

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

А. А. Веремеев, С.В. Митрофанов

# **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

Учебное пособие

Рекомендовано ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника и 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Оренбург  
2021

УДК 621.3(075.8)

ББК 31.23 я73

В31

Рецензент – доцент, кандидат технических наук В.Б. Шлейников

**Веремеев, А.А.**

В31 Определение параметров электротехнических материалов  
[Электронный ресурс] : учебное пособие / А.А. Веремеев,  
С.В. Митрофанов ; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2021.

ISBN 978-5-7410-2619-9

В учебном пособии изложены основные сведения по электротехническому и конструкционному материаловедению, приведены методические указания для выполнения лабораторных работ и методики определения основных параметров электротехнических материалов.

Учебное пособие предназначено для обучающихся направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника и 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника.

УДК 621.3(075.8)

ББК 31.23 я73

© Веремеев А.А.,  
Митрофанов С.В., 2021  
© ОГУ, 2021

ISBN 978-5-7410-2619-9

## Содержание

Введение.....	5
1 Общая компоновка.....	7
1.1 Однофазный источник питания.....	9
1.2 Блок генераторов напряжений с наборным полем (БГНПП).....	9
2 Температурный коэффициент сопротивления.....	17
3 Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляционных материалов .....	20
3.1 Локальные поля.....	20
3.2 Температурная зависимость диэлектрической проницаемости.....	23
3.3 Аморфные твердые тела.....	24
3.4 Частотная зависимость диэлектрической проницаемости .....	27
3.5 Диэлектрические потери .....	29
4 Снятие петли гистерезиса и построение кривой намагничивания .....	35
4.1 Намагничивание .....	36
4.2 Магнитные моменты .....	38
4.3 Ферромагнетизм.....	39
4.4 Ферромагнитные свойства .....	41
4.5 Петля гистерезиса .....	42
4.6 Магнитно-мягкие и магнитно-жесткие материалы. ....	44
4.7 Фотоэффект. Виды фотоэффекта .....	48
5 Лабораторная работа №1. Измерение сопротивлений и определение удельных сопротивлений проводников .....	56
5.1 Терминологический минимум.....	57
5.2 Теоретический минимум.....	58
6 Лабораторная работа №2. Исследование барьерного фотоэффекта и снятие вольтамперной характеристики фотодиода.....	62
6.1 Терминологический минимум.....	62
6.2 Теоретический минимум.....	63
6.3 Общие сведения и описание лабораторной установки .....	67

6.4 Указания по проведению эксперимента.....	71
7 Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляционных материалов .....	75
7.1 Терминологический минимум.....	75
7.2 Теоретический минимум.....	75
7.3 Лабораторная установка и электрическая схема соединений.....	78
7.4 Указания по проведению эксперимента.....	81
8 Снятие петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и определение точки Кюри .....	83
8.1 Терминологический минимум.....	83
8.2 Теоретический минимум.....	84
8.3 Лабораторная установка и электрическая схема соединений.....	87
8.4 Указания по проведению эксперимента.....	91
Список использованных источников .....	94
Приложение А .....	98
Приложение Б.....	99
Приложение В .....	100

## Введение

В учебном пособии приведена методика проведения лабораторных работ по курсу «Электротехническое и конструкционное материаловедение» на лабораторном стенде «Электротехнические материалы».

Методика может быть применена в образовательных учреждениях среднего и высшего звена.

Данное пособие может быть использовано и при подготовке и переподготовке специалистов сотрудников предприятий и электротехнических лабораторий.

Стенд выполнен по модульному принципу и содержит в своем составе 5 модулей с дополнительным оборудованием для проведения экспериментов. Со стендом в комплекте идет ноутбук и цифровой осциллограф, что делает проведение лабораторных работ более наглядными.

Целью освоения дисциплины является получение знаний об основных электротехнических и конструкционных материалах, применяемых для изготовления и ремонта электрических машин и аппаратов, установление связи между строением, свойствами и областью применения этих материалов; изучение методов обеспечения заданных физико-механических свойств материалов и контроля их качества, а также методов их обработки для наиболее эффективного применения в технике.

В результате изучения дисциплины студент должен решать следующие профессиональные задачи:

- изучение научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по направлению исследований в области производства электротехнических и конструкционных материалов;
- математическое моделирование процессов;

- проведение экспериментов по заданным методикам, обработка и анализ результатов;
- составление описаний проводимых исследований, подготовка данных для составления научных обзоров и публикаций.
- производственно-технологическая деятельность:
  - контроль соблюдения технологической дисциплины при изготовлении изделий;
  - организация метрологического обеспечения технологических процессов, использование типовых методов контроля качества выпускаемой продукции;
  - подготовка технической документации по менеджменту качества технологических процессов на производственных участках;
- организационно-управленческая деятельность:
  - составление технической документации (графиков работ, инструкций, смет, планов, заявок на материалы и оборудование) и подготовка отчетности по установленным формам;
- проектно-конструкторская деятельность:
  - сбор и анализ исходных информационных данных для проектирования изделий электромашиностроения и технологий их изготовления.

## **1 Общая компоновка**

Состав и внешний вид лабораторного стенда «Электротехнические материалы» приведены на рисунке 1.1.

Структура стенда выполнена по модульному принципу, в состав стенда также входит стол с выдвижными ящиками и прикрепленной к нему металлической рамой, в которую устанавливаются модули приборов, блок питания. Модули могут быть перемещены в пределах рамы в зависимости от удобства их расположения при проведении эксперимента.

С использованием лабораторного стенда можно провести исследования электротехнических материалов и определить тангенс угла диэлектрических потерь, температурный коэффициент, магнитные характеристики материала и построить петлю гистерезиса, определить точку Кюри и построить вольтамперную характеристику фотодиода.

Перед началом проведения лабораторной работы следует изучить методику проведения исследования, подготовить необходимые графики и таблицы для заполнения результатов.

При проведении экспериментов необходимо соблюдать технику безопасности, предупреждать преподавателя о начале эксперимента и включать стенд только с одобрения собранной схемы. На столе стенда не должно находиться посторонних предметов, мешающих проведению работы.



- 1 - однофазный источник питания; для присоединения всех блоков к сети  $\sim 220$  В;
- 2 - блок генераторов напряжений с наборным полем для питания отдельных блоков переменным и постоянным током пониженного напряжения и сборки электрических цепей;
- 3 - электронагреватель для нагрева испытываемых образцов;
- 4 - измеритель R L C;
- 5 - блок мегаомметра.
- 6 - набор миниблоков, содержащих испытываемые образцы и некоторые вспомогательные элементы;
- 7 - мультиметр для измерения тока, напряжения, сопротивления и температуры;
- 8 - блок конденсатора для определения диэлектрической проницаемости и тангенса потерь различных диэлектриков;
- 9 - модуль испытания изоляции для определения зависимости от температуры диэлектрической проницаемости, тангенса потерь и удельных объёмных и поверхностных сопротивления диэлектрика;
- 10 - ноутбук общего применения;
- 11 - блок питания 12 В
- 12 - USB осциллограф;
- 13 - соединительные провода, кабели, испытываемые образцы проводников, резисторов и диэлектриков и другие аксессуары;
- 14 - измеритель сопротивления изоляции.
- 15 - методические материалы.

Рисунок 1.1 – Общий вид лабораторного стенда



## **1.1 Однофазный источник питания**

Блок питания (однофазный) предназначен для соединения стенда с питающей сетью переменного напряжения 220 вольт. В составе блока имеется защита от перегрузок и коротких замыкания, для более надежной защиты от токов утечки установлено УЗО (устройство защитного отключения). Для выполнения коммутаций с сетью в модуле установлены два автоматических выключателя, УЗО и розетки (2 штуки). Присоединения питающих проводов выполняется с обратной стороны модуля.

## **1.2 Блок генераторов напряжений с наборным полем (БГННП)**

Для создания сигналов специальных форм используется БГННП. Наборное поле служит универсальной платформой для установки миниблоков, которые находятся в выдвижном ящике стенда, таким образом схема может быть собрана быстро и легко.

Состав БГННП представлен на рисунке 1.2. На изображении БГННП можем видеть генератор постоянных напряжений и генератор сигналов специальной формы.

На лицевой панели БГННП имеется схема, которая отображает соединение гнезд между собой и места установки миниблоков, там, где разметка не нанесена расположение блоков может производиться в произвольной форме. Так же на нем указаны цепи соединения с источником питания и предел изменения тестируемого напряжения. В наборе стенда имеются проводники, перемычки и соединители для присоединения измерительной аппаратуры к лабораторной установке.

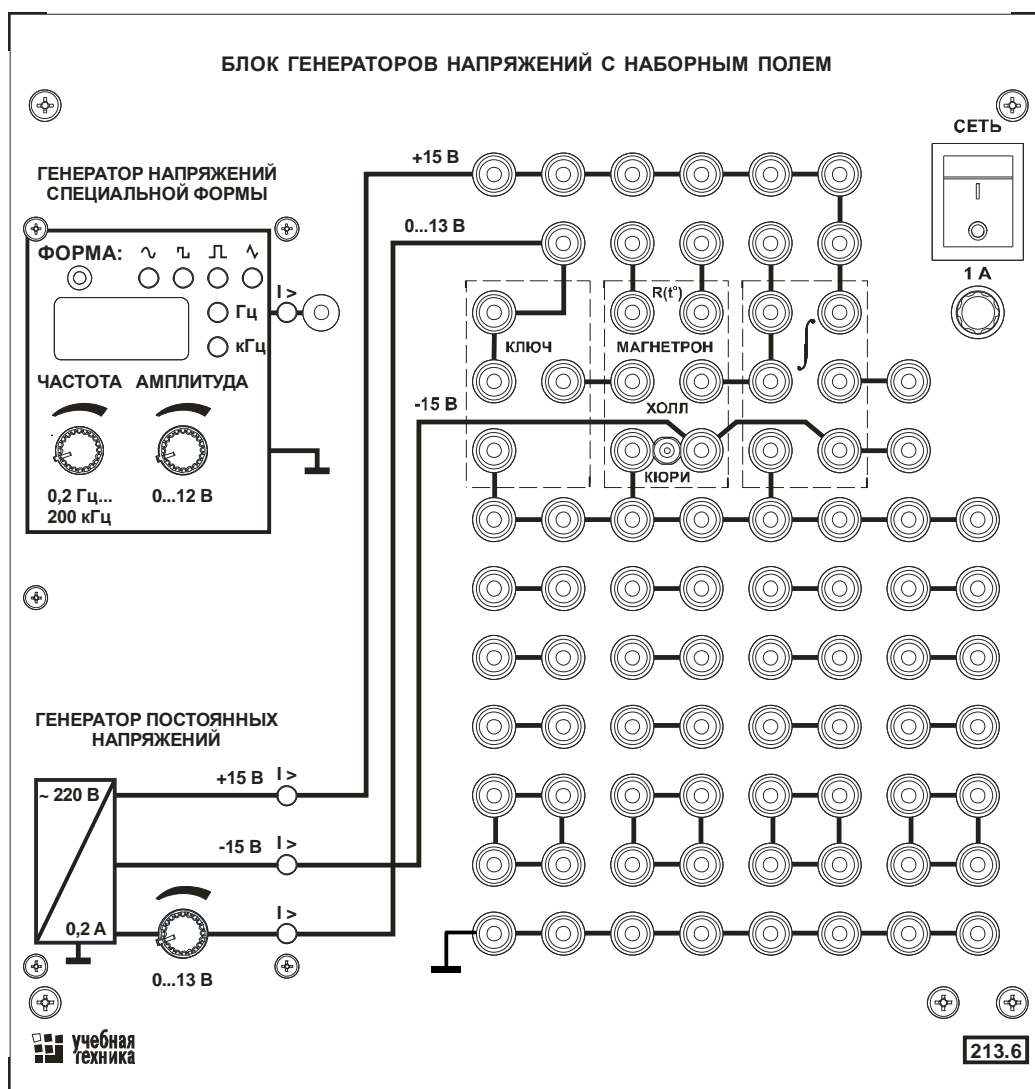


Рисунок 1.2 – Блок генераторов напряжений с наборным полем

Питание БГННП осуществляется при помощи шнура сзади блока питания. Подключение происходит к однофазному источнику питания.

Набор миниблоков применяемых для выполнения лабораторных работ представлен на рисунке 1.3.

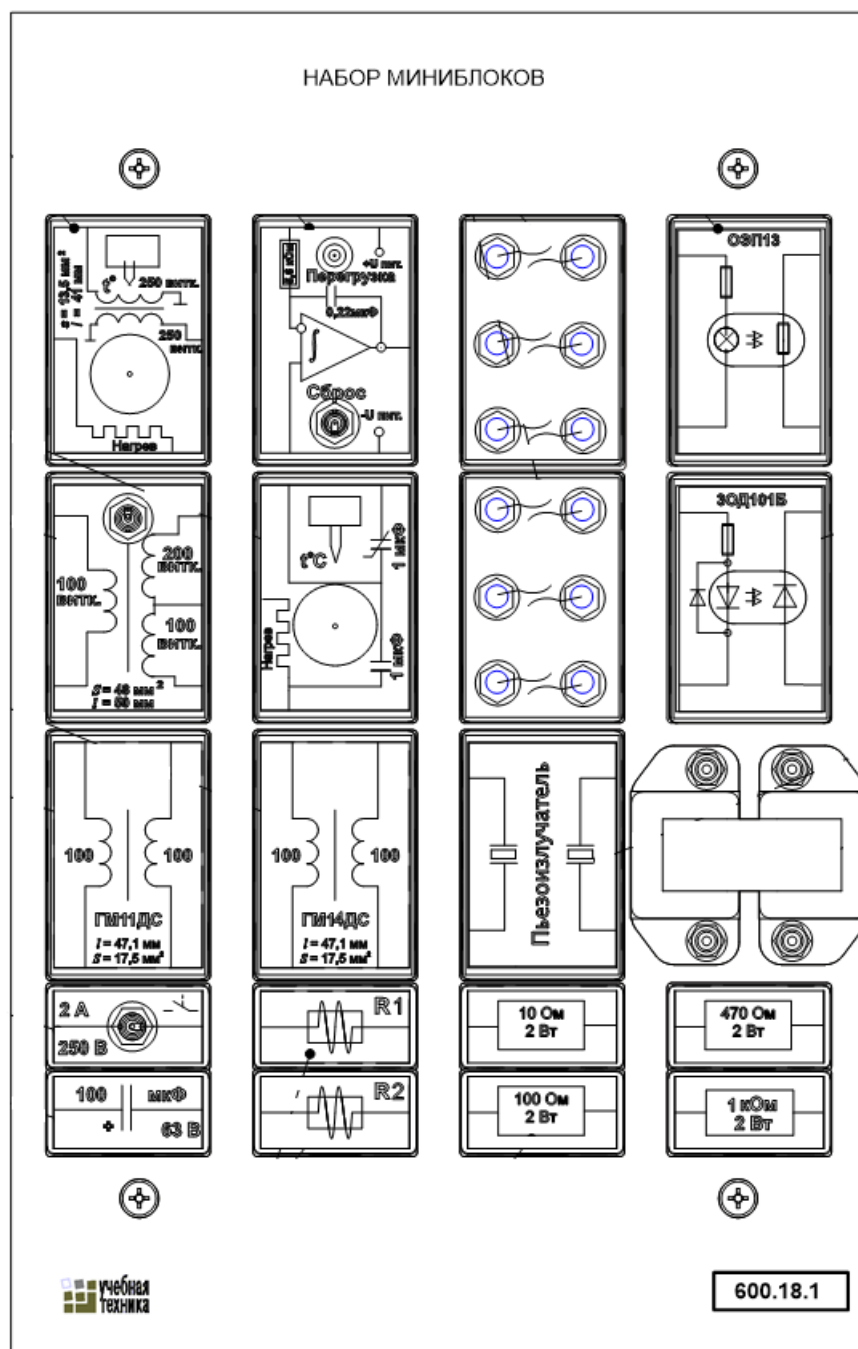
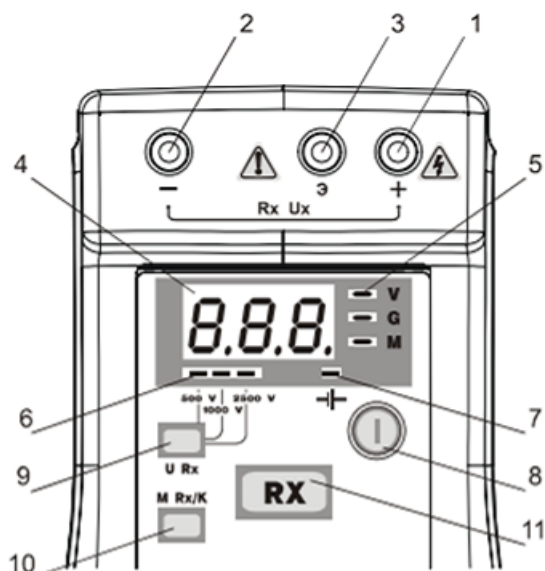


Рисунок 1.3 – Набор миниблоков

Для выполнения работ с использованием повышенного напряжения до 2,5 кВ в составе стенда имеется мегаомметр, его внешний вид представлен на рисунке 1.4.



- 1,2,3 – гнезда для подключения кабелей; 4 – индикатор;
- 5 – индикаторы единиц измерения (сверху вниз соответственно – «Volt», «GOhm», «Mohm»); 6 – индикаторы испытательных напряжений (слева направо соответственно – «500 V», «1000 V», «2500 V»);
- 7 – индикатор заряда аккумуляторной батареи; 8 – переключатель «выключение/включение» мегаомметра; 9 – кнопка вывода на индикацию результатов последнего измерения из памяти прибора и вычисление коэффициента абсорбции; 11 – кнопка измерения сопротивления изоляции.

Рисунок 1.4 – Внешний вид мегаомметра

Для выполнения измерений тока, напряжений, в некоторых случаях температуры (в данной комплектации мультитерма присутствует такая функция), а также для проверки диодов и транзисторов имеется мультиметр, внешний вид которого приведен на рисунке 1.5.

