэлектрик резко возрастает до  $10^8$  А/м<sup>2</sup>, а сопротивление диэлектрика резко уменьшается. При этом в месте пробоя диэлектрика образуется сквозной канал, обладающий большой проводимостью. В месте пробоя возникает искра, а при большой мощности источника – электрическая дуга, под действием которой происходит оплавление, обгорание, растрескивание и подобные изменения диэлектрика и электродов. В пробитом твердом диэлектрике в месте пробоя обнаруживается пробитое, проплавленное, прожженное отверстие – след пробоя. Если к такому образцу твердой изоляции приложить напряжение повторно, то пробой, как правило, происходит при значительно меньших напряжениях. Пробой твердой изоляции в электрической машине, аппарате, кабеле и т. п. означает аварию, выводящую данное устройство из строя.

Пробивное напряжение  $U_{пр}$  электрической изоляции зависит от ее толщины, т. е. расстояния между электродами. Слои одной и той же толщины различных материалов имеют различные значения пробивного напряжения.

Для надежной работы любого электротехнического устройства рабочее напряжение его изоляции  $U_{раб}$  должно быть существенно меньше пробивного напряжения  $U_{пр}$ .

Отношение  $U_{пр} / U_{раб}$  называют коэффициентом запаса электрической прочности изоляции

$$K_{зан} = U_{пр} / U_{раб} \quad (4)$$

где  $K$  - коэффициент запаса,

$U_{пр}$  - пробивное напряжение, В,

$U_{раб}$  - рабочее напряжение изоляции, В.

Различают 4 вида пробоев твердых диэлектриков:

1. Электрический пробой макроскопических однородных диэлектриков;
2. Электрический пробой неоднородных диэлектриков;
3. Тепловой пробой;
4. Электрохимический пробой.

Развитие той или иной формы пробоя зависит от природы твердого диэлектрика, наличия в нем дефектов, примесей и условий определения электрической прочности.

Электрический пробой имеет место при испытаниях на импульсах с длительностью  $10^{-8}$ – $10^{-5}$  с. и для него характерными являются следующие признаки:

- отсутствие участка насыщения, характерного для газов и жидкостей;
- при увеличении напряженности ток перед пробоем растет экспоненциально.
- электрический пробой начинается с ударной ионизации, возникающей при больших напряжениях, приложенных к диэлектрику. Процесс ударной

ионизации твердых диэлектриков схож с процессом ударной ионизации газов и жидкостей. В результате частых соударений свободных электронов с молекулами или атомами диэлектрика освобождаются все новые электроны, которые создают электронную лавину, пронизывающую твердый диэлектрик по всей его толщине. Пробой объемных образцов происходит в результате формирования одной лавины электронов и завершается в течение  $10^{-8}$ – $10^{-7}$  с. Поэтому при меньших временах выдержки пробой не успевает завершиться и  $E_{пр}$  растет. Пробой тонких (толщиной  $10^{-8}$ – $10^{-5}$  м) диэлектрических пленок обусловлен формированием многих электронных лавин и поэтому требует более длительного времени -  $10^{-6}$ – $10^{-5}$  с. Для того, чтобы в таких пленках образующиеся при пробое электронные лавины приобрели достаточную для пробоя мощность, необходимо увеличить напряженность электрического поля.

При электрическом пробое электрическая прочность мало зависит от толщины диэлектрика, его температуры и частоты приложенного напряжения, и в основном обусловлена внутренним строением диэлектрика.

При электрическом пробое в однородном поле, величина электрической прочности  $E_{пр}$  больше, чем в неоднородном поле.

Величина  $E_{пр}$  неоднородных по свойствам диэлектриков зависит от площади электродов. Чем больше площадь электродов, тем большее число дефектов в диэлектрике попадает в объем между электродами. Такое уменьшение электрической прочности характерно для бумаг, картонов, лакотканей, пористых керамик. Наличие газовых включений в твердой изоляции особенно опасно при высоких частотах. Высокой электрической прочностью характеризуются диэлектрики, имеющие плотную структуру и не содержащие газовых включений (слода, стекло, тщательно пропитанная бумага).

Электротепловой или тепловой пробой связан с нагревом изоляции в электрическом поле диэлектрическими потерями. Этот вид пробоя происходит в том месте, где наихудшие условия теплоотвода, т.е. нарушается равновесие между теплотой, выделяющейся в диэлектрике, и теплотой, которая отводится в окружающую среду. Тепловой пробой твердого диэлектрика развивается следующим образом: на диэлектрик подается напряжение, в нем выделяется теплота потерь и температура его повышается, а это приводит к увеличению потерь. Процесс идет интенсивнее, и в зависимости от природы материала в диэлектрике могут произойти изменения: расплавление, обугливание, прожигание. Собственная электрическая прочность снизится настолько, что произойдет пробой.

Электрическая прочность при тепловом пробое в значительной степени зависит от температуры и уменьшается с увеличением толщины твердого диэлектрика, отвод теплоты от него будет затруднен. Это приводит к перегреву места пробоя, и тепловое разрушение диэлектрика произойдет при меньшей напряженности электрического поля.

При электротепловом пробое пробивное напряжение  $U_{пр}$  зависит от частоты приложенного напряжения, от температуры окружающей среды: при возрастании частоты и температуры  $U_{пр}$  уменьшается; от нагревостойкости материалов пробивное напряжение органических диэлектриков (полистирол) имеет меньшее значение, чем неорганических (керамика, кварц).

Типичная зависимость электрического и электротеплового пробоя от

частоты и температуры показана на рисунке 18.

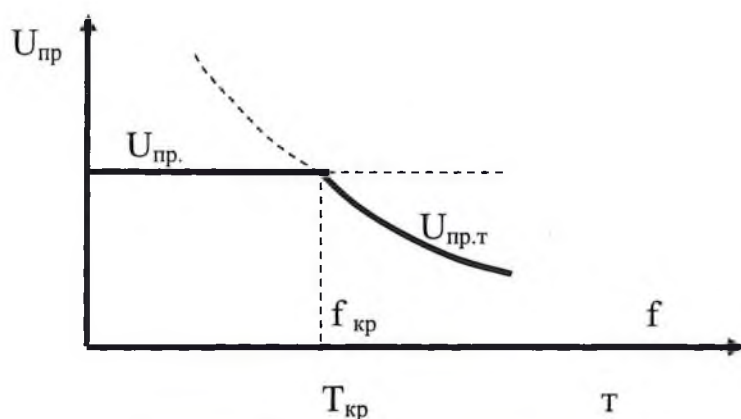


Рисунок 18 – Зависимость пробивного напряжения от частоты и температуры

Электрохимический пробой (старение диэлектрика) – вид медленно развивающегося пробоя, связанного с химическим изменением материала в электрическом поле.

Механизмы электрического пробоя различаются для органических и неорганических диэлектриков.