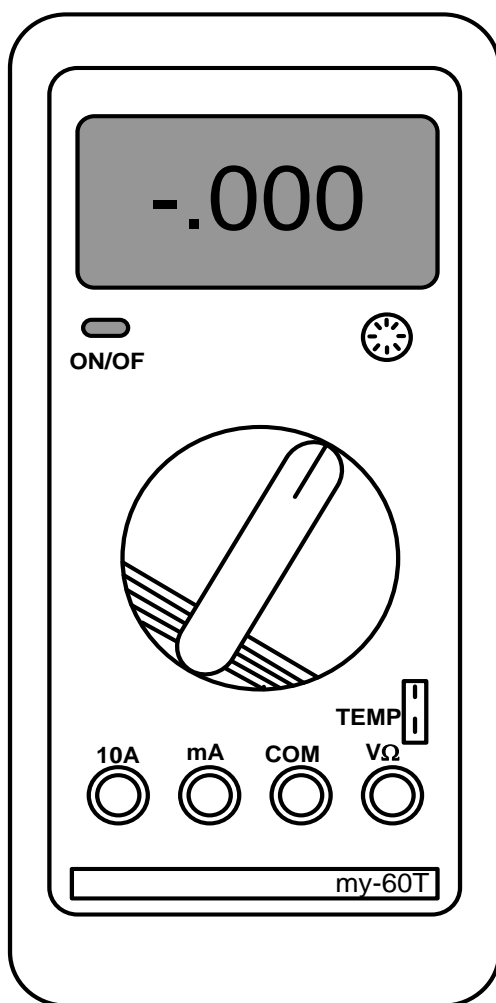


Рисунок 1.5 – Внешний вид мультиметра

Для измерения таких параметров, как индуктивность, емкость и сопротивление электрических цепей и электротехнических материалов в наборе стенда имеется прибор «Измеритель параметров R, L, C». Внешний вид и схема соединений прибора показана на рисунках 1.6 – 1.7.

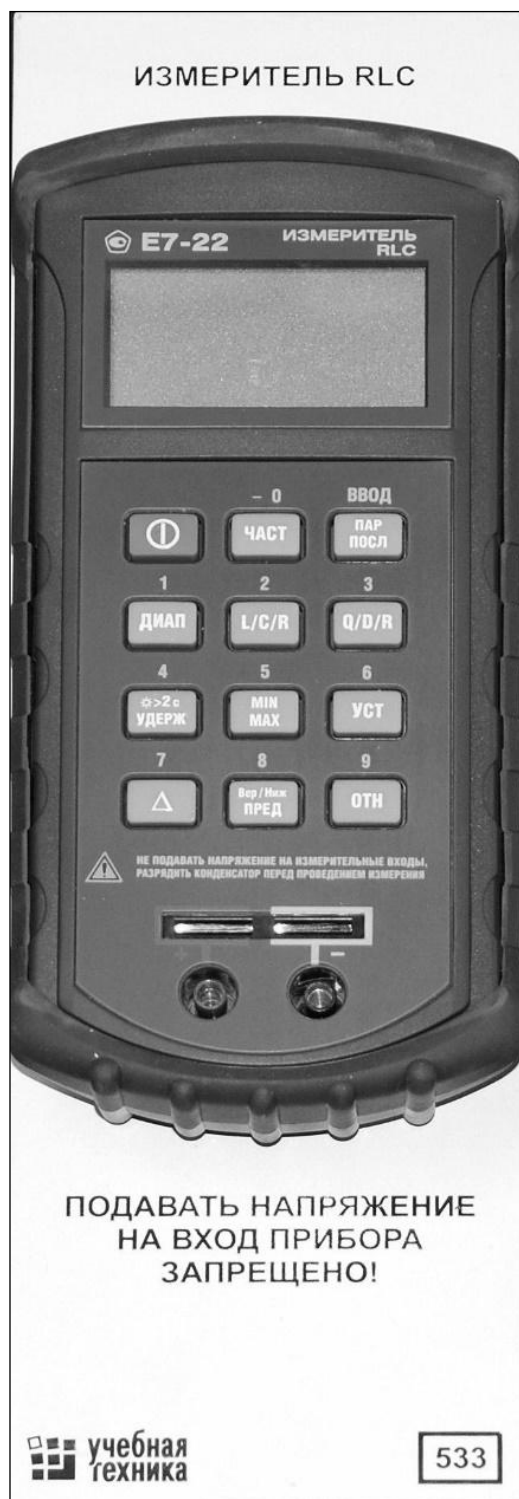


Рисунок 1.6 – Внешний вид прибора «Измерителя параметров R, L, C»

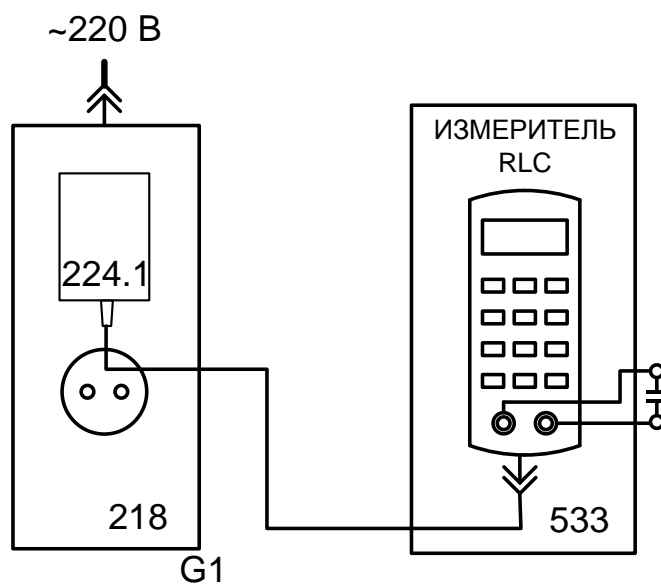
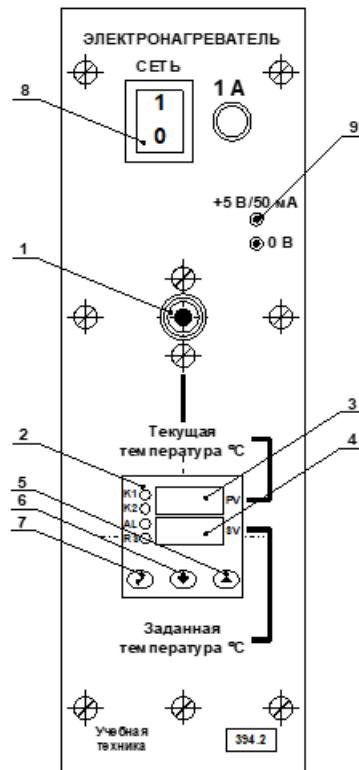


Рисунок 1.7 – Схема электрическая соединений прибора «Измерителя параметров R, L, C»

Блок электронагревателя (рисунок 1.8) предназначен для определения температурного коэффициента электротехнических материалов. Функционал блока позволяет выполнять нагрев в автоматическом режиме и поддерживать заданную температуру. Внешний вид электронагревателя изображен на рисунке 1.8.



- 1 – отверстие нагревателя;
- 2 – измеритель-регулятор температуры;
- 3 – индикатор текущего значения температуры нагревателя (PV);
- 4 – индикатор заданного значения температуры нагревателя (SV);
- 5,6,7 – кнопки управления регулятором температуры;
- 8 – выключатель питания;
- 9 – гнезда источника питания +5 В

Рисунок 1.8 – Внешний вид блока электронагревателя



## 2 Температурный коэффициент сопротивления

Температурный коэффициент сопротивления представляет собой величину изменения электрического сопротивления вещества (участка цепи) при повышении или понижении температуры на 1 °С.

Температурный коэффициент сопротивления определяется следующим образом:

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)} \quad (2.1)$$

или через удельное сопротивление

$$\alpha = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1(T_2 - T_1)} \quad (2.2)$$

Увеличение градиента температуры приведет к росту теплового возбуждения и вызовет нарушение порядка в структуре материала, что будет вызывать отражения и соударения потока электронов. Такие явления приведут в конечном счете к снижению проводимости (и как следствие к росту сопротивления материала).

Температурная зависимость удельного электрического сопротивления чистой меди и чистого алюминия представлена на рисунке 2.1. За исключением области очень низкой температуры, удельное электрическое сопротивление линейно зависит от температуры:

$$\rho\tau = \rho_{273}[1 + a\tau(T - 273)] \quad (2.3)$$

где  $\rho_{273}$  – удельное электрическое сопротивление при 273 К (0°C).

Для чистых металлов температурный коэффициент электросопротивления  $a\tau$  составляет примерно  $0,005 \text{ K}^{-1}$ ; это означает что при повышении температуры от 0 до 200°C средняя длина пробега уменьшается примерно вдвое. На рисунке 2 представлены значения температурного коэффициента сопротивления и удельного сопротивления некоторых материалов.

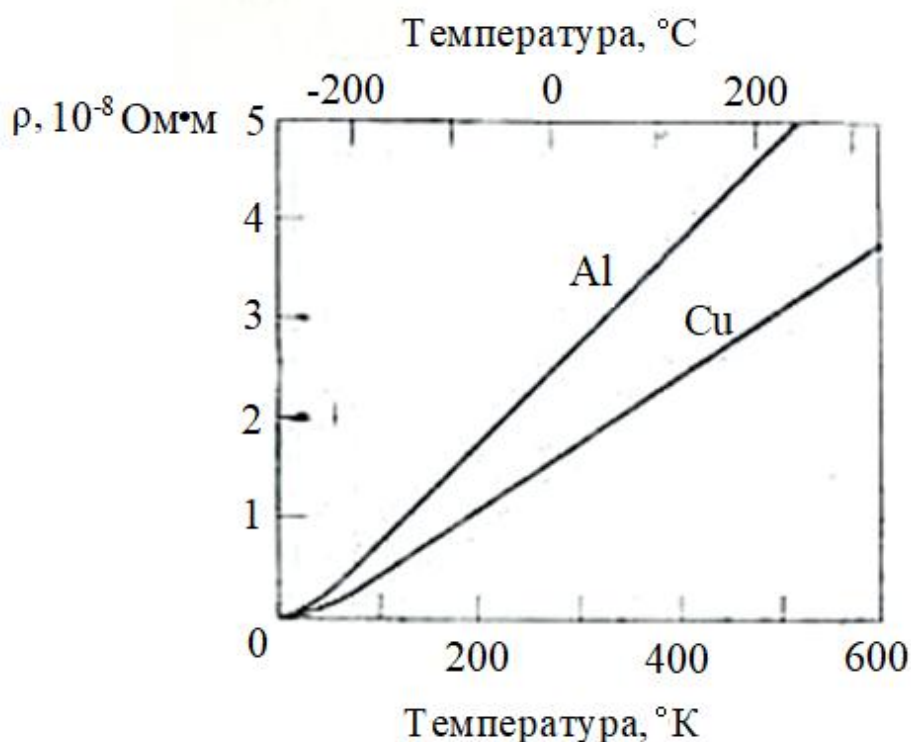


Рисунок 2.1 - Температурная зависимость удельного электрического сопротивления  $\rho$  (алюминия и меди)

<b>Металл</b>	<b>Удельное электрическое сопротивление, Ом·мм<sup>2</sup>/м</b>	<b>Температурный коэффициент сопротивления, 1/°C</b>
Алюминий	0,026 – 0,028	0,00403 – 0,00429
Бронза	0,020 – 0,050	0,004
Вольфрам	0,053 – 0,055	0,004 – 0,005
Золото	0,022 – 0,023	0,0036
Латунь	0,031 – 0,079	0,002
Медь	0,017 – 0,018	0,004
Молибден	0,048 – 0,054	0,0047 – 0,005
Никель	0,070 – 0,079	0,006
Олово	0,110 – 0,120	0,0043 – 0,0044
Платина	0,090 – 0,100	0,0025 – 0,0039
Сталь	0,103 – 0,137	0,0057 – 0,0060
Свинец	0,217 – 0,222	0,0038 – 0,0040

Рисунок 1.1 - Значения температурного коэффициента сопротивления и удельного сопротивления некоторых материалов.

### **3 Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляционных материалов**

Принципы, положенные в основу при определении диэлектрической проницаемости жидкостей, совпадают с использованными в случае газов. Симметричные структуры могут обладать лишь индуцированной поляризацией; при ассиметричных структурах наряду с этим существуют постоянные диполи, которые в жидкостях могут ориентироваться по полю. Однако в твердых телах возможность возникновения ориентационной поляризации сильно ограничена. Эти ограничения представляют несомненный интерес, так как большинство диэлектриков относятся к твердым телам.

Рассмотрим сначала два основных фактора, влияющих на увеличение диэлектрической проницаемости в жидкостях и твердых телах по сравнению с проницаемостью газов. Во-первых, высокая плотность жидкостей и твердых тел обуславливает большее число диполей в единице объема. Во-вторых, гораздо более тесное расположение томов и молекул в жидкостях и твердых телах требует учета влияния локальных полей.

#### **3.1 Локальные поля**

Так как у каждого диполя имеются положительный и отрицательный концы, создаваемое им в окружающем пространстве поле зависит от расстояния  $a$  и угла  $\theta$ . Анализ на основе методов теории поля дает следующие значения векторных составляющих поля  $E_\gamma$  и  $E_\theta$  (рис. 3.1).

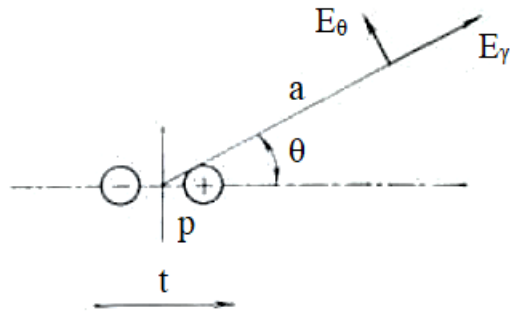


Рисунок 3.1 – Локальные поля

$$E_{\gamma} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \left( \frac{2p \cdot \cos \theta}{a^3} \right) \quad (3.1)$$

$$E_{\theta} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \left( \frac{p \cdot \sin \theta}{a^3} \right) \quad (3.2)$$

Таким образом, если диполь с моментом  $p$  ориентирован по внешнему полю  $E$ , то в точке, находящейся впереди (или сзади), будет действовать поле  $E + p/2\pi\epsilon_0 a^3$ , где  $a$  – расстояние от диполя. На атомы и молекулы, находящиеся в таких положениях по отношению к диполю будет действовать локальное поле, превышающее приложенное внешнее поле, поэтому они будут испытывать более значительную поляризацию, чем при воздействии только внешнего поля. Если все диполи расположены на одной прямой, то локальное поле каждого диполя образовавшейся цепочки составило бы

$$E_{\text{лок}} = E + \left( \frac{1,2}{\pi} \right) \frac{p}{\epsilon_0} \quad (3.3)$$

При более реальном трехмерном расположении диполей с координатным числом 8, например, в случае о.ц.к. структуры, локальное поле, называемое также полем Лоренца, определяется отношением

$$E_{\text{лок}} = E + \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{p}{\varepsilon_0} \right) \quad (3.4)$$

Так, как это последнее соотношение применимо для всех конденсированных фаз, то его можно рассматривать как носящее общий характер.

Поляризация в твердых телах и жидкостях теперь должна определяться с учетом локального поля:

$$P = N \cdot \alpha \cdot E_{\text{лок}} \quad (3.5)$$

Из уравнений (3.4) и (3.5) находим:

$$P = \frac{N \cdot \alpha \cdot E}{1 - N\alpha / 3\varepsilon_0} = \varepsilon_0 (k - 1) E \quad (3.6)$$

Таким образом, диэлектрическая проницаемость является функцией плотности (с которой она связана через  $N$ ) и поляризуемости:

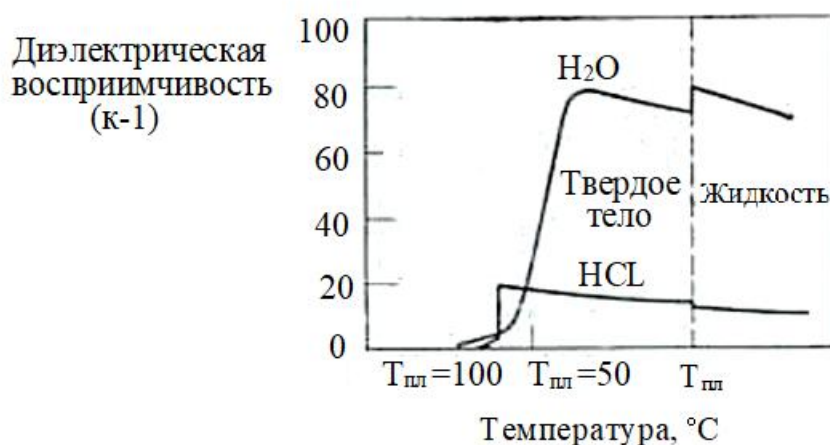
$$k = 1 + N\alpha / (\varepsilon_0 - N\alpha / 3) \quad (3.7)$$

### 3.2 Температурная зависимость диэлектрической проницаемости

Общий характер зависимости диэлектрической восприимчивости  $k-1$ , а следовательно, и диэлектрической проницаемости  $k$ , от температуры представлена на рис. 3.2 а (постоянный диполь этой большой молекулы в твердом нитробензоле не может столь легко реагировать на приложенное внешнее поле, как в жидком нитробензоле).



а



б

Рисунок 3.2 – Зависимость диэлектрической восприимчивости от температуры: а – нитробензол; б – вода и HCl

В случае жидкостей диэлектрическая проницаемость возрастает по мере уменьшения температуры до  $T_{пл}$ , при которой ориентационная поляризация оказывается невозможной. Основными исключениями являются HCl и H<sub>2</sub>O (рис 3.2 б (Эти небольшие молекулы могут изменять свою ориентировку и в твердом теле при температуре ниже температуры плавления, создавая тем самым дипольный момент. Однако при ещё более низкой температуре такая переориентировка становится невозможной.)) Даже после затвердевания этих веществ входящие в состав молекул атомы водорода, проще говоря протоны, способны ориентироваться по направлению поля. В результате диэлектрические проницаемости этих твердых тел после скачка, связанного с изменением объема при затвердевании продолжают увенчиваться до тех пор, пока понижении температуры не сделает невозможными любые смещения атомов водорода.

### **3.3 Аморфные твердые тела**

Эти материалы требуют особого рассмотрения, и интерес к ним связан с тем обстоятельством, что стекла и многие изоляционные пластмассы имеют аморфную структуру. В области температуры, превышающей температуру стеклования, атомы и молекулы обладают ограниченной подвижностью, поэтому возможно возникновение ориентационной поляризации (рис 3.3). Поскольку многие пластики в области ниже температуры плавления по меньшей мере частично находятся в аморфном состоянии, повышения температуры сопровождается увеличением диэлектрической проницаемости. Постоянные диполи легче поляризуются при повышенной температуре.



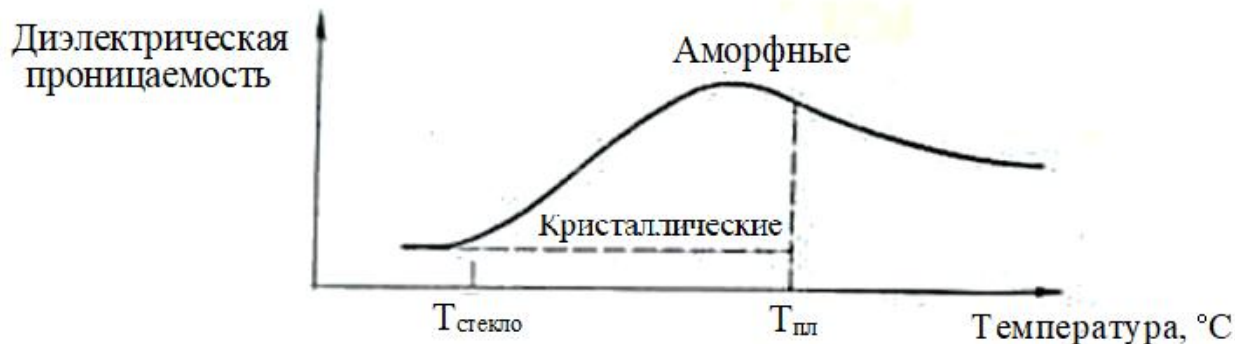
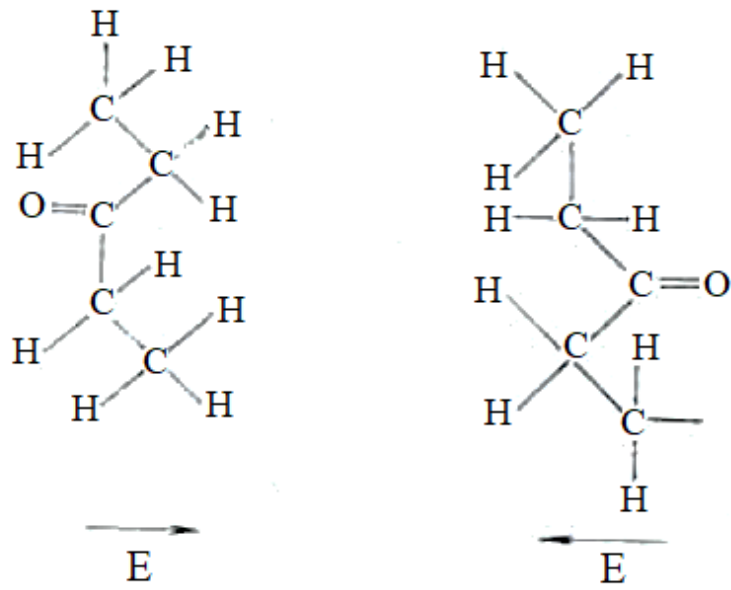
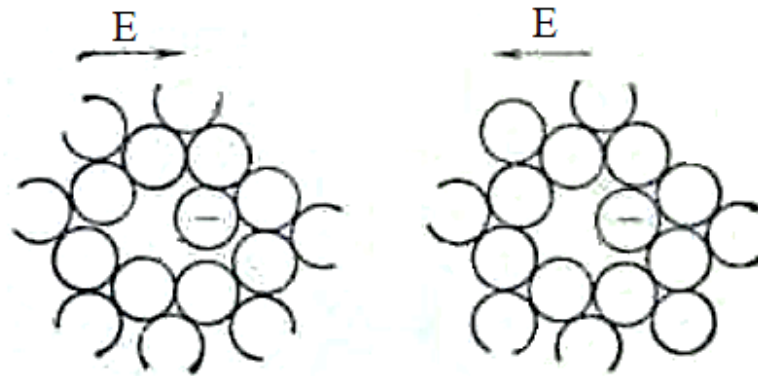


Рисунок 3.3 – Диэлектрическая постоянная полимеров

Реальный механизм поляризации основывается на смещениях полярных участков молекулы – в пластиках (рис 3.4 а) – или на неупругих переносках ионов в стеклах (рис 3.4 б). Поскольку в некристаллических материалах участки, несущие заряд, никогда не бывают идентичными, то диэлектрическая проницаемость изменяется в некотором интервале температуры, а не претерпевает скачка при какой-то определенной температуре.



а



б

а – полимер;

б – стекло

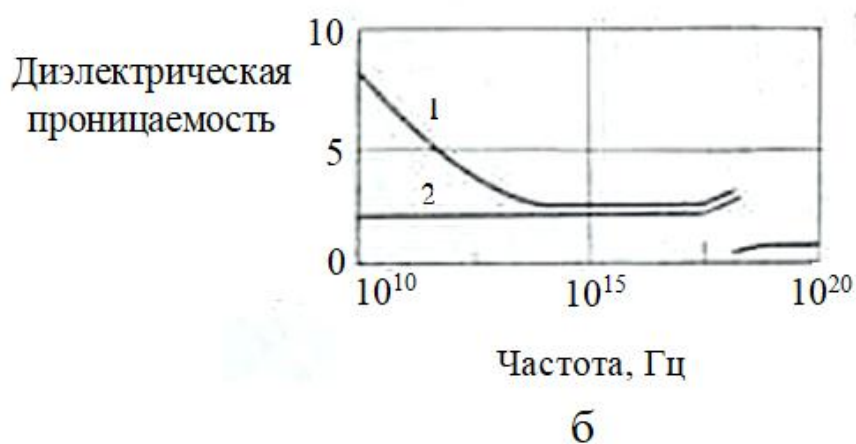
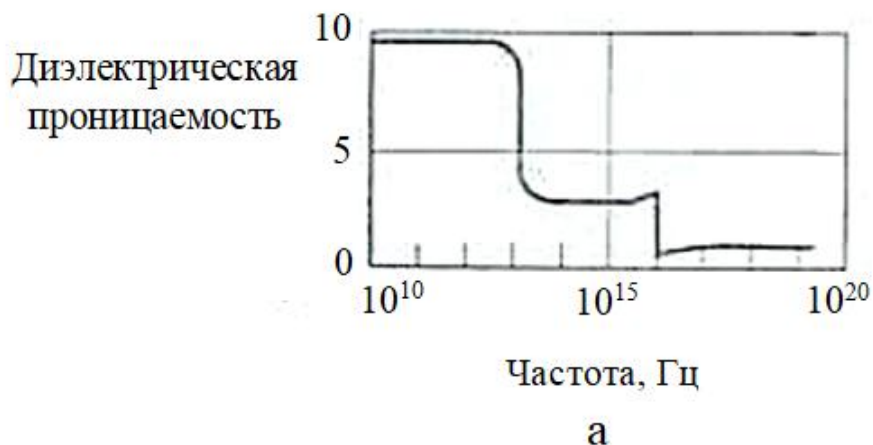
Рисунок 3.4 – Ориентировка диполей в твердых телах

### 3.4 Частотная зависимость диэлектрической проницаемости

Рассмотрев, как зависит диэлектрическая проницаемость от частоты, можно заметить, что основные типы поляризации, возникающие в различных веществах, будут учтены и приняты при определении общей зависимости.

Зависимость от частоты не будет прослеживаться в том случае, когда период колебания электрического поля не будет значительным в сравнении со временем релаксации (значит сама поляризация успеет за полем), что приведет к процессу идентичному, как и в постоянном поле.

На рисунке 3.5 а представлена зависимость диэлектрической проницаемости MgO от частоты поля. Прежде всего обращает на себя внимание ступенчатый характер изменения диэлектрической проницаемости. При частоте выше  $10^{13}$  Гц, нормальной частоте колебаний атомов, возможна лишь электронная поляризация. Наконец, при частоте выше  $10^{16}$  гц, нормальной частоте колебаний электронов вокруг атомов, поляризация спадает до нуля. Аналогичные кривые для поливинилхлорида и политетрафторэтилена приведены на рисунке 3.5 б. Различие между этими двумя кривыми в области более низких частот объясняется присутствием постоянного диполя в мономере  $C_2H_3Cl$ , вызывающего ориентационную поляризацию.



а – MgO;

б – поливинилхлорид (1) и политетрафторэтилен (2).

Рисунок 3.5 – Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты

Электронная поляризация не возникает при частоте более  $10^{16}$  Гц.

Одновременное воздействие изменений температуры и частоту на диэлектрическую проницаемость (рисунок 3.6) может быть легко объяснено в свете того обстоятельства, что при низкой температуре поляризация происходит относительно медленно из-за затрудненного движения атомов и молекул в процессе смещения заряда. В результате изменение ориентировки не может следовать в такт с частотой изменений электрического поля.

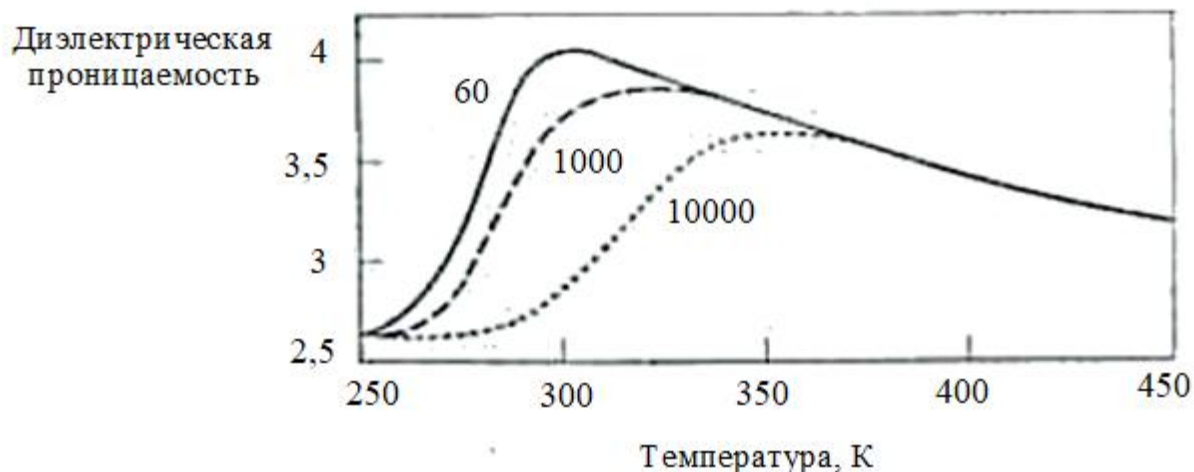


Рисунок 3.6 – Влияние температуры и частоты на диэлектрическую проницаемость (каучук с 12 вес % серы)

### 3.5 Диэлектрические потери

Обычно поляризуемость материала в электрическом поле рассматривается как обратимый процесс. Однако обратимость поляризации требует достаточно большого промежутка времени, в течение которого электроны, атомы и диполи должны успеть совершить необходимые перемещения. Кроме того, так как для поляризации необходимо определенное время, то приближение периода изменений поля к длительности процесса поляризации вызовет появление потерь энергии.

Рассмотрим этот вопрос подробнее. Представим себе приложенное электрическое поле:

$$E = E_{\max} \cdot \sin \omega t, \quad (3.8)$$

где  $E$  – электрическое поле в момент времени  $t$ ;

$E_{max}$  – максимальное поле и  $\omega$  – угловая частота изменения поля.

В отсутствие запаздывания процессов электрическая индукция  $D$  должна изменяться в фазе с полем:

$$D = D_{max} \cdot \sin \omega t, \quad (3.9)$$

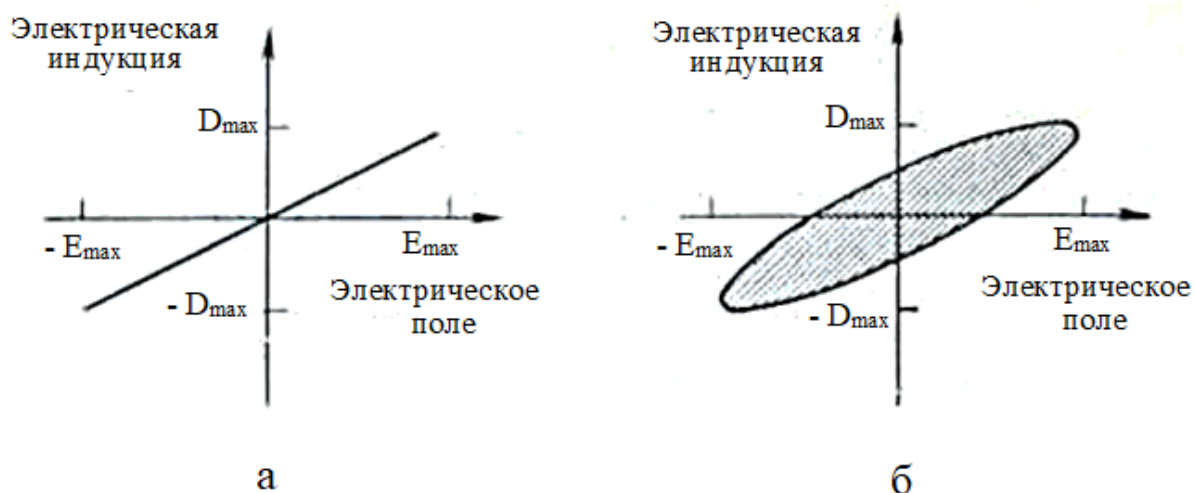
и тогда будем иметь случай, представленный на рисунке 3.7, а.

Однако в результате запаздывания поляризация электрическая индукция будет изменяться в фазе с полем:

$$D = D_{max} \cdot \sin(\omega t - \delta), \quad (3.10)$$

В этой формуле  $\delta$  обозначает *угол потерь*. Максимальные значения поля и поляризации уже не совпадают во времени, как это можно видеть из рисунка 3.7, б, где изображена петля гистерезиса.

Кроме того, для создания нулевой поляризации необходимо коэрцитивное поле.



а – потери отсутствуют, б – большие потери

Рисунок 3.7 – Циклические изменения поля и электрической индукции

Потери энергии за один цикл  $\Delta U$  равны площади петли гистерезиса и могут быть найдены с учетом уравнения (10) и дифференциала уравнения (3.8)

$$\Delta U = \int_0^{2\pi} D dE = \int_0^{2\pi} D_{\max} E_{\max} \cdot \cos \omega t \cdot \sin(\omega t - \delta) d(\omega t) = \pi \cdot E_{\max} D_{\max} \sin \delta \quad (3.11)$$

Получаем:

$$\Delta U = \pi \cdot E_{\max}^2 \varepsilon_0 k \sin \delta \quad (3.12)$$

Электротехники обычно рассматривают потери мощности в электрических установках вместо подсчета относительной потери энергии, как при затухании. Эта потеря мощности представляет собой потери энергии в единице объема и равна правой части уравнения (12), умноженной на частоту  $\omega/2\pi$ :

$$Q = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot E_{\max}^2 \epsilon_0 \cdot k \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (3.13)$$

где  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс потерь (или коэффициент рассеяния);  
 $k \operatorname{tg} \delta$  – коэффициент потерь.

Замена  $\sin \delta$  на  $\operatorname{tg} \delta$  в уравнении (3.13) вполне допустима, так как все используемые в высокочастотной технике материалы должны иметь малый угол диэлектрических потерь. Введение  $\operatorname{tg} \delta$  позволяет разделить диэлектрическую проницаемость на две составляющие  $k'$ , совпадающую по фазе с электрическим полем, и  $k''$ , отстающую на четверть периода от этого поля (рисунок 3.8):

$$\operatorname{tg} \delta = k'' / k' \quad (3.14)$$

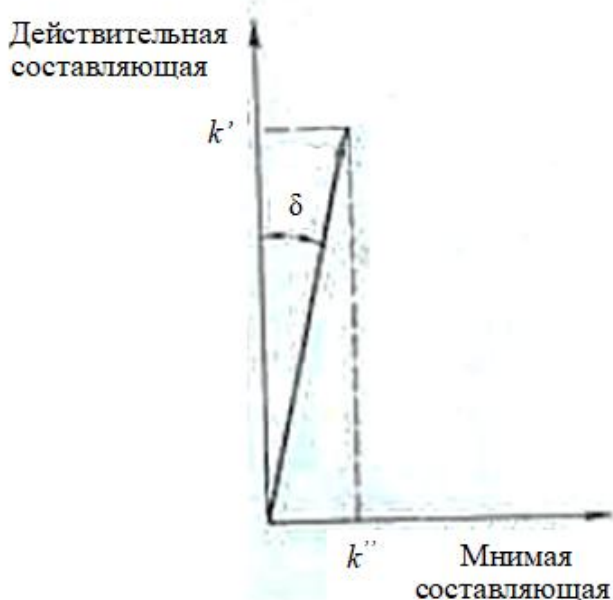


Рисунок 3.8 – Тангенс угла потерь.



Отстающая по фазе составляющая позволяет найти зависимость потерь мощности от частоты. С этой целью воспользуемся известным из физики твердого тела соотношением:

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{1 + i \cdot \omega \tau} \quad (3.15)$$

где  $\alpha_0$  – комплексная поляризуемость в переменных полях;

$\omega$  – угловая частота;

$\tau$  – постоянная времени диэлектрической релаксации.

$i$  – мнимая часть, равная  $\sqrt{-1}$

Так как  $P = N\alpha E_{лок} = \epsilon_0(k-1)E_{лок}$

$$\text{то } k - 1 = \frac{N\alpha_0 / \epsilon_0}{1 + i\omega\tau} \cdot \frac{1 - i\omega\tau}{1 - i\omega\tau};$$

тогда

$$k = 1 + \frac{N\alpha_0 / \epsilon_0}{1 + \omega^2\tau^2} - i \frac{N\alpha_0\omega\tau / \epsilon_0}{1 + \omega^2\tau^2}; \quad (3.16)$$

Таким образом,

$$k = k' - i \cdot k'' \quad (3.17)$$

Рассмотрим три особых случая.

1. Низкие частоты:  $\omega \ll \omega_0$  и  $\omega\tau \rightarrow 0$ . Поэтому  $k'' \rightarrow 0$  и

$$k' = (1 + N\alpha_0 / \epsilon_0) \approx k$$

Так как мнимая составляющая уменьшается до нуля, то так же изменяются  $\operatorname{tg} \delta$  и коэффициент потерь  $k \operatorname{tg} \delta$ . Следовательно, потери энергии пренебрежимо малы.

2. Высокие частоты:  $\omega \gg \omega_0$  и  $\omega\tau \rightarrow \infty$ . Поэтому  $k' \rightarrow 1$  и  $k'' \rightarrow 0$ . В этом случае вновь  $k''/k'$ , а также коэффициент потерь  $k \operatorname{tg} \delta$  близки к нулю.

3. Частоты, близкие к резонансной:  $\omega \approx \omega_0$  и  $\omega\tau \rightarrow 1$ . Дифференцируя мнимую часть уравнения (3.16), получаем, что  $k''$  принимает максимальное значение при  $\omega\tau = 1$ . Следовательно, при этой частоте потери энергии будут наибольшими.