Для органических диэлектриков основной причиной старения являются частичные разряды, на переменном напряжении. Под действием частичных разрядов в газовом включении образуются дендриты – древовидные ветвящиеся трубочки, заполненные образующимся в результате разложения полимера газом. С течением времени они пронизывают всю толщину диэлектрика, замыкая электроды заполненным газом каналом, по которому происходит пробой изоляции. Такой механизм пробоя наблюдается в бумажно-масляной изоляции кабелей, в изоляции на основе эпоксидных смол.

Старение неорганических диэлектриков протекает более интенсивно на постоянном напряжении. В процессе ионной электропроводности происходит перенос ионов, т.е. вещества, что приводит к необратимому изменению химического состава материала в объеме образца или изделия. Поэтому  $E_{пр}$  диэлектрика уменьшается и происходит его пробой.

Электрические свойства основных электроизоляционных материалов, применяемых в электротехнике, приведены в таблице 6

Таблица 6- Основные электрические свойства твердых диэлектриков

Наименование диэлектрика		Электрические параметры при $t=20^{\circ}\text{C}$				
		$\rho_v, \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\varepsilon$ при $f=50\text{Гц}$	$\text{tg}(\delta)$ при $f=50\text{Гц}$	$E_{пр}, \text{ МВ/м}$	Примечания
1	2	3	4	5	6	
термопласты	полиэтилен	$10^{13} - 10^{15}$	2,2–2,4	$(2-6)\cdot 10^{-4}$	35 - 60	150 для тон. пл
	фторопласт-4	$10^{16} - 10^{17}$	1,9–2,2	$(1-3)\cdot 10^{-4}$	35 - 50	100–120 для тон. пленок
	полистирол	$10^{14} - 10^{15}$	2,4–2,6	$(1-5)\cdot 10^{-4}$	20 - 35	100–120 для тон. пленок

	поливинилхлорид	$10^9 - 10^{13}$	3,1–3,4	0,015–0,018	35–45	
	полиамид	$10^{15} - 10^{16}$	3,5	$(1-2)*10^{-3}$	30	200 для тон пленок
	лавсан	$10^{14} - 10^{15}$	3,1–3,2	$(3-10)*10^{-3}$	20	180 для тон. пленок
реактопласты	эпоксидные полимеры	$10^{12} - 10^{13}$	3,0–4,0	0,01 – 0,03	20 – 80	
	фенолформальдегидные смолы	$10^9 - 10^{10}$	5,0–6,5	0,06 – 0,1	12 – 16	
	кремнийорганические смолы	$10^{12} - 10^{14}$	3,5–5,0	0,01 – 0,03	15 – 25	
бумага конденсаторная		$10^4$		0,001–0,0018	19 - 50	Uпр=240–600В
бумага конденсаторная пропит. конденсатор. маслом					250 - 300	Uпр=250-300В
картон электроизоляционный					8–13	для работы в возд. среде
					40–85	с масл. заполн
фибра		$10^6 - 10^7$			3,5–7,5	
гетинакс		$10^8 - 10^{11}$	6 – 8	0,02 – 0,08	12–35	
текстолит		$10^7 - 10^{10}$	5 – 8	0,06 – 0,19	3-10	при t=90°
стеклотекстолит		$10^8 - 10^{12}$	6 – 9	0,006 – 0,06	7–27	
миканит коллекторный		$10^{10} - 10^{12}$		0,01 – 0,03	19 – 22	
миканит гибкий		$10^{11} - 10^{12}$		0,03 – 0,08	16 – 28	
лакоткань шелковая на масляных лаках h=0,04-0,15 мм		$10^{12} - 10^{13}$			38 - 72	Uпр=0,4–9,8кВ
лакоткань х/б на масляно-битумном лаке h=0,17-0,24 мм		$10^{11} - 10^{13}$			31,6 - 45	Uпр=4,5–9,2 кВ
Лакоткань стеклянная на кремний-органических лаках		$10^{12} - 10^{13}$			18 - 45	Uпр=1,5–3,5 кВ
слюдопласты	коллекторный	$10^{10} - 10^{11}$			22 – 24	
	формовочный	$10^{11} - 10^{12}$			32 – 55	
	прокладочный	$10^{11} - 10^{12}$			20 – 26	
Слюдониты	коллекторный	$10^{10} - 10^{11}$			28 – 35	
	гибкий	$10^{11} - 10^{12}$			17 – 26	
бакелит		$10^8 - 10^{11}$	4,0	0,01	12	50 для тон пленок
кварцевое стекло		$10^{16}$	3,8-4,2	$(2 - 3)*10^{-4}$	40-400	400 для тон. пленок
щелочные стекла		$10^{10} - 10^{15}$	5 – 10	$(5-250)10^{-4}$	40- 400	
ситаллы		$10^8 - 10^{12}$	5 – 10	$(1-80)*10^{-3}$	25 - 85	

электрофарфор	$10^{11} - 10^{12}$	5 – 8	0,022 – 0,025	30 – 32	
ультрафарфор	$10^{12} - 10^{13}$	8 – 8,8	0,0005–0,001	30 – 36	
стеатит	$10^{13} - 10^{14}$	6,5 – 7	0,001 – 0,003	40 – 42	

## 2 Описание лабораторной установки

Принципиальная схема лабораторной установки для испытания диэлектриков показана на рисунке 19