График зависимости составляющих  $k'$  и  $k''$  от частоты приведен на рисунке 3.9. Предельная частота для каждого типа поляризации определяется совпадением с частотой нормальных колебаний. При этих частотах возрастает составляющая  $k''$ , и поэтому происходит поглощение энергии.

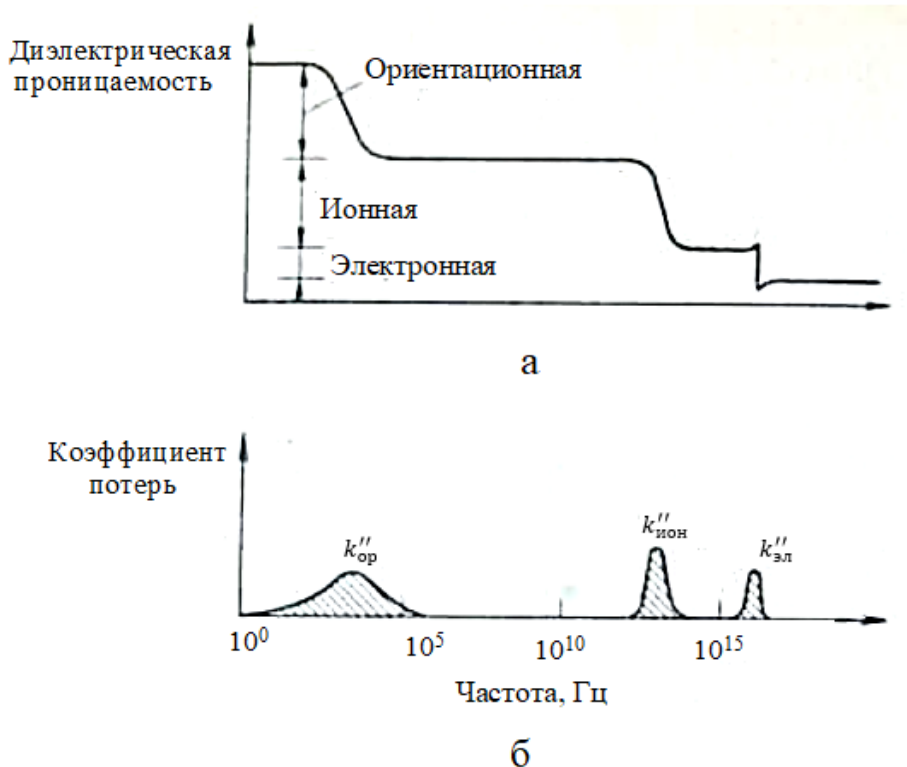


Рисунок 3.9 – Зависимость диэлектрической проницаемости (а) и коэффициента потерь (б) от частоты поля.

## 4 Снятие петли гистерезиса и построение кривой намагничивания

Электрическое поле с напряженностью  $E$  создает электрическую индукцию  $D$ . А магнитное поле с напряженностью  $H$  создает магнитную индукцию  $B$ . В вакууме магнитная индукция связана с напряженностью магнитного поля через магнитную проницаемость.

$$\mu_0 = B / H \quad (4.1)$$

В рационализированной системе МКС величина  $\mu_0$  выражается в других единицах по сравнению с диэлектрической проницаемостью, что связано с разными единицами измерения для магнитного и электрического полей. Для единиц измерения системы МКС уравнение (4.1) принимает вид:

$$(v \cdot \text{сек}) / (a \cdot m) = (v \cdot \text{сек} / m^2) / (a / m) \quad (4.2)$$

Или так как  $гн = ом \cdot \text{сек}$  и  $вб = v \cdot \text{сек}$ ,

$$гн / м = (вб / m^2) / (a / m) \quad (4.3)$$

В единицах МКС величина  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} гн / м$

## 4.1 Намагничивание

Магнитная индукция в материале отличается от магнитной индукции, возникающей в вакууме. Как и в случае с диэлектрической проницаемостью, удобнее использовать относительные единицы магнитной проницаемости для сравнения поведения твердых тел в магнитном поле:

$$B = \mu_0 \mu H \quad (4.4)$$

где  $\mu$  - относительная проницаемость.

Относительная проницаемость вакуума равна 1,0. В случае парамагнитных материалов она несколько больше единицы, а для диамагнитных материалов – несколько меньше единицы. Однако некоторые материалы обладают очень высокой проницаемостью. Такие «магнитные» материалы играют важную роль в технике.

Для материаловедов особый интерес представляет составляющая магнитной индукции, вызванная присутствием материала. Установление прямой аналогии между составляющими электрической и магнитной индукции затруднительно, поскольку в каждом случае необходим особый подход. При использовании системы единиц МКС магнитная индукция, создаваемая в присутствии материала, списывается соотношением

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (4.5)$$

На рисунке 4.1  $M$ - намагниченность, выражается в тех же единицах, что и  $H$  (а/м).



Рисунок 4.1 – зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля.

Таким же образом, из уравнения (4.4) получаем

$$M = (\mu_r - 1)H. \quad (4.6.a)$$

Магнитная восприимчивость  $\chi_m$  связана с другими характеристиками соотношением

$$\chi_m = \mu_r - 1 = M / H \quad (4.6.b)$$

## 4.2 Магнитные моменты

И постоянный магнит, и соленоид с током могут быть представлены как два полюса (северный и южный), разделенные расстоянием  $l$ . Они обладают магнитным моментом  $P_m$ . В случае соленоида магнитный момент может быть выражен как произведение тока на площадь поперечного сечения,  $a \cdot m^2$ .

Поскольку намагниченность выражается в амперах на метр, её можно рассматривать как магнитный момент, отнесенный к единице объема,  $a \cdot m^2 / m^3$ . В этом смысле намагниченность соответствует диэлектрической поляризации.

Спиновый магнитный момент электрона, называемый магнетоном Бора  $\mu_B$ , будет иметь важное значение при рассмотрении намагниченности материалов.

$$\mu_B = 9.27 \cdot 10^{-24} a \cdot m^2 \quad (4.7)$$

Этот момент возникает из-за наличия спина у электронов. Магнитные моменты также возникают из-за спина нуклонов и орбитального движения электронов, однако они дают лишь небольшой вклад в намагничивание большинства используемых в технике материалов.

Магнитный момент будет у атома в том случае, если количество электронов с противоположными спинами будет не равным числом, то есть не одинаковым. В итоге получаем, что атомы или ионы с неравными спинами (рисунок 4.2) будут обладать магнитным моментом, а у атомов, у которых электронная оболочка не будет иметь свободных энергетических уровней, магнитного момента не будет.

K	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	↑
Ca	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	↑↓
Se	↑	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	↑↓
Ti	↑	↑	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	↑↓
V	↑	↑	↑	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	↑↓
Cr	↑	↑	↑	↑	↑	<input type="checkbox"/>	↑
Mn	↑	↑	↑	↑	↑	<input type="checkbox"/>	↑↓
Fe	↑↓	↑	↑	↑	↑	<input type="checkbox"/>	↑↓
Co	↑↓	↑↓	↑	↑	↑	<input type="checkbox"/>	↑↓
Ni	↑↓	↑↓	↑↓	↑	↑	<input type="checkbox"/>	↑↓
Cu	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	<input type="checkbox"/>	↑
Zn	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	<input type="checkbox"/>	↑↓

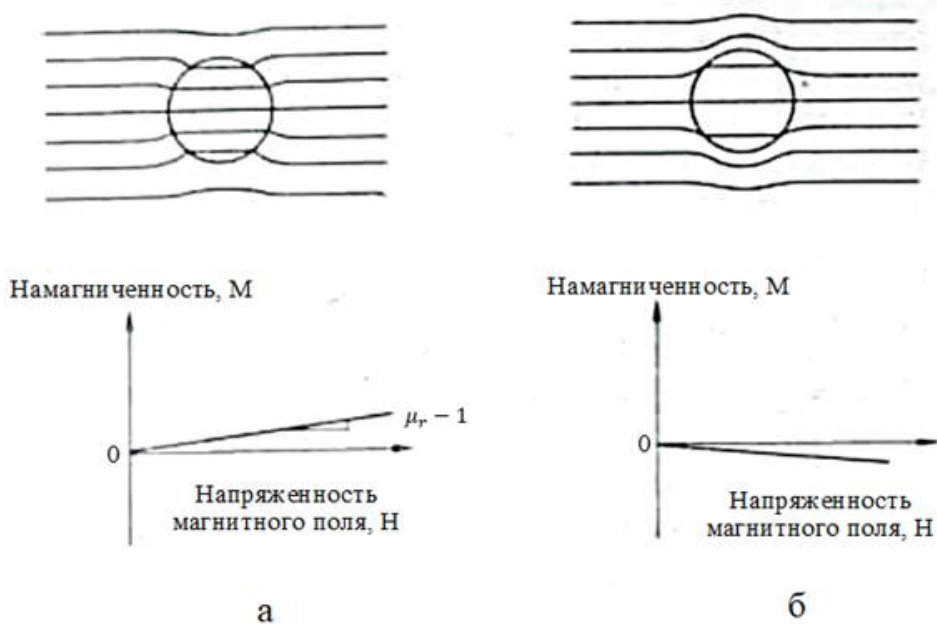
Рисунок 4.2 – Расположение спинов.

### 4.3 Ферромагнетизм.

Есть вероятность, что железо и иные электротехнические материалы, могут иметь достаточно большую намагниченность, обладая значительными характеристиками проницаемости и магнитной индукции. Для того чтобы объективно сравнивать эти параметры, необходимо привести пределы измерения магнитной восприимчивости  $\mu_r - 1$ .

Стоит отметить, что значительное значение магнитной восприимчивости у ферромагнитных материалов будет сводиться к нулю с

преодолением температуры Кюри, тогда мы будем иметь картину, что эти материалы станут парамагнитными.



- а – парамагнетизм (так как парамагнитный материал имеет положительные восприимчивость и намагниченность, индукция концентрируется в самом материале);
- б – диамагнетизм (восприимчивость и намагниченность отрицательны).

Рисунок 3.3 – Магнитная индукция и намагниченность.



#### 4.4 Ферромагнитные свойства

Атомы, у которых магнитный момент равен нескольким магнетонам Бора и мал радиус 3d-оболочки, могут образовывать связи, под действием которых их магнитные моменты самопроизвольно (спонтанно) ориентируются в одном направлении, в результате чего возникают магнитные домены. Из числа металлов с такой спонтанной ориентировкой магнитных моментов наиболее известны Fe, Ni и Co.

Каждый домен играет роль самостоятельного магнита размером от микрона до миллиметра (рисунок 4.4). В чистом железе и других магнитно-мягких материалов в отсутствие внешнего магнитного поля все домены ориентированы хаотично по всем направлениям. Таким образом, намагниченность никак не проявляется. Однако в постоянном магните преобладает число доменов с определенной ориентировкой, что дает отчетливо выраженную результирующую намагниченность.

Стрелками на рисунке 4.4 указаны направления намагниченности в каждом домене.

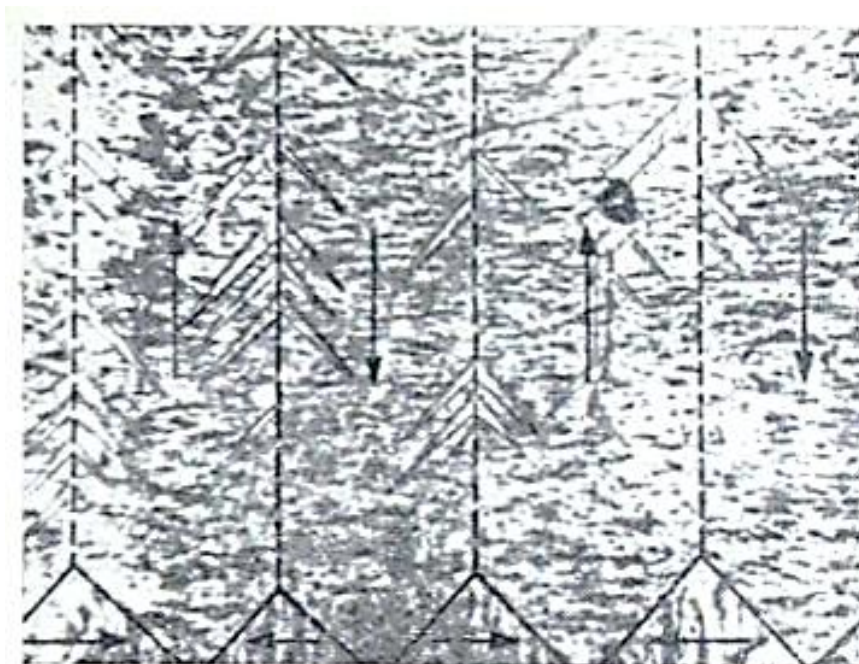


Рисунок 4.4 – Ферромагнитные домены (монокристалл железа)

#### 4.5 Петля гистерезиса

В случае приложенного внешнего магнитного поля результирующая намагниченность твердого ферромагнетика может возрастать, начиная с нулевой магнитной индукции. Благоприятно ориентированные относительно поля домены начинают увеличивать свои размеры за счет подстройки других доменов с близкой ориентацией в результате переориентировки электрических спинов у атома, расположенных рядом со стенками доменов. Во время этого роста происходит быстрое увеличение магнитной индукции (кривая ОАС на рисунке 4.5) до тех пор, пока большинство доменов не примут благоприятную ориентировку, что соответствует насыщению на кривой изменения магнитной индукции. Дальнейшее увеличение напряженности магнитного поля может лишь незначительно повысить магнитную индукцию за счет более строгой ориентировки доменов по направлению поля.

В случае постоянного магнита индукция не исчезает при снятии приложенного поля, а сохраняется остаточная индукция  $B_{\text{ост}}$ . Для компенсации влияния доменов и достижения нулевой индукции должно быть приложенное размагничивающее поле, равное коэрцитивной силе  $H_c$ . Циклические изменения поля вызывают появление петли гистерезиса, представляющей собой замкнутую кривую зависимости  $B$  от  $H$ . Энергия, расходуемая в течении одного цикла, равна площади петли гистерезиса.

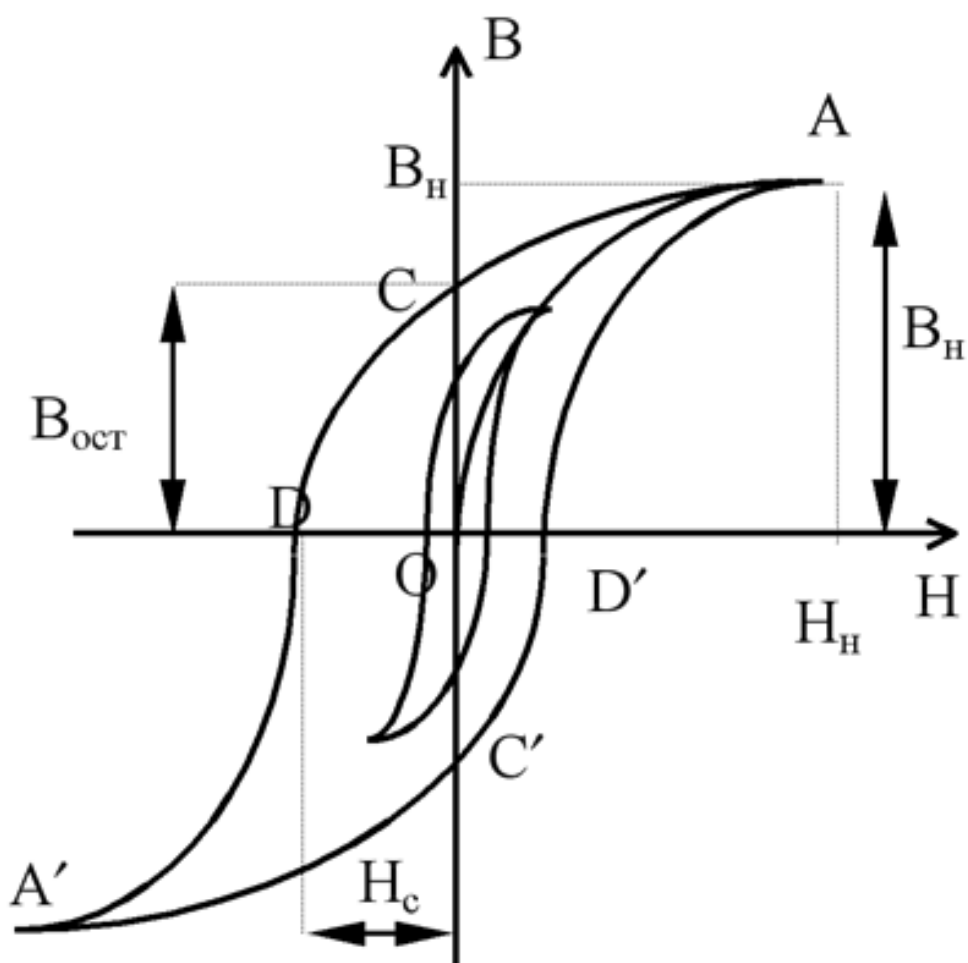


Рисунок 4.5 – Петля гистерезиса ферромагнетика (магнитно-жесткий материал).

#### 4.6 Магнитно-мягкие и магнитно-жесткие материалы.

В магнитно-мягких материалах остаточная индукция чрезвычайно низка. Другими словами, постоянная времени релаксации намагниченность очень мала, следовательно, размагничивание успевает происходить за время той части цикла, в течении которой напряженность поля снижается до нуля. В противоположность этому постоянная времени релаксации у качественных магнитно-жестких материалов при отсутствии поля бесконечно велика, т.е. с течением времени остаточная индукция не уменьшается. Кроме того, для материалов постоянных магнитов коэрцитивная сила, вызывающая размагничивание, также должна быть велика. Стабильность магнита может быть выражена через величину магнитной энергии, необходимой для размагничивания. Для этого либо используют площадь второго квадранта петли гистерезиса (рис 3.6.а), либо находят максимальное энергетическое произведение  $BH_{\max}$  для точек кривой, расположенных в этом квадранте. (рис 3.6.б)

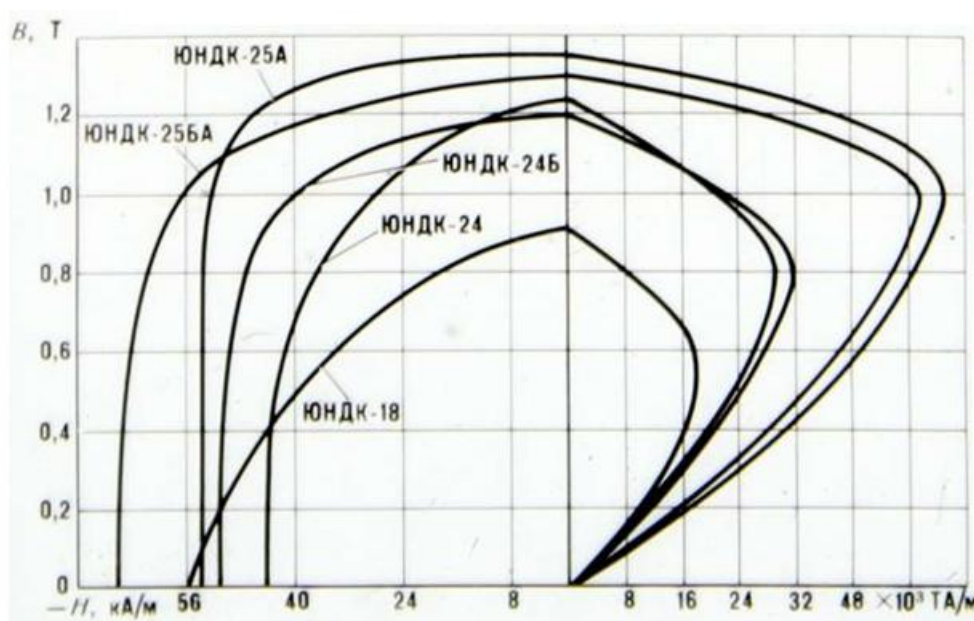


Рисунок 4.6 – Кривые размагничивания

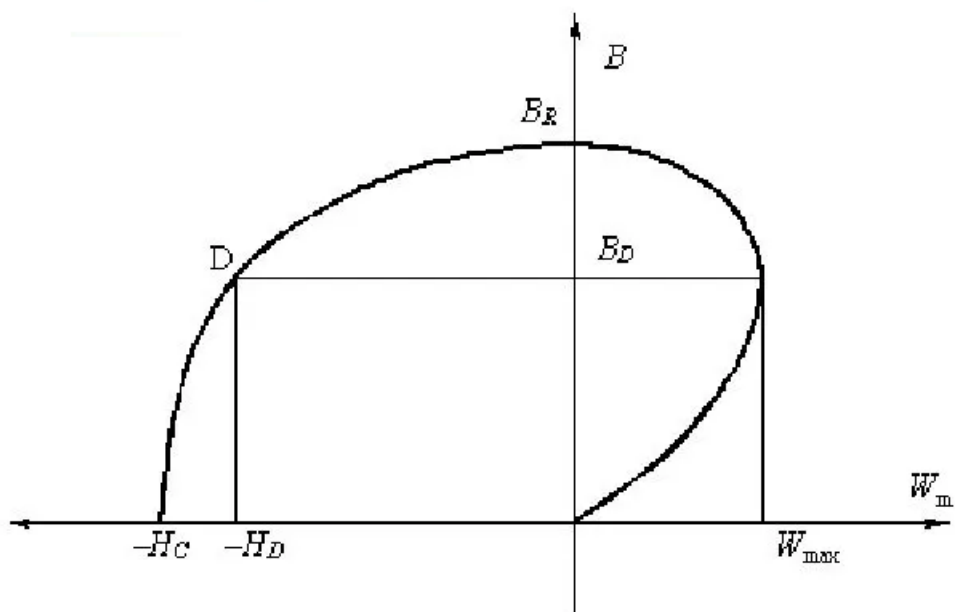


Рисунок 4.7 – Кривая размагничивания (произведение  $BH_{\max}$ ).

Все факторы, затрудняющие движение стенок доменов, будут увеличивать стабильность постоянного магнита. Возможно, что при этом наиболее важную роль играет присутствие небольших частиц немагнитных примесей или включений. Для того чтобы стенка домена преодолела включение, требуется затраты определенной энергии (рисунок 4.8). Это связано с двумя причинами: 1) включение приводит к исчезновению части стенки домена, обладающей высокой энергией, поэтому необходима затрата энергии для восстановления этой стенки после прохождения включения, и 2) магнитная энергия в поперечном сечении включения оказывается меньшей, если включение располагается на стенке домена, так как при этом уменьшается расстояние между полюсами. На основании этого в материалы для постоянных магнитов вводят мелкие частицы второй фазы.

На движение стенок доменов также влияют несовершенства кристаллической решетки. Особенно эффективной в этом отношении оказывается сетка дислокаций. Поэтому металл в состоянии после холодной

обработки обладает большей магнитной стабильностью, чем металл, подвергнутый отжигу. В сущности, именно это обстоятельство послужило причиной использования терминов «магнитно-мягкий» и «магнитно-жесткий» при оценке стабильности металлов.

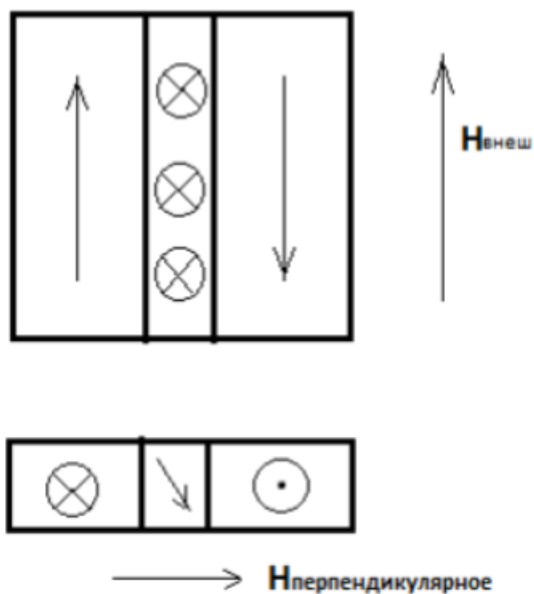


Рисунок 4.8 – Движение стенок домена

К числу наиболее важных показателей качества постоянных магнитов относится: остаточная индукция  $B_{ост}$ , коэрцитивная сила  $H_c$ , максимальное энергетическое произведение  $BH_{max}$ . Типичные характеристики для некоторых материалов приведены в таблице 4.1. Сведения о свойствах магнитно-мягких материалов содержится в таблице 4.2.

Таблица 4.1 – Свойства магнитно-жестких материалов

Магнитный материал	Остаточная индукция, $B_{ост}$ , вб/м <sup>2</sup>	Коэрцитивная сила – $H_{коэрц}$ , а/м	Максимальное энергетическое произведение $BH_{max}$ , дж/м <sup>2</sup>
Углеродистая сталь	1,0	4000	1000
Алнико V	1,2	55 000	34 000
Ферит бария (BaFe <sub>12</sub> O <sub>19</sub> )	0,4	150 000	20 000

Таблица 4.2 – Свойства магнитно-мягких материалов

Магнитный материал	Индукция насыщения, $B_{нас}$ , вб/м <sup>2</sup>	Коэрцитивное поле – $H_{коэрц}$ , а/м	Максимальная относительная проницаемость $\mu_r$ (max)
Чистое железо (о.ц.к)	2,2	80	5000
Кремнистое железо, трансформаторная сталь(ориент.)	2,0	40	15 000
Пермаллой (Ni-Fe)	1,6	10	2000
Суперпермаллой (Ni-Fe-Mo)	0,2	0,2	100 000
Ферроксиб А [(Mn, Zn) Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ]	0,4	30	1200
Ферроксиб В [(Mn, Zn) Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ]	0,3	30	700

## 4.7 Фотоэффект. Виды фотоэффекта

Гипотеза Планка, которая объясняла задачу излучения абсолютно черного тела получила свое развитие при объяснении фотоэффекта. Явление фотоэффекта было открыто Планком в 1887 году, во время того как Планк, облучая ультрафиолетом электроды под напряжением, наблюдал ускорение процесса заряда. Как будет выяснено далее, это происходило вследствие того, что при облучении появляются свободные электроны.

Различают три вида фотоэффекта (рис. 4.9).

В 1888-1890 годах А.Г. Столетов провел систематическое исследование внешнего фотоэффекта. Облучая электрод излучением с различными длинами волн (рисунок 4.10).

Столетов установил свойства фотоэффекта:

Под действием излучение вещество способно терять только отрицательные заряды;

Самым эффективным является излучение в ультрафиолетовом спектре;

Фотоэффект происходит практически мгновенно (время между воздействием излучение и началом разрядки ничтожно мало).



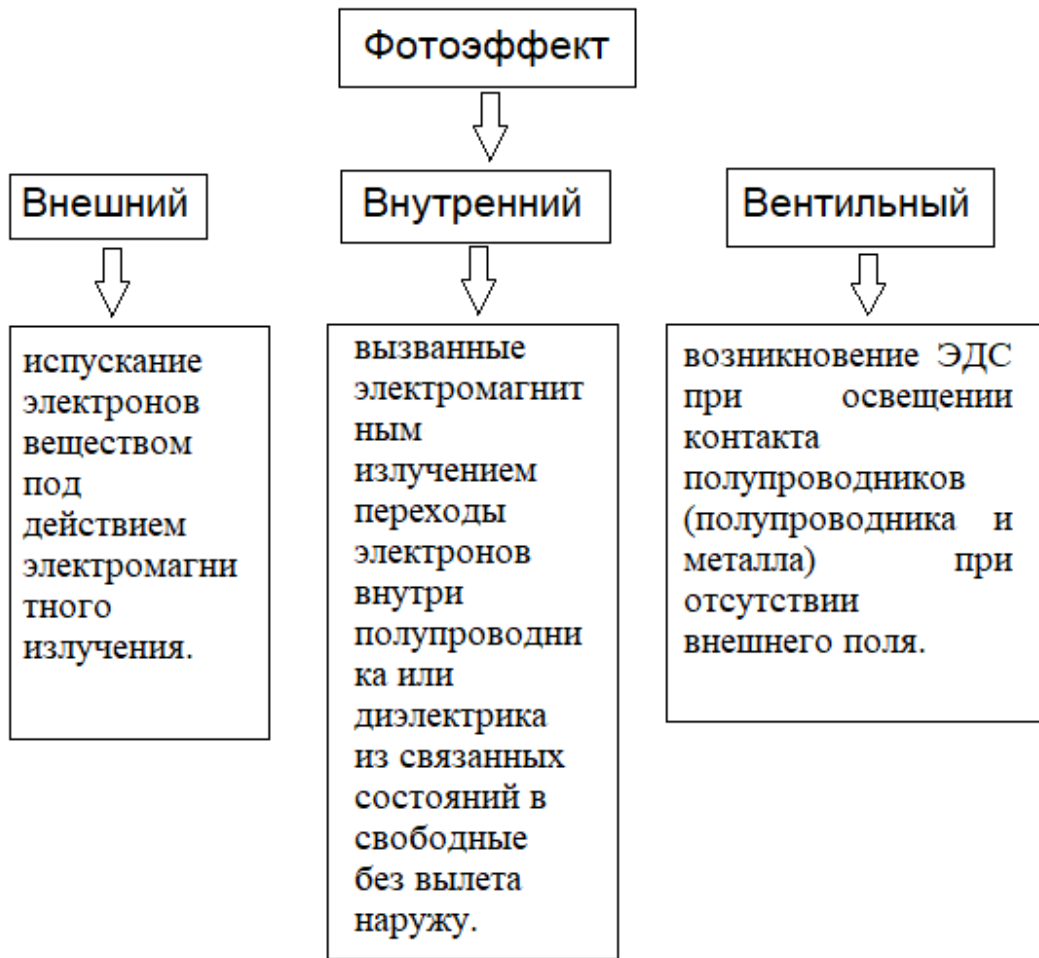


Рисунок 4.9 – Виды фотоэффекта

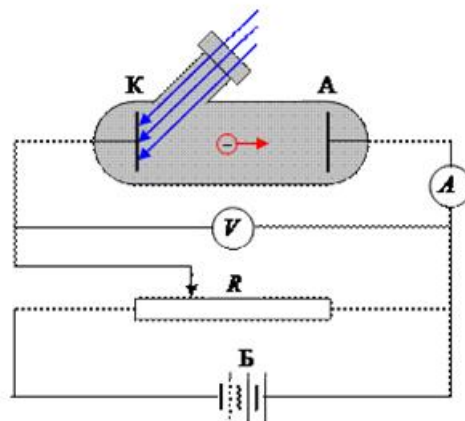


Рисунок 4.10 – Схема вентильного фотоэлемента

#### 4.1 Барьерный фотоэффект. Общая схема вентильного фотоэлемента

Вентильный фотоэффект или по-другому фотоэффект в запирающем слое заключается в возникновении разности потенциалов рядом с контактом металл-полупроводник, либо же вблизи контакта между полупроводниками р- и n- типов.

Общая схема вентильного фотоэлемента представлена на рисунке 4.11.

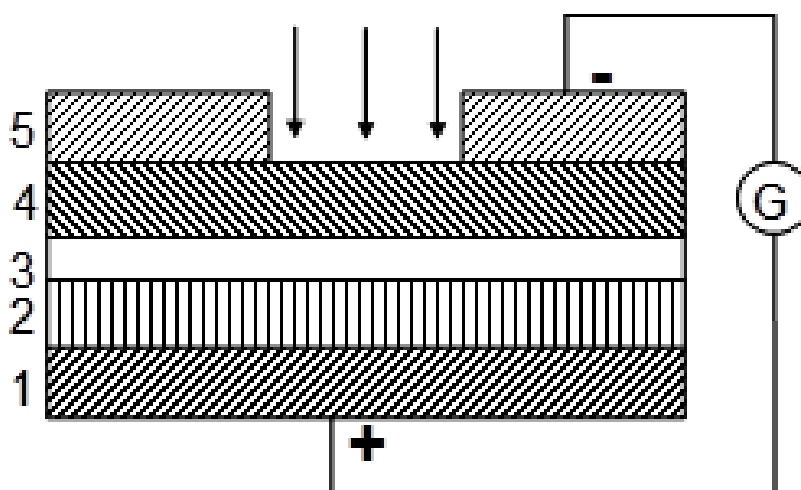


Рисунок 4.11 – Схема вентильного фотоэлемента

На металлический электрод 1 нанесен слой полупроводника 2, покрытый тонким полупрозрачным слоем золота 4, к нему плотно прижато металлическое кольцо 5, служащее электродом. Между полупроводником и слоем золота возникает промежуточный слой 3, который обладает свойством пропускать электроны только в одном направлении – от полупроводника к золоту.

Если осветить р-п переход светом, в области контакта двух полупроводников (или золота и полупроводника) возникают дополнительные

носители заряда (электроны в р-области и дырки в n-области), которые достаточно легко проходят через переход. В результате в р-области образуется избыточный положительный заряд, а в n-области – избыточный отрицательный. Возникающая на контактах этих полупроводников разность потенциалов при поглощении в нем квантов электромагнитного излучения называется фотоэлектродвижущей силой (фото-ЭДС). Если такой образец включить в замкнутую цепь, возникнет электрический ток, который называется фототоком. Если такой образец включить электрическую цепь, то в такой, замкнутой цепи начнет протекать ток, который называется фототоком. Величина фото-ЭДС будет пропорциональна излучению попадающему на кристалл. На явлении барьерного фотоэффекта основано действие солнечных батарей. Они представляют собой от нескольких десятков до нескольких сотен тысяч элементов из кремниевых р-n - переходов, соединенных последовательно. Солнечные батареи преобразуют световую энергию непосредственно в электрическую.

## **4.2 Характеристики фотодиода.**

В общем случае (при любой полярности  $U$ ) ток фотодиода описывается выражением (1). Это выражение является уравнением семейства вольтамперных характеристик фотодиода. Графики вольтамперных характеристик приведены на рисунке 4.12.

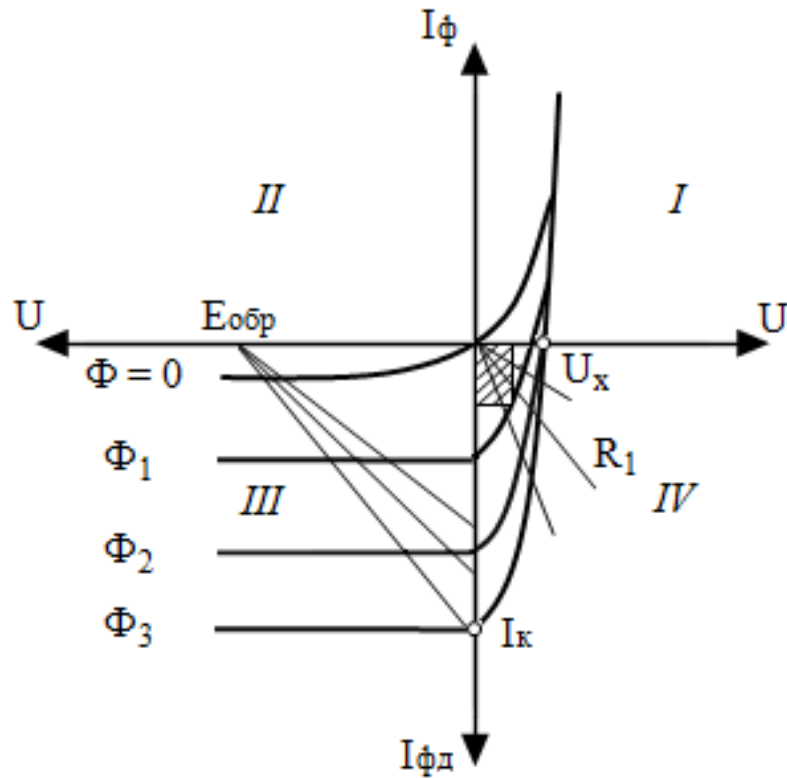


Рисунок 4.12 – Вольтамперная характеристика фотодиода

$$I_s \cdot \exp\left(\frac{qU}{kT} - 1\right) - I_F = I \quad (4.8)$$

$$E_{обр} - I_\phi \cdot R = U \quad (4.9)$$

Семейство вольтамперных характеристик фотодиода расположено в квадрантах I, III и IV. Квадрант I – это нерабочая область для фотодиода: в этом квадранте к р-п переходу прикладывается прямое напряжение и диффузионная составляющая тока полностью подавляет фототок ( $I_{p-n} \gg I_\phi$ ). Фотоуправление через диод становится невозможным.

Квадрант III – это фотодиодная область работы фотодиода. К р-п переходу прикладывается обратное напряжение. Следует подчеркнуть, что в рабочем диапазоне обратных напряжений фототок практически не зависит от обратного напряжения и сопротивления нагрузки. Вольтамперная

характеристика нагрузочного резистора  $R$  представляет собой прямую линию, уравнение которой имеет вид:

Квадрант IV семейства вольтамперных характеристик фотодиода соответствует фотогальваническому режиму работы фотодиода. Точки пересечения вольтамперных характеристик с осью напряжения соответствуют значениям фото-ЭДС или напряжения холостого хода  $U_{хх}$  ( $R_n = \infty$ ) при разных потоках  $\Phi$ . Точки пересечения вольтамперных характеристик с осью токов соответствуют значениям токов короткого замыкания  $I_{кз}$  ( $R_n = 0$ ). Промежуточные значения сопротивления нагрузки определяются линиями нагрузки, которые для разных значений  $R_n$  выходят из начала координат под разным углом. При заданном значении тока по вольтамперным характеристикам фотодиода можно выбрать оптимальный режим работы фотодиода в фотогальваническом режиме. Под оптимальным режимом в данном случае понимают выбор такого сопротивления нагрузки, при котором в  $R_n$  будет передаваться наибольшая электрическая мощность.