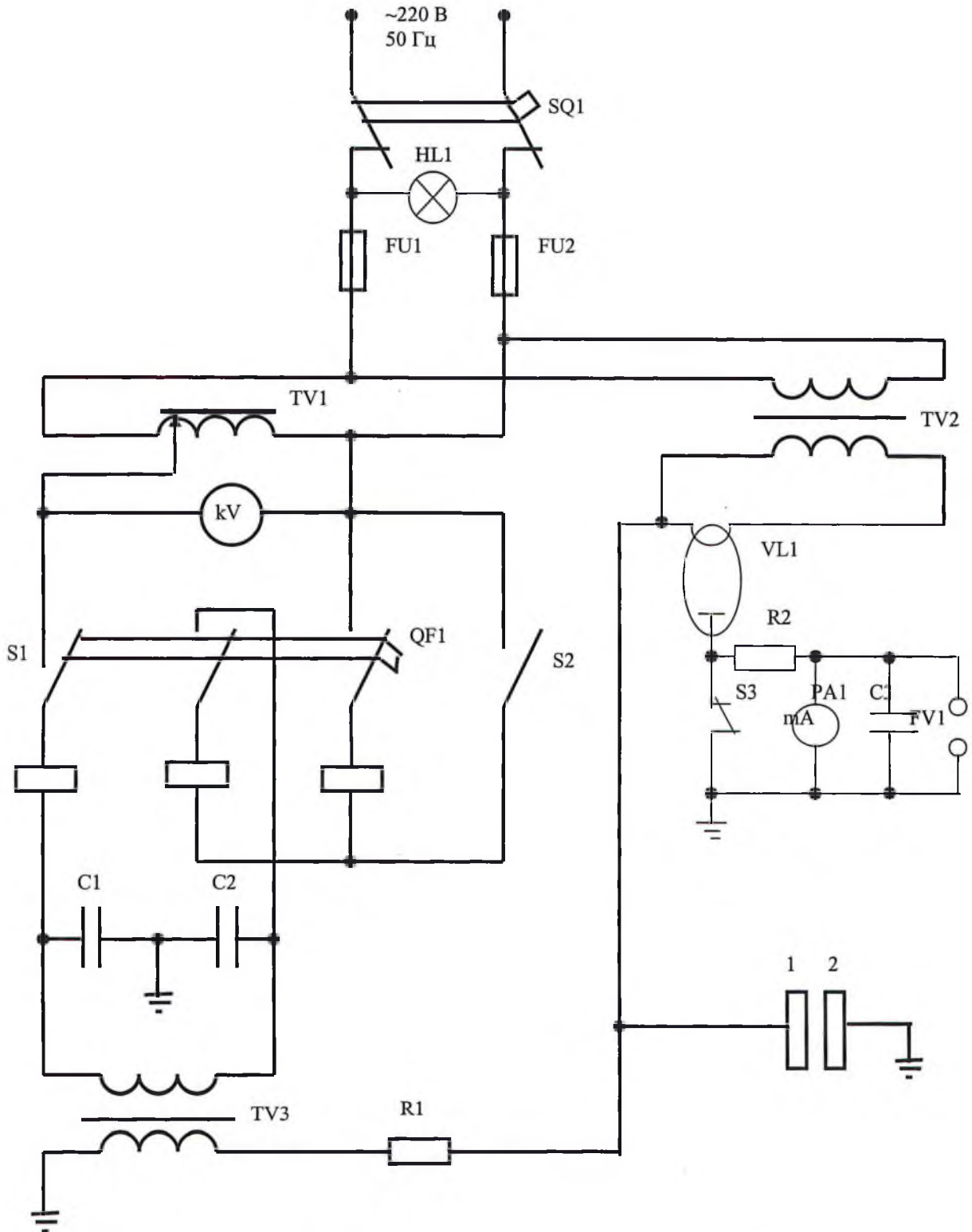


Рисунок 19 – Принципиальная схема испытательной установки АИИ – 70 для измерения

Испытательная установка содержит:

QF1 – автоматический выключатель;

SQ1 – блокировочный контакт;

S1, S2 – переключатель защиты;

VL1 – кенотрон;

FU1, FU2 – предохранитель;

TV1 – регулировочный трансформатор;

TV2 – трансформатор накала кенотрона;

TV3 – испытательный трансформатор для повышения напряжения;

PA1 – микроамперметр;

FV1 – разрядник;

1, 2 – электроды.

Принцип работы аппарата для испытания изоляции типа АИИ-70.

Измерение U<sub>пр</sub> образцов жидких и твердых материалов может выполняться с помощью установок, выпускаемых серийно.

Аппарат для испытания изоляции типа АИИ-70 предназначен для определения U<sub>пр</sub> материалов и испытания изоляции кабелей. Наибольшее напряжение при испытаниях на переменном токе составляет 50 кВ, на постоянном токе 70 кВ, мощность высоковольтного трансформатора 2 кВА.

Напряжение от сети через блокировочные контакты и предохранители подводится к регулировочному трансформатору TV1, служащему для плавного изменения напряжения, и к трансформатору накала кенотрона TV2. Включение высокого напряжения осуществляется путем включения автоматического выключателя QF1, имеющего три обмотки; две из них соединены последовательно (причем одна шунтируется переключателем защиты S2). Разомкнутое положение этого переключателя соответствует “чувствительной” защите: автомат срабатывает при пробое на стороне переменного тока и остается включенным, если ток в цепи выпрямленного напряжения не превосходит 5 мА. Когда переключатель S2 замкнут, осуществляется “грубая” защита: автомат не срабатывает при коротком замыкании на высокой стороне и остается включенным, если мощность на стороне высокого напряжения при 50 кВ не превосходит 2 кВА. Такой режим должен длиться не более 1 мин. Измерение напряжения на образце производится вольтметром kV класса 1.5 на стороне низкого напряжения, проградуированным в киловольтах. Конденсаторы С служат для защиты от перенапряжения первичной обмотки. При синусоидальной форме кривой питающего напряжения вторичное напряжение высоковольтного трансформатора в режиме холостого хода не отличается от синусоидального более чем на 5 %. Резистор R1 служит для защиты трансформатора от перегрузки при пробое образца. В установке имеется сосуд с электродами для стандартного испытания жидких материалов. Испытания на постоянном токе производят при помощи однополупериодного выпрямителя, для получения которой используется кенотрон VL1; на образец подается постоянное напряжение отрицательной полярности. Если необходимо измерить ток утечки, то для этой цели используется микроамперметр PA1 в анодной цепи. Защита микроамперметра от перегрузок осуществляется при помощи разрядника FV1, шунтирующего конденсатора С3 и

сопротивления R2. Аппарат снабжен пультом управления, защитным ограждением и заземляющей штангой для снятия заряда с испытываемого образца и заземления вывода высокого напряжения. Погрешность при измерении испытательного напряжения не превосходит  $\pm 2\%$ .

Испытания с помощью данного аппарата могут производиться при следующих трех режимах.

1. Кратковременное испытание выпрямленным напряжением до 70 кВ при длительности не более 10 мин с интервалами 3 мин.

2. Продолжительное испытание выпрямленным напряжением длительностью до 8ч.

3. Кратковременное испытание переменным напряжением до 50 кВ при длительности не более 1 мин с интервалами 5 мин.

## СОДЕРЖАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1 Ознакомиться со схемой лабораторной установки, изучить устройство и принцип работы аппарата АИИ – 70.

2 До включения лабораторной установки в сеть выполнить следующее:

- проверить надежность заземляющего провода;
- подготовить образцы для испытаний согласно заданию (выдает преподаватель);

- определить микрометром толщину испытываемого образца;
- установить рукоятку регулировочного автотрансформатора TV1 в нулевое положение;

- поместить подготовительный образец между электродами так, чтобы края образца были на 20 – 30 мм больше электродов;

Включить лабораторную установку в сеть при помощи автоматического выключателя QF1. С помощью регулировочного автотрансформатора TV1 плавно изменять напряжение от нуля до пробивного напряжения. Время повышения напряжения до пробоя должно составлять около 10 с. В качестве пробивного напряжения фиксируют наибольшие показания вольтметра перед моментом пробоя. После пробоя рукоятку регулировочного автотрансформатора TV1 повернуть до предела против часовой стрелки, установить в нулевое положение и отключить установку.

3 Снять по описанной методике зависимость  $U_{пр}$  от толщины образца ( $U_{пр}=f(h)$ ). Определение пробивного напряжения образца от толщины проводится на образцах из 2, 4 и 6 слоев.