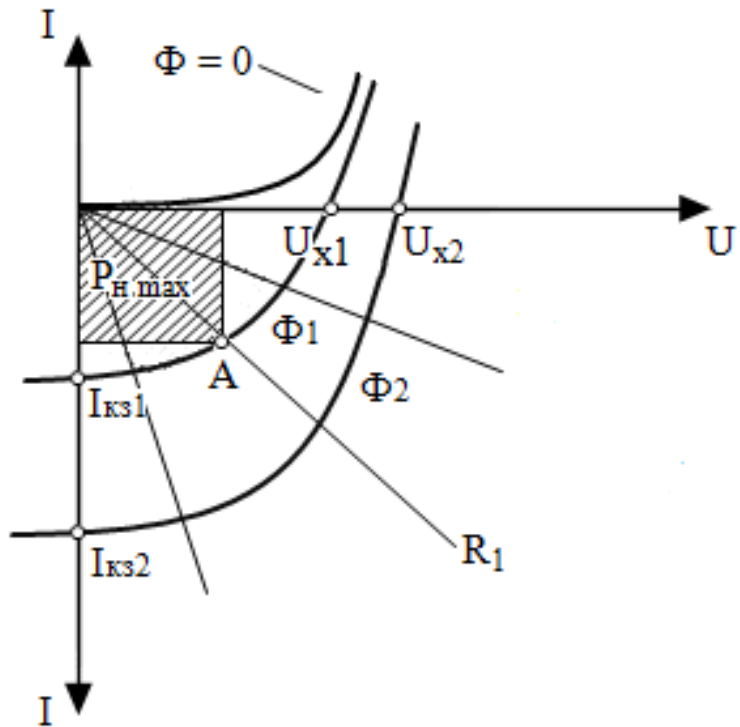


Рисунок 4.13 – Вольтамперная характеристика фотодиода в фотогальваническом режиме

Световые (энергетические) характеристики фотодиода – это зависимость тока от светового потока  $I = f(\Phi)$ .

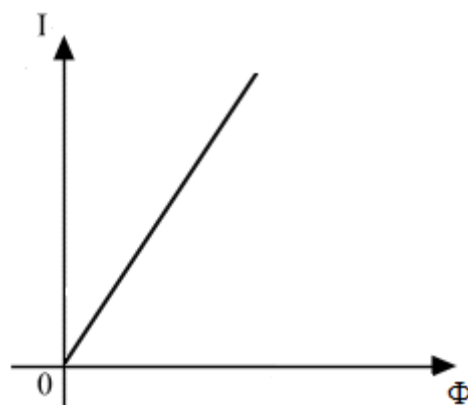


Рисунок 4.14 – Световая характеристика фотодиод

В фотодиодном режиме энергетическая характеристика в рабочем диапазоне потоков излучений линейна.

Это говорит о том, что практически все фотоносители доходят до р-п перехода и принимают участие в образовании фототока, потери неосновных носителей на рекомбинацию не зависят от потока излучения.

В фотогальваническом режиме энергетические характеристики представляются зависимостями либо тока короткого замыкания  $I_{кз}$ , либо фото-ЭДС  $E_{\phi}$  от потока излучения  $\Phi$ . При больших потоках  $\Phi$  закон изменения этих зависимостей существенно отклоняется от линейного (рисунок 4.15).

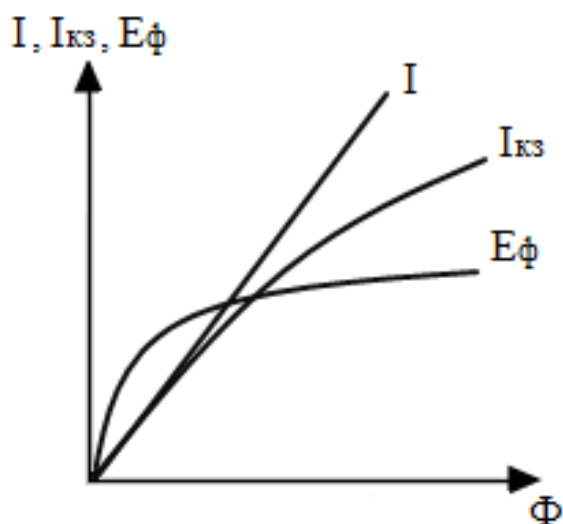


Рисунок 4.15 – Световая характеристика фотодиода в фотодиодном режиме

Для функции  $I_{кз} = f(\Phi)$  появление нелинейности связано с ростом падения напряжения на объемном сопротивлении базы полупроводника. Снижение фото-ЭДС объясняется уменьшением высоты потенциального барьера при накоплении избыточного заряда электронов в n-области и дырок p-области.

## 5 Лабораторная работа №1. Измерение сопротивлений и определение удельных сопротивлений проводников

Цель работы: в учебных целях выяснить материал проводника с помощью измерения его сопротивления и определения удельного сопротивления.

Сопротивление проводника с известным сечением и длиной измеряется прибором Е7-22 и далее вычисляется удельное сопротивление по формуле:

$$\rho = R \frac{S}{l} \left[ \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}} \right] \quad (5.1)$$

Электрическая схема соединений дана на рисунке 5.1. Для удобства присоединения миниблока с испытываемым проводником к измерителю Е7-22 используется наборное поле блока генераторов напряжений (код 213.2).

Перечень аппаратуры представлен в таблице 4.1.

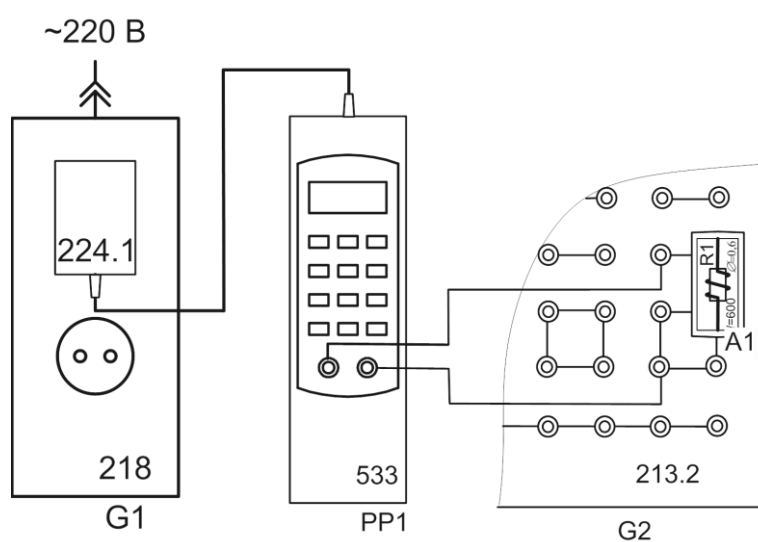


Рисунок 5.1 – Схема электрическая соединений для измерения сопротивлений образцов



Таблица 5.1 – Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~220 В / 16 А
П2	Блок генераторов напряжений с наборным полем	213.2	$\pm 15$ В, 0...+13 В, ~0...12В, л 12В. 0,2 Гц...200 кГц
PP1	Измеритель R, L, C	534	Цифровой мультиметр E7-22
A1	Набор миниблоков «Электротехнические материалы»	600.18	Миниблоки «R1» и «R2»

### 5.1 Терминологический минимум

Удельное электрическое сопротивление, или просто удельное сопротивление вещества — физическая величина, характеризующая способность вещества препятствовать прохождению электрического тока.

Проводник — вещество, среда, материал, хорошо проводящие электрический ток.

Свободный заряд — это заряд, положение которого не зафиксировано и который может свободно перемещаться в объеме. В металлах внешние электроны атомов теряют связь со своими атомами и могут свободно перемещаться по объему проводника.

## 5.2 Теоретический минимум

Электрическое сопротивление  $R$  — физическая скалярная величина, характеризующая свойство проводника уменьшать скорость упорядоченного движения свободных носителей зарядов в проводнике. Обозначается сопротивление буквой  $R$ . В СИ единицей сопротивления проводника является Ом.

1 Ом — сопротивление такого проводника, сила тока в котором равна 1 А при напряжении на нем 1 В.

Применяются и другие единицы: килоом (кОм), мегаом (МОм), миллиом (мОм):  $1 \text{ кОм} = 10^3 \text{ Ом}$ ;  $1 \text{ МОм} = 10^6 \text{ Ом}$ ;  $1 \text{ мОм} = 10^{-3} \text{ Ом}$ .

Физическую величину  $G$ , обратную сопротивлению, называют электрической проводимостью

$$G = \frac{1}{R} \quad (5.2)$$

Единицей электрической проводимости в СИ является сименс: 1 См — это проводимость проводника сопротивлением 1 Ом.

Проводник содержит не только свободные заряженные частицы — электроны, но и нейтральные частицы и связанные заряды. Все они участвуют в хаотическом тепловом движении, равновероятном в любых направлениях. При включении электрического поля под действием электрических сил будет преобладать направленное упорядоченное движение свободных зарядов, которые должны двигаться с ускорением и их скорость должна была бы со временем возрастать. Но в проводниках свободные заряды движутся с некоторой постоянной средней скоростью. Следовательно, проводник оказывает сопротивление упорядоченному движению свободных зарядов, часть энергии этого движения передается проводнику, в результате чего повышается его внутренняя энергия. Из-за

движения свободных зарядов искажается даже идеальная кристаллическая решетка проводника, на искажениях кристаллической структуры рассеивается энергия упорядоченного движения свободных зарядов. Проводник оказывает сопротивление прохождению электрического тока.

Сопротивление проводника зависит от материала, из которого он изготовлен, длины проводника и площади поперечного сечения. Для проверки этой зависимости можно воспользоваться той же электрической схемой, что и для проверки закона Ома, включая в участок цепи MN различные по размерам проводники цилиндрической формы, изготовленные из одного и того же материала, а также из разных материалов.

Результаты эксперимента показали, что сопротивление проводника прямо пропорционально длине  $l$  проводника, обратно пропорционально площади  $S$  его поперечного сечения и зависит от рода вещества, из которого изготовлен проводник:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (5.3)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление проводника.

Удельное сопротивление проводника — скалярная физическая величина, численно равная сопротивлению однородного цилиндрического проводника, изготовленного из данного вещества и имеющего длину 1 м и площадь поперечного сечения  $1 \text{ м}^2$ , или сопротивлению куба с ребром 1 м. Единицей удельного сопротивления в СИ является ом-метр (Ом·м).

Удельное сопротивление металлического проводника зависит от

1. концентрации свободных электронов в проводнике;
2. интенсивности рассеивания свободных электронов на ионах кристаллической решетки, совершающих тепловые колебания;

3. интенсивности рассеивания свободных электронов на дефектах и примесях кристаллической структуры.

Наименьшим удельным сопротивлением обладает серебро и медь. Очень велико удельное сопротивление у сплава никеля, железа, хрома и марганца — "нихрома". Удельное сопротивление кристаллов металлов в значительной степени зависит от наличия в них примесей. Например, введение 1 % примеси марганца увеличивает удельное сопротивление меди в три раза.

Выполните эксперимент на стенде, следуя указаниям приведенным на блок-схеме рисунка 5.2.

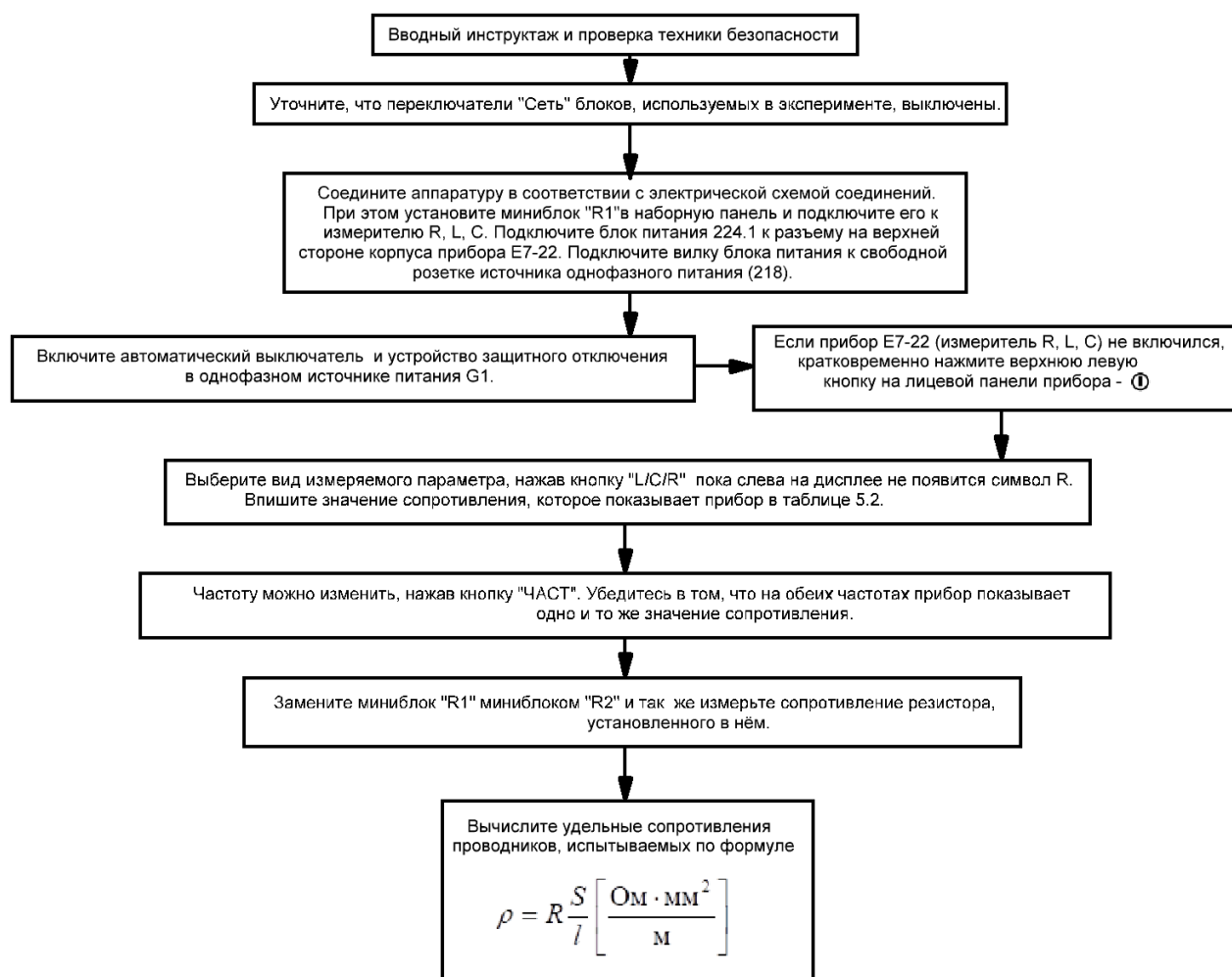


Рисунок 5.2 – Блок-схема эксперимента

Результаты исследований представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Результаты исследований

Миниблок	R, Ом	$\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$	Материал (предположительно по справочнику)
«R1»			
«R2»			

По результатам проведенных испытаний необходимо сделать вывод.

## **6 Лабораторная работа №2. Исследование барьерного фотоэффекта и снятие вольтамперной характеристики фотодиода**

Цель работы: экспериментально снять вольтамперные характеристики фотодиода диодной оптопары в генераторном и диодном режимах при нескольких значениях входного тока (освещённости).

### **6.1 Терминологический минимум**

Фотоэффект или фотоэлектрический эффект— процесс взаимодействия света или любого другого электромагнитного излучения с веществом, в результате которого энергия фотонов передается электронам вещества. В конденсированных (твёрдых и жидких) веществах выделяют внешний (поглощение фотонов сопровождается вылетом электронов за пределы тела) и внутренний (электроны, оставаясь в теле, изменяют в нем свое энергетическое состояние) фотоэффект.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) — зависимость тока через двухполюсник от напряжения на этом двухполюснике. Описывает поведение двухполюсника на постоянном токе. Также ВАХ называют функцию, выражающую (описывающую) эту зависимость и график этой функции.

Фотодиод — приёмник оптического излучения, который преобразует попавший на его фоточувствительную область свет в электрический заряд за счёт процессов в p-n-переходе.

## 6.2 Теоретический минимум

Существует несколько видов поглощения света.

а) собственное поглощение.

Этот вид поглощения имеет место в том случае, когда оптическое возбуждение электронов происходит из валентной зоны в зону проводимости. Для полупроводника с прямыми долинами при вертикальных переходах энергия фотона  $h$  должна быть не меньше ширины запрещенной зоны, то есть:

$$h = E_g \quad (6.1)$$

Для сильно легированного полупроводника n-типа, когда уровень Ферми расположен выше края зоны проводимости на величину  $n$ , нижняя граница фотопроводимости будет соответствовать:

$$h = E_g + n \quad (6.2)$$

В сильно легированном полупроводнике p-типа уровень Ферми лежит на величину  $p$  ниже края валентной зоны, поэтому:

$$h = E_g + p \quad (6.2)$$

При больших энергиях фотонов поглощение в фундаментальной области ведет к увеличению фотопроводимости за счет роста коэффициента поглощения. В случае собственного поглощения достигает наибольшей величины - ( $10^6 \text{ см}^{-1}$ ). Вместе с тем такое поглощение увеличивает концентрацию носителей заряда вблизи поверхности полупроводника или

диэлектрика, которые имеют меньшее время жизни, чем носители заряда в объеме.

б) примесное поглощение.

Такое поглощение при наличии в запрещенной зоне полупроводника локальных уровней примеси может вызвать переходы электронов между уровнями примеси и зонами. Фотопроводимость, обусловленная такими переходами, называется примесной фотопроводимостью. Для реализации таких переходов нужна меньшая энергия кванта, чем для реализации переходов из валентной зоны в зону проводимости. Поэтому примесное поглощение имеет место при больших длинах волн падающего света.

в) экситонное поглощение.