4 На каждом выданном образце произвести три пробоя и найти средний результат. Результаты испытаний занести в таблицу 2.

Электрическая прочность рассчитывается по формуле:

$$E_{пр} = U_{пр} / h, \quad (5)$$

где  $E_{пр}$  – электрическая прочность, В/м;

$U_{пр}$  – пробивное напряжение, В;

$h$  – толщина исследуемого диэлектрика, м.

Таблица 7- Результаты исследования электрической прочности твердых диэлектриков в однородном электрическом поле

Кол-во слоев исследуемого образца	Исследуемый образец								
	Толщина слоя, h м	Напряжение пробоя				Электрическая прочность			
		$U_{1пр}, В$	$U_{2пр}, В$	$U_{3пр}, В$	$U_{ср.пр}, В$	$E_{1пр}, В/м$	$E_{2пр}, В/м$	$E_{3пр}, В/м$	$E_{ср.пр}, В/м$

5 Произвести определение пробивного напряжения от толщины образца  $U_{пр} = f(h)$  в неоднородном электрическом поле аналогично п. 2 - 4. Результаты испытаний занести в таблицу 3

Таблица 8- Результаты исследования электрической прочности твердых диэлектриков в неоднородном электрическом поле

Кол-во слоев исследуемого образца	Исследуемый образец								
	Толщина слоя, h, м	Напряжение пробоя				Электрическая прочность			
		$U_{1пр}, В$	$U_{2пр}, В$	$U_{3пр}, В$	$U_{ср.пр}, В$	$E_{1пр}, В/м$	$E_{2пр}, В/м$	$E_{3пр}, В/м$	$E_{ср.пр}, В/м$

### Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 1 Принципиальную схему лабораторной установки;
- 2 Таблицы результатов испытаний;
- 3 Графики зависимости  $U_{пр} = f(h)$  и  $E_{пр} = f(h)$  для исследуемых образцов при различной толщине слоев;
- 4 Выводы: дать сравнение изоляционных свойств исследованных материалов, преимущества и недостатки этих материалов, связанных с их областью применения.

### Контрольные вопросы

1. В чем различие между ионной и ионно-релаксационной поляризацией? Что характеризует время релаксации и от каких факторов оно зависит?
2. Назовите носители зарядов, создающих токи утечки в твердых диэлектриках? Каков механизм электропроводности твердых диэлектриков?
3. По каким признакам можно выявить механизм пробоя твердых диэлектриков?
4. Каков механизм пробоя характерен для диэлектриков при импульсном воздействии высокого напряжения?
5. Почему более толстые слои диэлектриков, как правило, имеют меньшую электрическую прочность?



6. Какие факторы влияют на величину электрической прочности твердых диэлектриков и почему?
7. Какие виды твердых диэлектриков Вы знаете? В чем их существенное отличие друг от друга?
8. Что собой представляют быстрые и медленные виды поляризации?
9. Что собой представляют диэлектрические потери? Какие параметры их характеризуют?
10. От каких факторов зависят диэлектрические потери?
11. Что представляют собой процессы электрического электротеплового и электрохимического пробоя?
12. Какие виды твердых диэлектриков обладают максимальной (минимальной) электрической прочностью? Чем это обусловлено?
13. По какому закону и как изменяется удельная проводимость твердых диэлектриков от температуры?
14. Какие параметры характеризуют удельную электропроводность твердых диэлектриков, и какие факторы влияют на нее?
15. Каким параметром характеризуется надежность электротехнического устройства?
16. Что характеризует диэлектрическая поляризация, и о каких факторов она зависит?
17. Почему при высоких частотах диэлектрическая проницаемость полярных диэлектриков уменьшается?
18. Почему с увеличением температуры диэлектрическая проницаемость диэлектриков ионного строения увеличивается?
19. Как изменяется диэлектрическая проницаемость твердых полярных диэлектриков с ростом температуры?
20. Чем объясняется уменьшение диэлектрической проницаемости неполярных диэлектриков с ростом температуры?



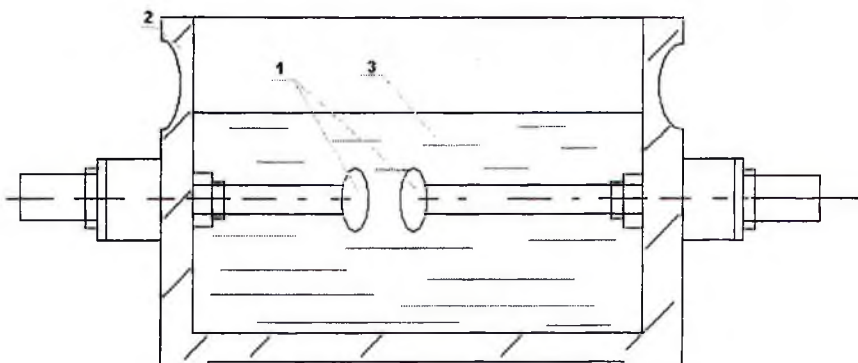


Рисунок 21- Сосуд с электродами для определения электрической прочности жидких диэлектриков

### Результаты измерений и вычислений

Таблица 9 – Результаты испытаний и расчётов электрической прочности трансформаторного масла

Наименование жидкого диэлектрика	Результаты измерений			Результаты вычислений			
	h, мм	U <sub>уд</sub> , кВ	U <sub>max</sub> , кВ	среднее U <sub>np</sub>		среднее E <sub>np</sub>	
				U <sub>уд</sub> , кВ	U <sub>max</sub> , кВ	E <sub>уд</sub> , $\frac{\text{кВ}}{\text{мм}}$	E <sub>max</sub> , $\frac{\text{кВ}}{\text{мм}}$
Чистое трансформаторное масло при температуре окружающей среды t=20°C	2,5	44	62	43	60,7	17,2	24,3
		42,5	60				
		42,5	60				
Трансформаторное масло с водой при температуре окружающей среды t=20°C	2,5	19	26	18,7	25,3	7,48	10,12
		18	24				
		19	26				
Чистое трансформаторное масло при температуре t=90°C	2,5	44	62	43,2	60,7	17,3	20,2
		42,5	60				
		43	60				

В ходе вычислений были использованы следующие формулы.

Среднее значение пробивного эффективного напряжения:

$$U_{уд. \text{ср}} = \frac{\sum U_{уд. i}}{n}$$

Среднее значение максимального (амплитудного) напряжения:

$$U_{max. \text{ср}} = \frac{\sum U_{max. i}}{n}$$

Электрическая прочность:

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{h}, \text{ кВ}$$

**Вывод:** в ходе данной лабораторной работы были подтверждены теоретические положения, касающиеся пробоя жидких диэлектриков (в данной работе диэлектрик - трансформаторное масло). При сравнении пробивного напряжения чистого трансформаторного масла и трансформаторного масла с водой наблюдается резкое снижение пробивного напряжения последнего по сравнению с чистым маслом, т.е. наличие воды ухудшает его электроизоляционные свойства. Однако, в опыте, где масло было нагрето до  $90^{\circ}\text{C}$ , его пробивное напряжение оставалось неизменным. Это говорит о том, что данное масло хорошего качества, нагрев на свойства трансформаторного масла не влияет.

## ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА № 2

### ПРИГОТОВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТОВ ДЛЯ АККУМУЛЯТОРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОЛИТА

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** Получить практические навыки по приготовлению электролита. Освоить приемы определения плотности электролитов.

**ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ:** Для определения плотности электролита требуется ареометр, который состоит из стеклянной запаянной полой трубки и бумажной шкалы с делениями. Нижняя часть ареометра представляет собой трубку большего диаметра, на дне которой находится балласт – определенное количество ртути или дроби. Кроме того, нужно иметь стеклянную или фарфоровую посуду, мерный стакан и стеклянные или эбонитовые палочки.

#### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для кислотных (свинцовых) аккумуляторов в качестве электролита применяют безводную (аккумуляторную) серную кислоту, растворенную в дистиллированной воде. Исправная работа аккумулятора во многом зависит от чистоты электролита, поэтому составные части электролита – кислота и вода – не должны содержать вредных примесей.

Плотность электролита сравнивают с плотностью дистиллированной воды, которая равна 1. Тогда плотность безводной серной кислоты равна  $1,84 \text{ г/см}^3$ . Плотность электролита для различных типов аккумуляторов устанавливает завод-изготовитель.

С изменением температуры электролита меняется его плотность. За номинальную температуру электролита принята температура  $15^\circ\text{C}$ . При температуре выше  $15^\circ\text{C}$  вводят поправку  $+0,0007$ , при температуре ниже  $15^\circ\text{C}$  вводят поправку  $-0,0007$ . Чем меньше плотность электролита, тем меньше внутреннее сопротивление аккумулятора, тем более долговечны его пластины. Но зато, чем больше масса аккумулятора и его габариты, тем больше подвержен электролит замерзанию. По значению плотности электролита судят о процессе зарядки аккумулятора и ее окончания, поэтому плотность необходимо измерять.

Для приготовления электролита определенной плотности можно пользоваться данными, приведенными в табл. 1.

Рассмотрим несколько примеров составления электролита.

**Пример 1.** Имеется раствор серной кислоты плотностью 1,41. Какое количество такого раствора и дистиллированной воды необходимо для приготовления 5 л электролита плотностью 1,22. По табл. 10 находим, что 1 л электролита плотностью 1,22 содержит 364 г безводной кислоты. 5 л электролита должны содержать  $364 \times 5 = 1820 \text{ г} = 1,82 \text{ кг}$  кислоты. По той же таблице находим, что 1 л раствора плотностью 1,41 содержит 721 г безводной кислоты. Следовательно, для получения 1,82 кг кислоты надо взять  $1,82 : 0,721 = 2,5 \text{ л}$  раствора плотностью 1,41. Для получения 5 л электролита плотностью 1,22 следует взять 2,5 л раствора серной кислоты плотностью 1,41, а остальные 2,5 л – дистиллированной воды.

**Пример 2.** Определить, сколько надо взять безводной серной кислоты плотностью 1,84 для приготовления 10 л электролита плотностью 1,274.

По табл. 10 находим, что 1 л электролита плотностью 1,274 содержит 461 г безводной кислоты. 10 л такого электролита должны содержать  $461 \times 10 = 4610 \text{ г} = 4,61 \text{ кг}$  кислоты. 1 л безводной кислоты весит 1,84 кг, поэтому для получения 4,61 кг необходимо взять  $4,61 : 1,84 = 2,5 \text{ л}$  кислоты.

Для получения 10 л электролита плотностью 1,274 следует взять 2,5 л чистой безводной кислоты, а остальные 7,5 л – дистиллированной воды.

Таблица- 10 Содержание безводной серной кислоты плотностью  $1,84 \text{ г/см}^3$  в электролите

плотность электролита, $\text{г/см}^3$	количество безводной серной кислоты на 1 л раствора	плотность электролита, $\text{г/см}^3$	количество безводной серной кислоты на 1 л раствора	плотность электролита, $\text{г/см}^3$	количество безводной серной кислоты на 1 л раствора

	при 15°С		при 15°С		при 15°С
1	0	1,190	310	1,468	834
1,007	12	1,200	328	1,483	863
1,014	23	1,210	346	1,498	894
1,022	34	1,220	361	1,515	926
1,029	46	1,231	382	1,530	958
1,037	58	1,241	401	1,547	900
1,045	71	1,252	421	1,563	1022
1,052	81	1,263	441	1,580	1054
1,060	93	1,274	461	1,597	1091
1,067	105	1,285	483	1,615	1128
1,075	117	1,297	504	1,635	1168
1,083	130	1,308	527	1,652	1200
1,091	145	1,320	548	1,671	1249
1,100	158	1,332	572	1,693	1293
1,108	172	1,345	596	1,710	1340
1,116	186	1,357	619	1,732	1386
1,125	199	1,370	643	1,753	1442
1,134	214	1,383	669	1,775	1491
1,143	229	1,397	697	1,790	1539
1,152	244	1,410	721	1,820	1636
1,161	259	1,424	748	1,839	1839
1,171	275	1,438	776		
1,180	292	1,453	805		

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Залить в приготовленную посуду дистиллированную воду. Количество воды и кислоты брать в соответствии с табл. 10.
2. Вливать осторожно тонкой струей кислоту из мерного стакана в дистиллированную воду, помешивая раствор стеклянной или эбонитовой палочкой.
3. После остывания раствора измерить плотность электролита ареометром и сравнивать его с данными, приведенными в табл.10.
4. Результаты измерения и вычислений записать в табл. 11.

Таблица 11 – Результаты измерения и вычислений

№ п/п	Температура воздуха, °С	Электролит			
		Наименование	Содержание кислоты,%	Расчетное значение плотности, г/см <sup>3</sup>	Плотность, измеренная ареометром г/см <sup>3</sup> ,

### ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Для приготовления электролита надо наливать кислоту в воду, а не наоборот. В этом случае реакция происходит под слоем воды и безопасна для работающего.

### Контрольные вопросы

1. Почему исходные материалы для приготовления электролита не должны содержать примесей?
2. Что называется плотностью электролита?
3. Как температура электролита влияет на его плотность?
4. Почему при приготовлении электролитов надо лить кислоту в воду, а не наоборот?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ.** Ознакомление с основными параметрами и характеристиками полупроводниковых выпрямительных диодов.

**ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ:** Мультиметр – 2 шт., Элемент питания (до 5 В), Колодка контактная, Полупроводник.

#### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В отличие от проводников полупроводники имеют не только электронную, но и «дырочную» проводимости, которые в сильной степени зависят от температуры, освещенности, сжатия, электрического поля и других факторов.

При отсутствии примесей и температуре, освещенности и т.д. близкой к абсолютному нулю, все валентные электроны атомов в кристалле п/п взаимно связаны и свободных электронов нет, так что п/п не обладает проводимостью. При повышении температуры или при облучении увеличивается энергия электронов, что приводит к частичному нарушению ковалентных связей и появлению свободных электронов, возникает электрический ток.



Рисунок 22- Кристаллическая решетка полупроводника парноэлектронная (ковалентная)

Электропроводность, обусловленная перемещением свободных электронов, называется электронной проводимостью полупроводника, или  $n$  - проводимостью.

Проводимость, возникающая в результате перемещения дырок, называется дырочной проводимостью, или  $p$ - $n$  проводимостью.

В тонком пограничном слое полупроводника  $n$ -типа возникает положительный заряд, а в пограничном слое полупроводника  $p$ -типа - отрицательный заряд. Между этими слоями возникает разность потенциалов (потенциальный барьер) и образуется электрическое поле напряженностью  $E_n$ , которая препятствует диффузии электронов и дырок из одного полупроводника в другой.

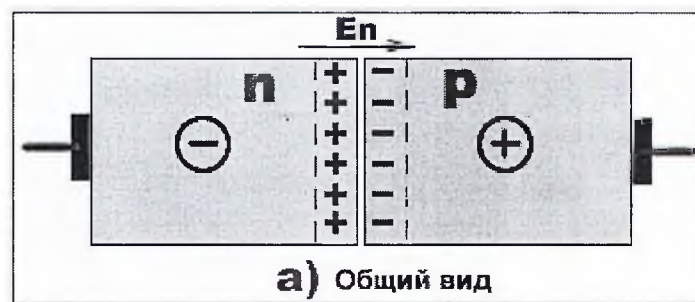


Рисунок 23 – Структура  $p$ - $n$  перехода

Таким образом, на границе двух полупроводников возникает тонкий слой, обедненный носителями зарядов (электронов и дырок) и обладающий большим сопротивлением. Этот слой называется запирающим  $p$ - $n$ -переходом.

Вследствие теплового движения в электрическое поле р-n-перехода попадают неосновные носители зарядов (электроны из р-области и дырки из n-области). Движение неосновных носителей зарядов под действием сил поля р-n-перехода направлено встречно *диффузионному* току основных носителей и называется *дрейфовым* или тепловым током, зависящим в сильной степени от температуры.

### Порядок выполнения

1. Начертить в тетради таблицу 12

Таблица 12

№	Название	Тип	Материал	$I_{обр}[mA]$	$I_{пр}[mA]$	$\Delta U$ (падение напряжения)
	Диод		Германий			

- Заносим в таблицу данные известные нам
- Поставим переключатель на измерение тока в миллиамперах.
- Соберём электрическую цепь по схеме на рис. 24
- Подключим диод в направлении (анод к (+) источнику, у диодов односторонняя проводимость), в цепь подключим лампу, чтобы избежать перегрузку диода, т.к. будет большой ток

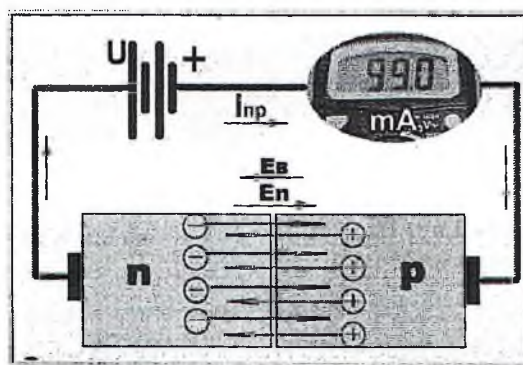


Рисунок 24- Схема включения диода в прямом направлении а

При изменении полярности источника питания (рис. 24) внешнее электрическое поле  $Eв$  окажется направленным встречно полю *p-n-перехода*  $Eп$  и под действием этого поля электроны и дырки начнут двигаться навстречу друг другу и число основных носителей заряда в переходном слое возрастет, уменьшая потенциальный барьер и сопротивление переходного слоя.

- записываем полученные данные в таблицу 2  $I_{пр} = \dots mA$
- Измеряем падение напряжения  $\Delta U$ , записываем данные в таблицу 2

2. - Подключим диод в направлении (анод к (-) источнику), в обратном направлении

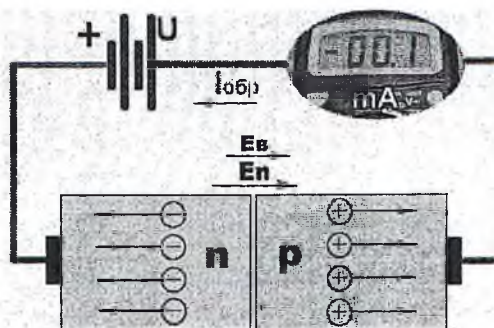


Рисунок 25- Схема включения диода в обратном направлении



- Соединив положительный зажим источника питания с металлическим электродом полупроводника *n-типа*, а отрицательный зажим с электродом полупроводника *p-типа*, получим внешнее электрическое поле  $E_{в}$ , направленное согласно с полем *p-n-перехода*  $E_{п}$ , усиливающее его (рис.4). Такое поле еще больше будет препятствовать прохождению основных носителей зарядов через запирающий слой и через диод пройдет малый обратный ток  $I_{обр}$ , обусловленный неосновными носителями заряда.

- записываем полученные данные в таблицу 2  $I_{обр} = \dots mA$

- Измеряем падение напряжения  $\Delta U$ , записываем данные в таблицу 12

3. Нарисовать вольтамперная характеристика германиевого диода, его условное обозначение и сделать вывод.

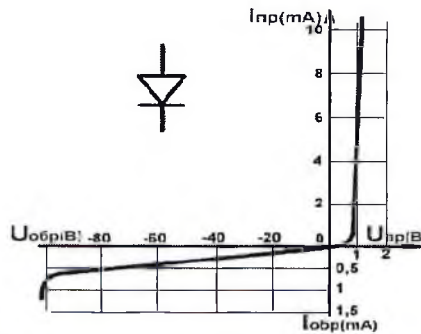


Рисунок 26 -Вольтамперная характеристика германиевого диода

Для большей наглядности прямая ветвь (правая часть графика) и обратная ветвь (левая часть графика) характеристики изображены в различных масштабах.

### Вывод:

Характеристика показывает, что при небольшом прямом напряжении  $U_{пр} = \dots В$  на зажимах диода в его цепи проходит относительно большой ток, а при значительных обратных напряжениях  $U_{обр}$  и  $I_{обр}$  ничтожно мал. Обратный ток диода в значительной мере зависит от *температуры*, увеличиваясь с ее повышением.