При экситонном поглощении света имеет место создание связанной пары электрон-дырка, которая является электрически нейтральным образованием. Поэтому поглощение света, связанное с образованием экситонов, первоначально не ведет к возникновению свободных носителей заряда. Однако в реальных кристаллических структурах экситоны имеют значительно большую вероятность диссоциировать безызлучательно (с образованием электронов и дырок), чем рекомбинировать с испусканием кванта света. Таким образом, образование экситонов в конечном итоге ведет к возникновению свободных носителей заряда, а, следовательно, и фототока. Экситонное поглощение, характеризующееся узкими полосами поглощения, определяет и узкие полосы фототока. При этом спектр фототока в области экситонного поглощения будет зависеть от состояния поверхности. Состояние поверхности полупроводника можно легко изменить путем воздействия на нее (механическое, химическое и т.д.). Таким образом, можно изменить характер наблюдаемого спектра фототока, обусловленного экситонным поглощением.

г) поглощение свободными носителями заряда.



Поглощение света свободными носителями заряда сопровождается увеличением их энергии. При этом в отличие от рассмотренных выше трех видов поглощения, число свободных носителей не изменяется. Но вместе с тем изменяется подвижность носителей заряда.

д) поглощение кристаллической решеткой.

В результате такого поглощения увеличивается амплитуда колебаний узлов решетки. В этом случае не изменяется ни концентрация носителей заряда, ни их подвижность. Поэтому поглощение света кристаллической решеткой не является фотоактивным.

Поглощение света свободными носителями заряда и кристаллической решеткой не могут непосредственно вызвать изменение концентрации носителей заряда. Однако возрастание концентрации носителей заряда в этих случаях может происходить в результате вторичных эффектов, когда поглощение света значительно увеличивает кинетическую энергию свободных носителей заряда или увеличивает концентрацию фононов, которые затем отдают свою энергию на возбуждение носителей заряда.

## 2. Принцип действия фотодиода

Полупроводниковый фотодиод - это полупроводниковый диод, обратный ток которого зависит от освещенности. Обычно в качестве фотодиода используют полупроводниковые диоды с p-n переходом, который смещен в обратном направлении внешним источником питания. При поглощении квантов света в p-n переходе или в прилегающих к нему областях образуются новые носители заряда. Неосновные носители заряда, возникшие в областях, прилегающих к p-n переходу на расстоянии, не превышающей диффузионной длины, диффундируют в p-n переход и проходят через него под действием электрического поля. То есть обратный ток при освещении возрастает. Поглощение квантов непосредственно в p-n переходе приводит к аналогичным результатам. Величина, на которую возрастает обратный ток, называется фототоком.

Свойства фотодиода можно охарактеризовать следующими характеристиками.

а) вольтамперная характеристика фотодиода представляет собой зависимость светового тока при неизменном световом потоке и темнового тока  $I_{\text{темн}}$  от напряжения.

б) световая характеристика фотодиода, то есть зависимость фототока от освещенности, соответствует прямой пропорциональности фототока от освещенности. Это обусловлено тем, что толщина базы фотодиода значительно меньше диффузионной длины неосновных носителей заряда. То есть практически все неосновные носители заряда, возникшие в базе, принимают участие в образовании фототока.

г) спектральная характеристика фотодиода - это зависимость фототока от длины волны падающего света на фотодиод. Она определяется со стороны больших длин волн шириной запрещенной зоны, при малых длинах волн большим показателем поглощения и увеличения влияния поверхностной рекомбинации носителей заряда с уменьшением длины волны квантов света. То есть коротковолновая граница чувствительности зависит от толщины базы и от скорости поверхностной рекомбинации. Положение максимума в спектральной характеристике фотодиода сильно зависит от степени роста коэффициента поглощения.

д) постоянная времени - это время, в течение которого фототок фотодиода изменяется после освещения или после затемнения фотодиода в  $e$  раз (63%) по отношению к установившемуся значению.

е) темновое сопротивление - сопротивление фотодиода в отсутствие освещения.

ж) инерционность.

Существует 3 физических фактора, влияющих на инерционность:

- 1) время диффузии или дрейфа неравновесных носителей через базу ;
- 2) время пролета через р-п переход ;

3) время перезарядки барьерной емкости р-п перехода, характеризующееся постоянной времени  $RC_{\text{бар}}$ .

### 6.3 Общие сведения и описание лабораторной установки

Вентильный или барьерный фотоэффект заключается в возбуждении ЭДС под действием света на границе раздела двух разнородных полупроводников. Для описания этого явления используется диодная оптопара.

Диодная оптопара может работать в генераторном и фотодиодном режиме. Семейство вольтамперных характеристик при разных освещённостях показано на рисунке 6.1. При облучении оптронного фотодиода в генераторном режиме в нём появляется генерация неосновных носителей заряда – пар дырок и электронов. Свободные дырки и электроны отделяются электрическим полем перехода и заряжают р – область положительно, а n – область отрицательно. Потенциальный барьер р-п перехода уменьшается и на выходных зажимах оптрона выявляется фото-ЭДС 0,7...0,8 В. В режиме фотогенератора от интенсивности освещения зависимость фото-ЭДС (оптопары входного тока) нелинейна, так как фото-ЭДС не может превышать контактной разности потенциалов 0,5...0,8 В.

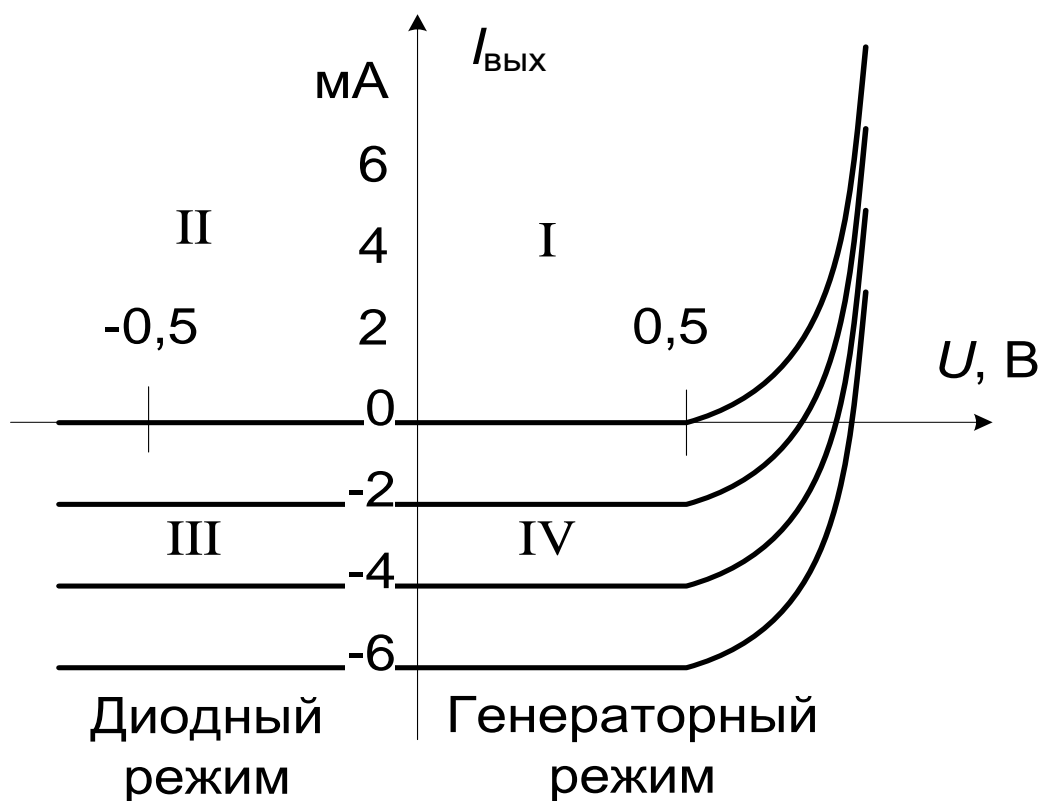


Рисунок 6.1 – Вольтамперные характеристики при разных освещённостях

Если к фотодиоду приложено обратное напряжение больше 0,5 В, то дырки и электроны, генерированные излучением обратный ток, увеличивают. Это фотодиодный режим. Величина обратного фототока практически линейно возрастает с увеличением силы света излучающего диода. Экспериментально в работе снимаются вольтамперные характеристики фотодиода в фотодиодном и генераторном режимах при нескольких значениях входного тока (освещённости).

Принципиальная схема лабораторной установки показана на рисунке 6.2, а схема соединений на рисунке 6.3. Для изучения явления барьерного (вентильного) фотофотоэффекта в данной работе используется диодная оптопара (миниблок ЗОД101Б). Для питания источника облучения из блока генераторов напряжений используется регулируемый источник

постоянного напряжения. USB осциллограф используется для снятия вольтамперной характеристики. Для этого через сопротивление 1 кОм к фотодиоду подводится от генератора синусоидальное напряжение. Подаётся сигнал с резистора 1 кОм на вертикальный вход осциллографа (Канал 2, Y), пропорциональный току, а на горизонтальный вход (Канал 1, X) подаётся напряжение с фотодиода. Следовательно, формируется кривая  $I(U)$  на дисплее. Для отображения вольтамперных характеристик как показано на рисунке 6.1 надо инвертировать сигнал горизонтального канала X.

Перечень аппаратуры представлен в таблице 6.1.

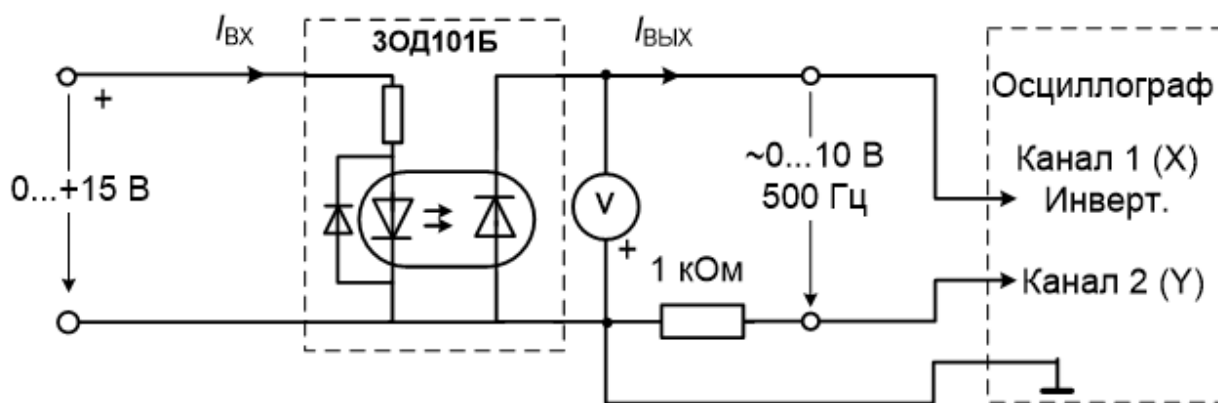


Рисунок 6.2 – Принципиальная схема для снятия вольтамперной характеристики фотодиода оптопары

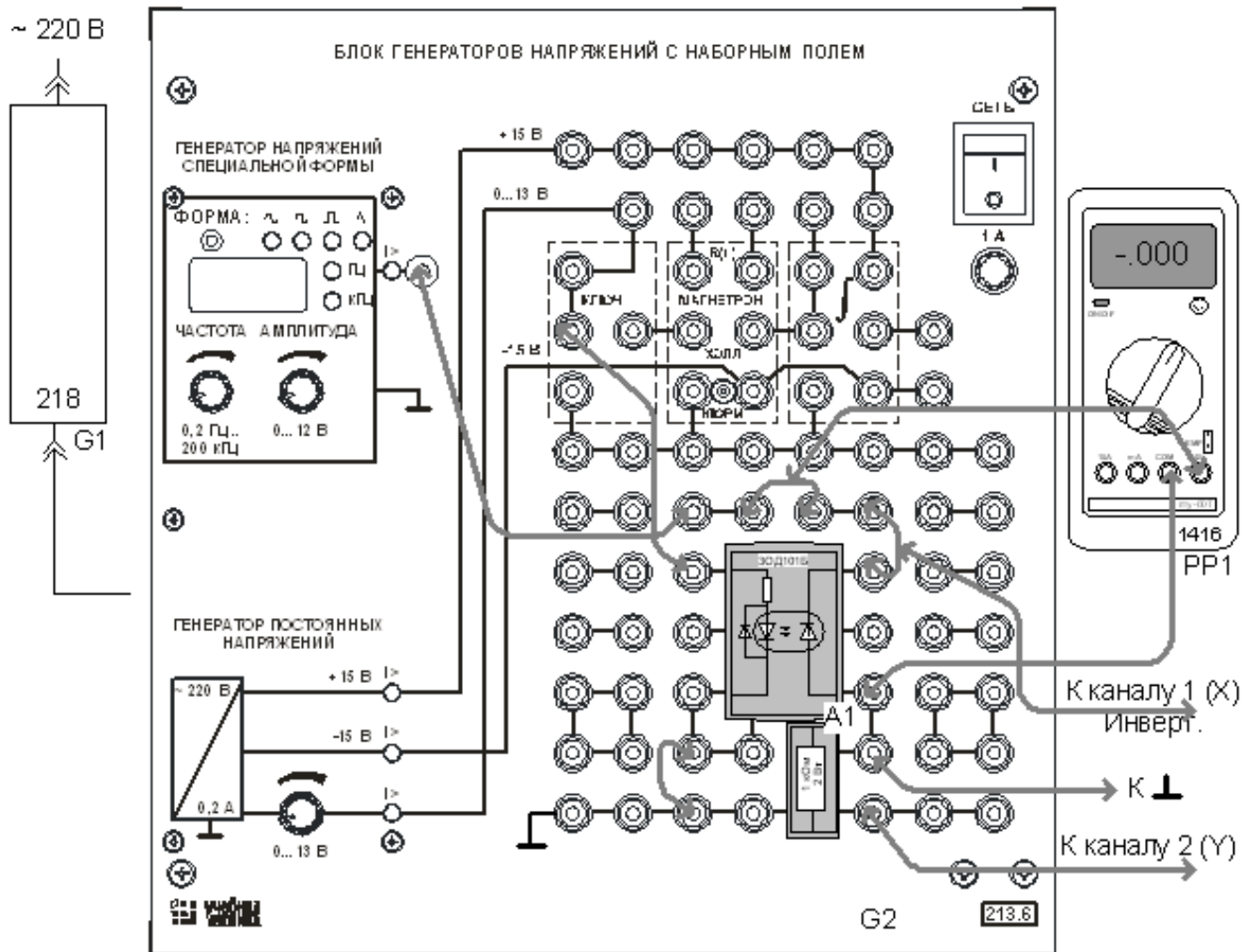


Рисунок 6.3 – Схема соединений для снятия вольтамперной характеристики фотодиода оптопары

Таблица 6.1 – Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~220 В / 16 А
G2	Блок генераторов напряжений с наборным полем	213.2	$\pm 15$ В, 0...+13 В, ~0...12В, л 12В. 0,2 Гц...200 кГц
PP1	Мультиметр	1416	Цифровой мультиметр МУ60Т
A1	Набор миниблоков «Электротехнические материалы»	600.18.1	Миниблоки «ЗОД101Б» и «Резистор 1 кОм»

#### 6.4 Указания по проведению эксперимента

Выполните эксперимент на лабораторном стенде, следуя указаниям согласно блок-схемам, на рисунках 6.4 – 6.5.