### Правила безопасной работы при сборке электросхемы:

- Внимательно рассмотреть электрическую схему
- Собрав схему показать преподавателю
- Внимательно работать с мультиметром

### Контрольные вопросы

1. Пояснить как образуется *p-n-переход*.
2. Свойства *p-n-перехода*, потенциальный барьер.
3. Какой из выводов полупроводникового диода называют базой, а какой эмиттером и почему?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ФОТОЭЛЕМЕНТОВ

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ.** Изучение фотоэлектрической зависимости электропроводимости полупроводников методом экспериментального исследования вольтамперных и люксамперных характеристик фоторезисторов.

**ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ:** Источник питания – 2шт., потенциометр -2шт., вольтметр- 2шт., амперметр, лампочка, фотоэлемент.

#### **ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ**

Фотопроводимость полупроводников - увеличение электропроводности под действием света; как правило, обусловлена появлением дополнительных неравновесных носителей в результате поглощения электронами квантов света с энергией, превышающей энергию их связи. Различают собственную и примесную фотопроводимости. В первом случае фотон поглощается валентным электроном, что приводит к рождению пары электрон - дырка. Пары электрон - дырка могут создаваться и фотонами с энергией, несколько меньшей  $E_g$ , т.к. возможны процессы, в которых электрон, поглощая фотон, получает дополнительную энергию за счёт теплового движения (кристаллической решётки или от равновесного носителя тока). Под действием существенно более длинноволнового света фотопроводимость возникает только при наличии примесей, создающих локальные уровни в запрещенной зоне, и связана с переходом электрона либо с локального уровня в зону проводимости, либо из валентной зоны на локальный уровень примеси (рождение дырки).

Явление фотопроводимости позволяет за короткое время (порядка микро- и наносекунд) изменять электропроводность полупроводника в очень широких пределах, а также даёт возможность создавать высокие концентрации носителей тока, в которых из-за относительно большой  $E_g$  и отсутствия подходящих примесей не удаётся получить заметных равновесных концентраций носителей.

Использование фотопроводимости полупроводников с разными  $E_g$  и глубиной примесных уровней (Si, Te, InSb, PbS, CdS, PbTe, Ge, легированный Zn или Au и т.д.) позволяет создавать высокочувствительные приёмники света для различных областей спектра от далёкой инфракрасной до видимой.

Фотоэлектрические полупроводниковые приборы предназначены для регистрации или преобразования электромагнитного излучения оптического диапазона частот. Среди этих приборов можно выделить такие, в которых излучение световой энергии действует на объем полупроводника, и приборы, в которых излучение действует на область вблизи p-n перехода. При воздействии излучения на объем полупроводника возникают свободные носители и, следовательно, изменяется проводимость полупроводника. Прибор, в котором используется это явление, называется фоторезистором (фотосопротивлением).

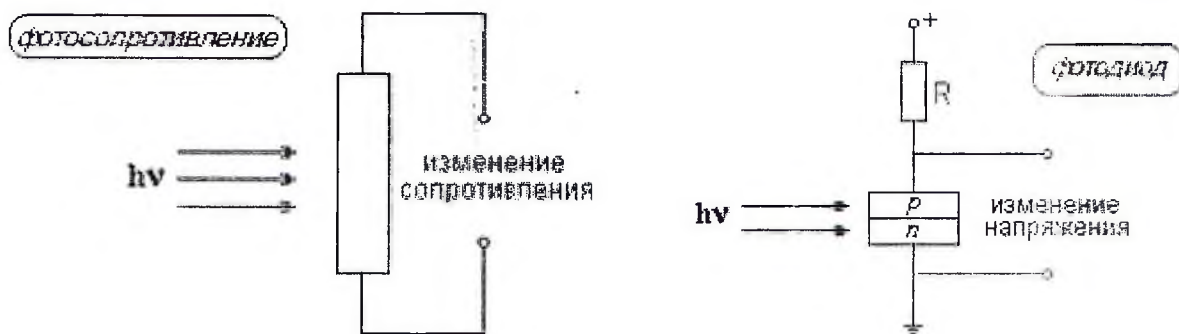


Рисунок 27- Фотосопротивление и фотодиод.

При воздействии излучения на прибор с р-п переходом в нем также возникают носители, в связи с чем либо будет изменяться проводимость перехода, включенного в обратном направлении, либо будет происходить разделение носителей под действием диффузионного поля перехода и возникнет ЭДС. Примерами таких приборов являются фотодиоды.

При необходимости усиления получаемого фототока используются фототранзисторы, которые имеют не менее двух электронно-дырочных переходов. Фотодиоды и фототранзисторы используют изменение проводимости р-п перехода (что вызывает изменение напряжения на этом переходе). Фотоэлектрические полупроводниковые приборы с генерацией ЭДС при воздействии излучения на область р-п перехода, называются фотоэлементами.

Фотоэлементы служат преобразователями световой энергии в электрическую. Некоторой разновидностью фотоэлементов являются солнечные элементы, предназначенные для преобразования солнечных лучей в электрическую энергию. Совокупность электрически соединенных фотоэлементов называется солнечной батареей. В фотодиодах на основе р-п – переходов используется эффект разделения на границе электронно-дырочного перехода созданных оптическим излучением неосновных неравновесных носителей. Схематически фотодиод изображен на рис.28

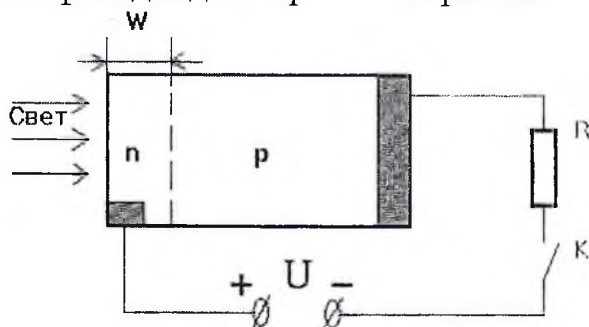


Рисунок 29- Фотодиод

### Порядок выполнения работы

1. Включить питание стойки.
2. Включить питание источника излучения схемы измерительной установки.  
ВНИМАНИЕ. Перед включением блока питания источника излучения необходимо потенциометр, которым регулируется ток, установить в положение "0". Плавно вращая регулятор потенциометра, установить рабочее значение тока (значение рабочего тока указано на стенде).
3. Включить источник питания фотоэлемента. Значение рабочего напряжения

указано на стенде.

4. Снять зависимость фототока от длины волны:  $I_0 = I_0(\lambda)$ . Результаты внести в соответствующую графу табл.13.

Таблица13- Результаты измерений люксамперных характеристик

Параметр	$V_1=10\text{ В}$						$V_1=20\text{ В}$						$V_1=30\text{ В}$						
	$V_2, \text{ В}$	0	5	10	15	20	25	0	5	10	15	20	25	0	5	10	15	20	25
J люкс																			
Jф, мА																			

Схема измерительной установки

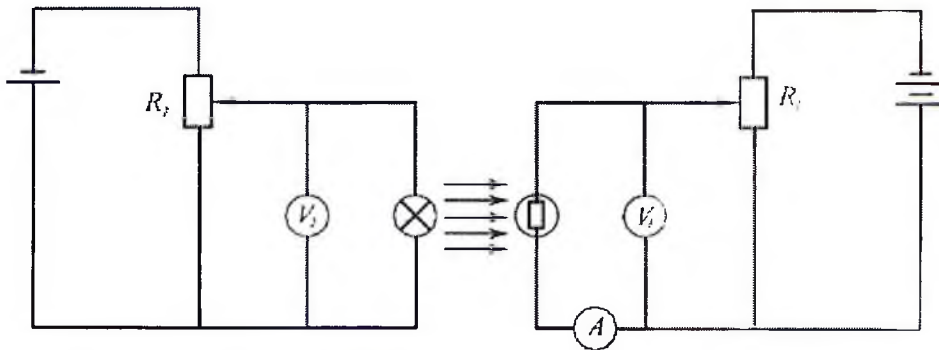
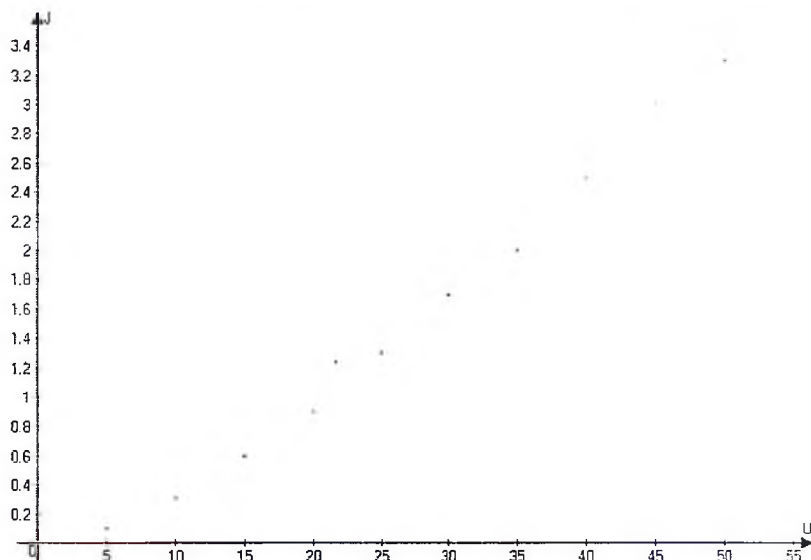


Таблица14- Результаты измерений вольтамперных характеристик

		$U_2=25\text{ В}$										
$U\text{ф, В}$	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
Jф, мА	0	0,1	0,3	0,6	0,9	1,3	1,7	2	2,5	3	3,3	

График семейств вольтамперных характеристик



### Контрольные вопросы

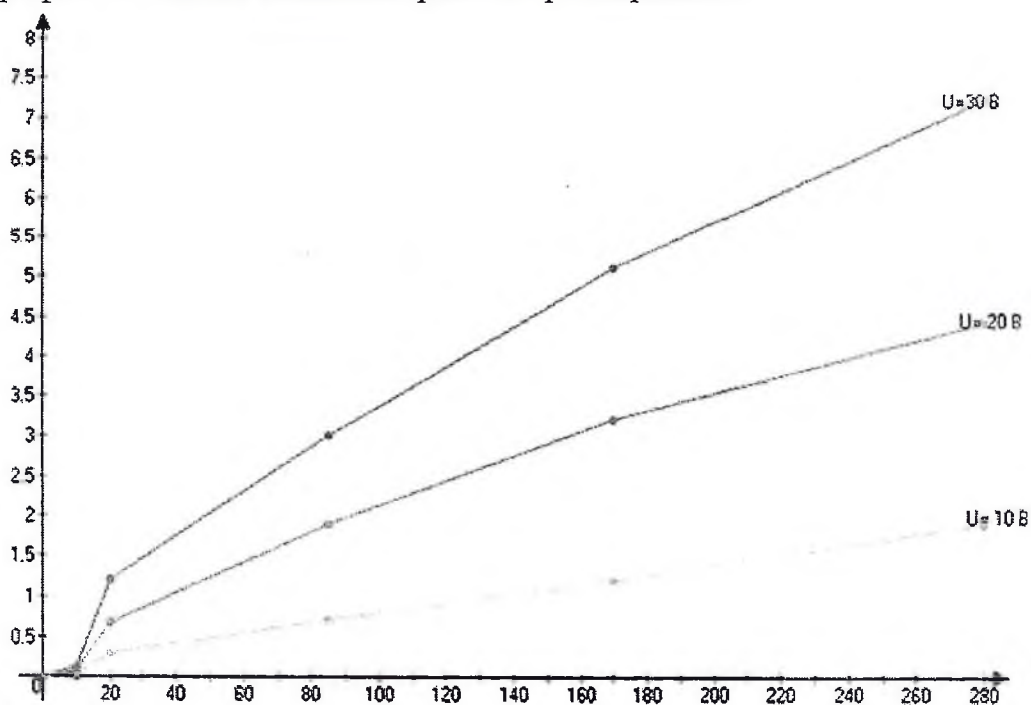
1. В чем заключается явление внешнего фотоэффекта?
2. Сформулируйте и объясните законы внешнего фотоэффекта.
3. Чем внутренний фотоэффект отличается от внешнего?
4. Опишите принцип действия полупроводникового вентильного фотоэлемента

Таблица 13- Результаты измерений люксамперных характеристик

Параметр	$V_1=10\text{ В}$						$V_1=20\text{ В}$					
	$V_2, \text{ В}$	0	5	10	15	20	25	0	5	10	15	20
J люкс	0	10	20	85	170	280	0	10	20	85	170	280
Jф, мА	0	0,04	0,28	0,71	1,2	1,9	0	0,09	0,67	1,9	3,2	4,4

Параметр	$V_1=30\text{ В}$					
	$V_2, \text{ В}$	0	5	10	15	20
J люкс	0	10	20	85	170	280
Jф, мА	0	0,13	1,2	3,0	5,1	7,2

График семейств люксамперных характеристик:



Вывод: В данной лабораторной работе исследовали фотоэлектрические свойства полупроводников. Проведя лабораторную работу, построили вольтамперную и люксамперную характеристики полупроводников. Экспериментальные данные близки к теоретическим. Полученная вольтамперная характеристика линейна только на начальном участке, то есть в области слабых полей. В области сильных полей характеристика становится не линейной из-за насыщения дрейфовой скорости электронов, приближения длины свободного пробега к расстоянию между электродами. Так как при малой освещенности имеет место низкий уровень инжекции, то люксамперная характеристика в начальный момент линейна. Так как при низком уровне инжекции  $V_p \sim \Delta n$ . При повышении уровня люксамперная характеристика становится не линейна. Так как скорость рекомбинации при высоком уровне инжекции  $V_p \sim \Delta n^2$ .