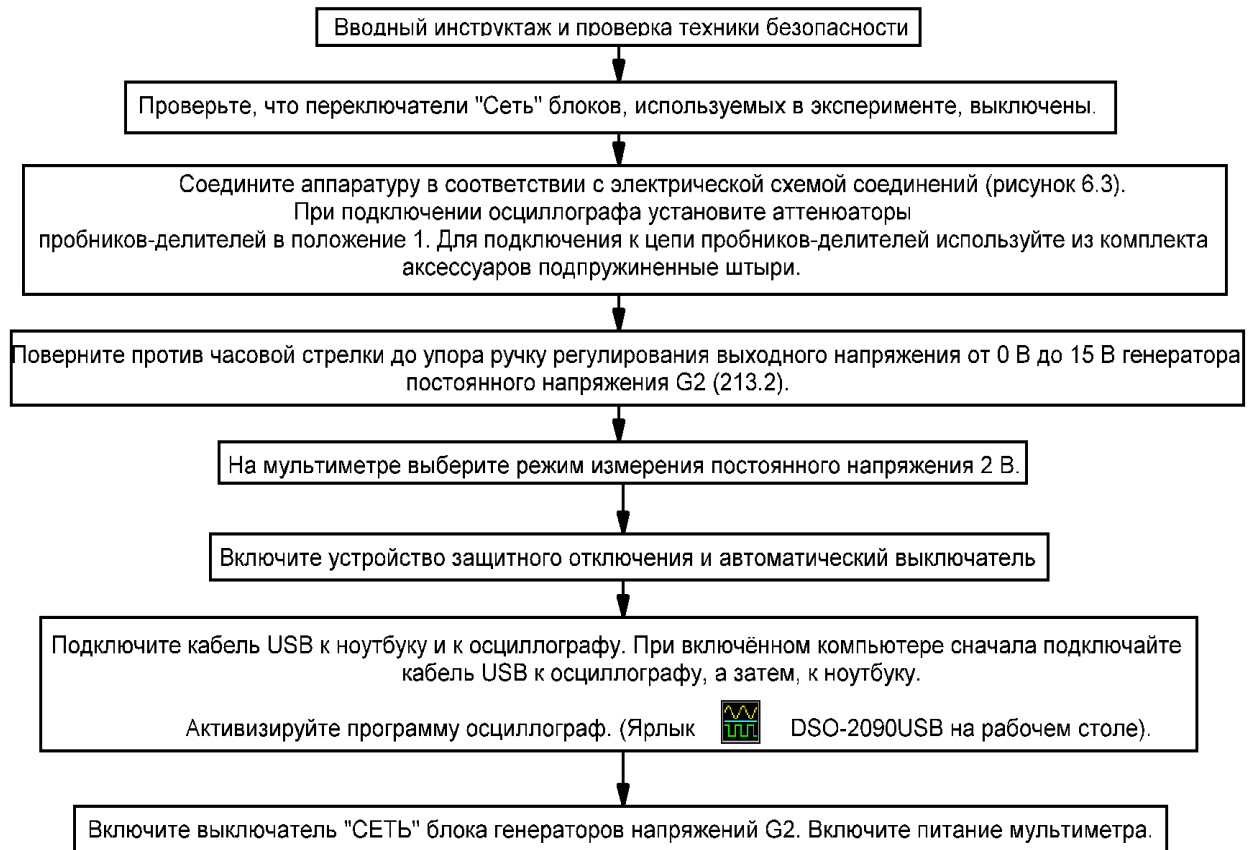


Рисунок 6.4. – Блок схема эксперимента



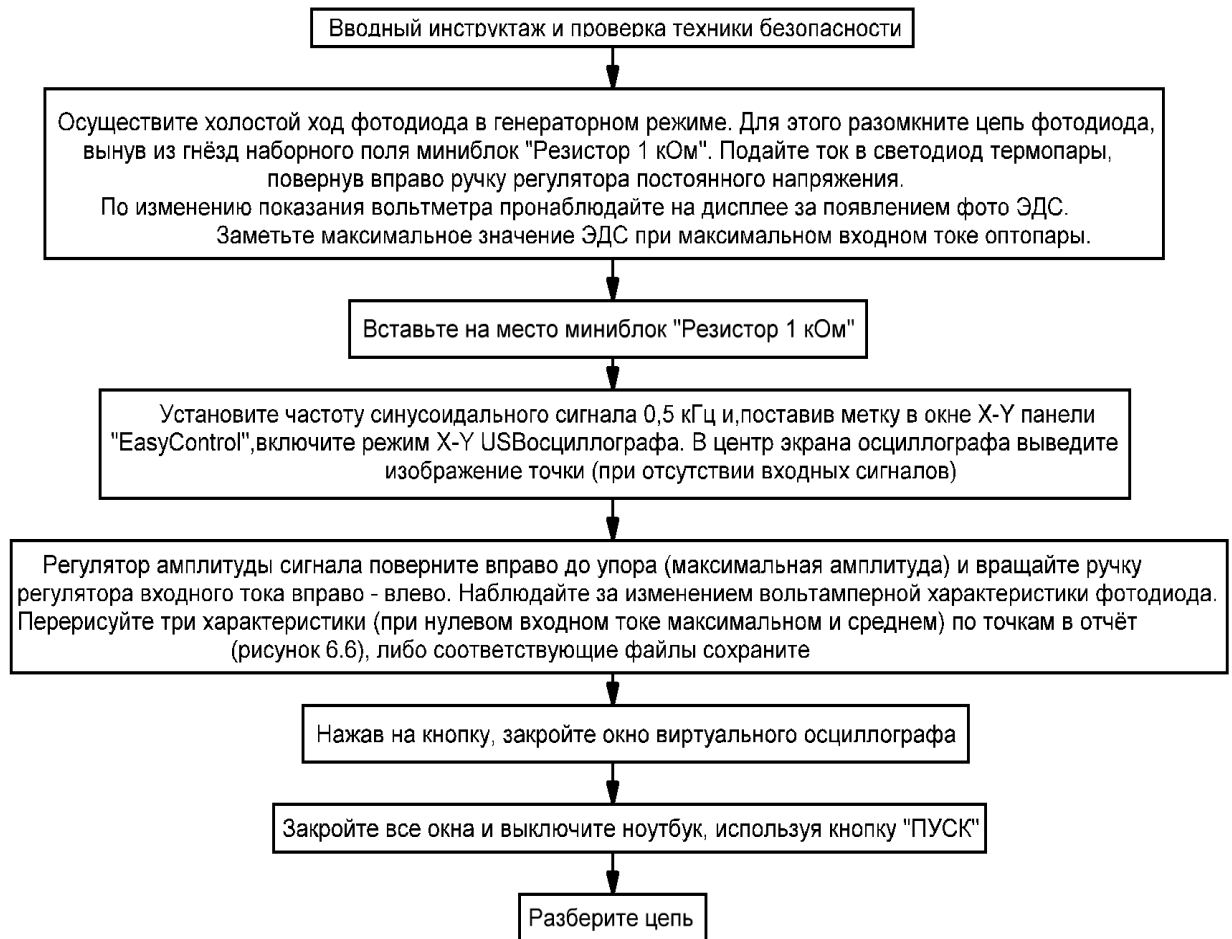


Рисунок 6.5. – Блок схема эксперимента

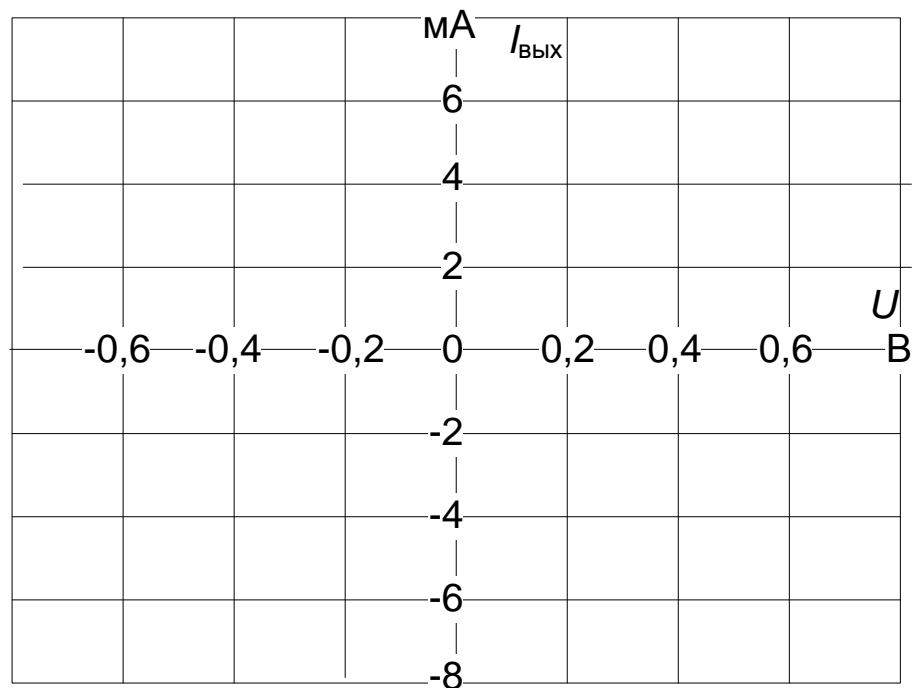


Рисунок 6.6 – Сетка для отображения результатов измерений

Примечание: при обработке результатов измерения, необходимо обращать на выбранный вами масштаб, таким образом графики, построенные по предложенной сетке, могут иметь иные значения градации осей.

По итогам проделанной работы сделать вывод.

## **7 Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляционных материалов**

Цель работы: выявление основных характеристик изоляционных материалов: тангенса угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ) и относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ). Приобретение навыков измерения параметров электрических цепей с помощью прибора Е7-22.

### **7.1 Терминологический минимум**

Диэлектрическая проницаемость, безразмерная величина  $\epsilon$ , показывающая, во сколько раз сила взаимодействия  $F$  между электрическими зарядами в данной среде меньше их силы взаимодействия  $F_0$  в вакууме.

Способность диэлектрика рассеивать энергию в электрическом поле обычно характеризуют углом диэлектрических потерь, а также тангенсом угла диэлектрических потерь. При испытании диэлектрик рассматривается как диэлектрик конденсатора, у которого измеряется емкость и угол  $\delta$ , дополняющий до  $90^\circ$  угол сдвига фаз между током и напряжением в емкостной цепи. Этот угол называется углом диэлектрических потерь.

### **7.2 Теоретический минимум**

Относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  является одной из важнейших характеристик электроизоляционных материалов. Её величина определяет значение ёмкости образца материала либо электроизоляционной конструкции (изолятора, конденсатора, кабеля и других). Определив относительную диэлектрическую проницаемость и умножив её на

электрическую постоянную  $\varepsilon_0 = 8,66 \times 10^{-12}$  Ф/м, получаем абсолютную диэлектрическую проницаемость материала:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon, \text{ Ф/м} \quad (7.1)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость.

Величину емкости  $C$  плоского конденсатора, можно выразить через абсолютную диэлектрическую проницаемость.

$$C = \frac{\varepsilon_a \cdot S}{h}, \text{ Ф} \quad (7.2)$$

где  $S$  – площадь одной металлической обкладки, см<sup>2</sup>;

$h$  – толщина диэлектрика.

Из выражения следует, что диэлектрическая проницаемость – величина, определяющая способность материала образовывать электрическую ёмкость. Наименьшей диэлектрической проницаемостью обладает вакуум ( $\varepsilon = 1$ ), диэлектрическая проницаемость воздуха  $\varepsilon = 1,00058$ . Большими значениями диэлектрической проницаемости обладают жидкие и твердые диэлектрики, у которых  $\varepsilon = 2-9$ .

У некоторых твердых диэлектриков, называемых сегнетоэлектриками, диэлектрическая проницаемость при комнатной температуре достигает очень больших значений ( $\varepsilon = 1500 - 7500$ ). Это позволяет изготавливать из них электрические конденсаторы очень малых размеров.

Под диэлектрическими потерями понимают обычно величину мощности, рассеиваемой в электрической изоляции, находящейся в переменном электрическом поле. Применяемые электроизоляционные материалы в неодинаковой степени способны к подобному рассеиванию. Только идеальный диэлектрик может образовать электрическую изоляцию,

через которую под действием переменного напряжения будет проходить чисто реактивный, емкостный ток. В изоляции же из реальных материалов ток  $I$ , наряду с ёмкостной составляющей  $I_c$ , будет иметь и активную составляющую  $I_a$ , которая и определяет величину диэлектрических потерь:  $P = U I_a$ . Поэтому вектор тока опережает вектор напряжения  $U$  на угол  $\varphi < 90^\circ$ . Угол  $\delta$ , дополняющий угол до  $90^\circ$ , называется углом диэлектрических потерь, потому что чем больше этот угол, тем больше составляющая  $I_a$  и, следовательно, диэлектрические потери  $P$ . Диэлектрические потери  $P$  (Вт) в образце электроизоляционного материала или в изоляции какой-либо конструкции с ёмкостью  $C$  (Ф) при действующем значении переменного синусоидального напряжения  $U$  (В) и круговой частоте  $\omega$  ( $\text{сек}^{-1}$ ) вычисляются по формуле:

$$P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta = U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (7.3)$$

Отсюда следует, что потери определяются величиной тангенса угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg}(\delta)$ , являющегося поэтому важной характеристикой как диэлектриков, так и изоляции конструкций, в особенности работающих при высоких напряжениях и частоте и тангенс угла диэлектрических потерь и диэлектрическая проницаемость диэлектриков зависит от различных факторов, например, частоты ( $f$ ) приложенного напряжения, температуры диэлектрика и т.д. Ярко выраженная зависимость  $\operatorname{tg} \delta$  от величины приложенного напряжения наблюдается у изоляции, содержащей газы включения при достаточном их объёме.

### 7.3 Лабораторная установка и электрическая схема соединений

Для выявления диэлектрической относительной проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь различных изоляционных материалов измеряются параметры последовательной схемы замещения конденсатора (С и R) с диэлектриком из испытываемого материала. Схема электрическая соединений для измерения параметров конденсатора приведена на рисунке 7.1. Плоский конденсатор (блок 2355), между пластинами которого помещен испытываемый диэлектрик, подключается к измерителю параметров RLC E7-22 (блок 533). Блоки питания 218 и 224.1 обеспечивают напряжение питания +12В для E7-22.

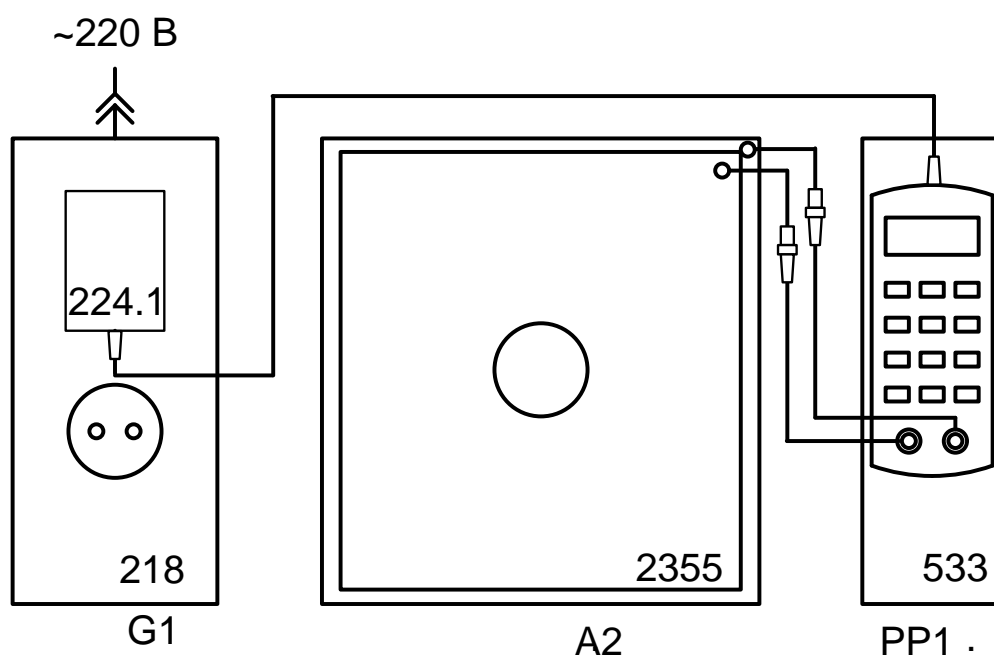


Рисунок 7.1 – Схема электрическая соединений для измерения параметров конденсатора с испытываемым диэлектриком

Ёмкость конденсатора с испытываемым диэлектриком определяется соотношением:

$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (7.4)$$

где  $\varepsilon_0 \approx 8,854 \cdot 10^{-12}$  - электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума);

$\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость испытываемого диэлектрика;

$S$  - площадь пластин конденсатора в кв. метрах. В эксперименте учитывается площадь верхней пластины конденсатора. Влиянием краевого эффекта пренебрегаем;

$d$  - расстояние между пластинами конденсатора в метрах, равное толщине испытываемого диэлектрика.

Для вычисления диэлектрической относительной проницаемости испытываемого диэлектрика измеренная ёмкость  $C$  сравнивается с расчетной емкостью конденсатора  $C_0$  с теми же геометрическими размерами, но без диэлектрика (среда между пластинами – вакуум с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_0$ ).

Величина:

$$C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (7.5)$$

Отношение ёмкостей:

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S/d}{\varepsilon_0 S/d} = \varepsilon \quad (7.6)$$

Т. е. равно относительной диэлектрической проницаемости

испытываемого диэлектрика.

Тангенс угла диэлектрических потерь определяется для последовательной схемы замещения конденсатора, состоящей из идеального конденсатора с емкостью  $C$  и, включенного последовательно с ним, сопротивления  $R$ .

При измерении на частоте  $\omega$ :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R}{1/\omega C} \quad (7.7)$$

Т. е., тангенс диэлектрических потерь равен отношению емкостного ( $1/\omega C$ ) и активного ( $R$ ) сопротивлений цепи. Отсюда можно определить сопротивление  $R$  последовательной схемы замещения конденсатора:

$$R = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega C} \quad (7.8)$$

Таблица 7.1 – Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~ 220 В / 16 А
PP1	Измеритель R-L-C	533	Измерение R, L, C при частоте 120 Гц и 1 кГц
A2	Блок конденсатора	2355	Площадь пластин 790 кв. см
	Набор образцов диэлектриков	600.20	Образцы диэлектриков размером 285x297 мм



## 7.4 Указания по проведению эксперимента

Выполните эксперимент на лабораторном стенде, следуя указаниям согласно блок-схемам, на рисунках 7.2 – 7.3.

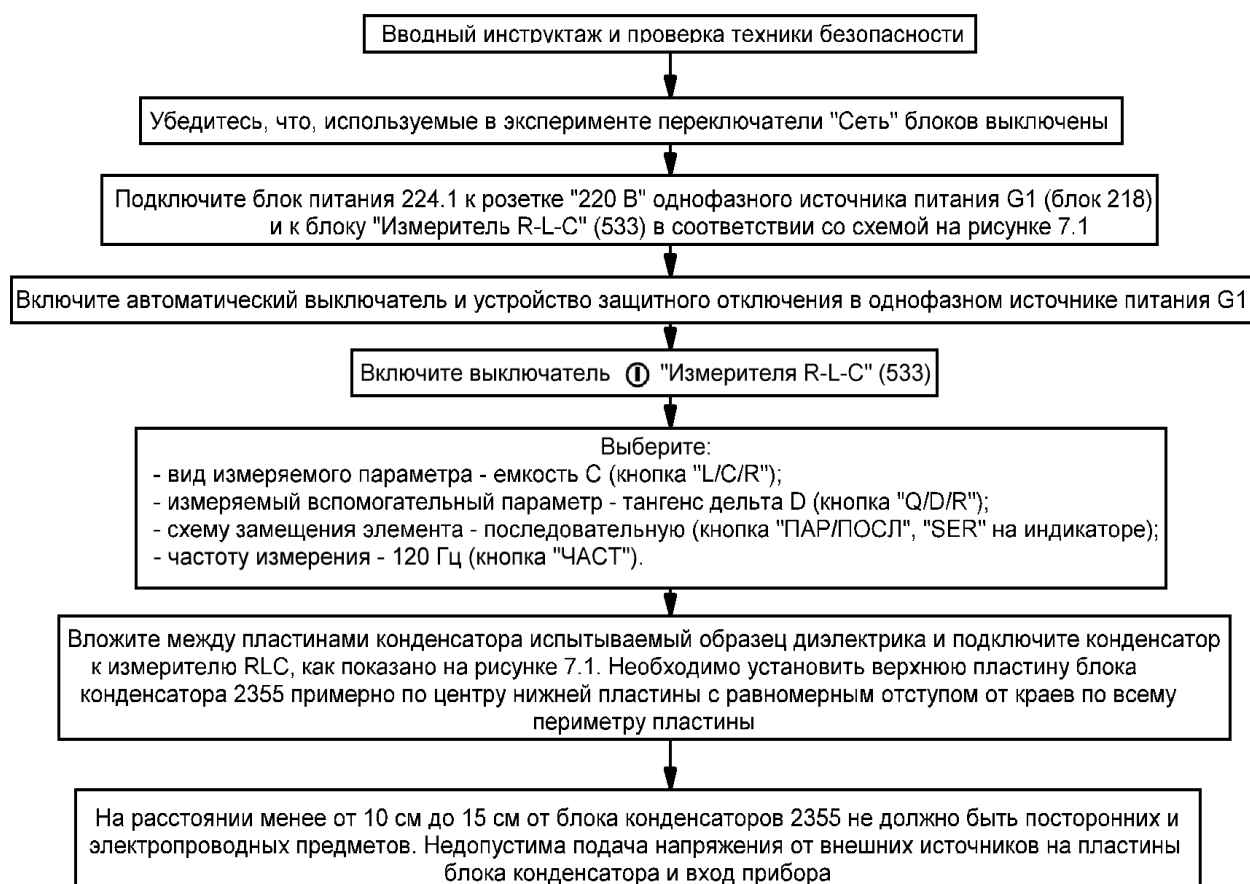


Рисунок 7.2 – Блок-схема эксперимента

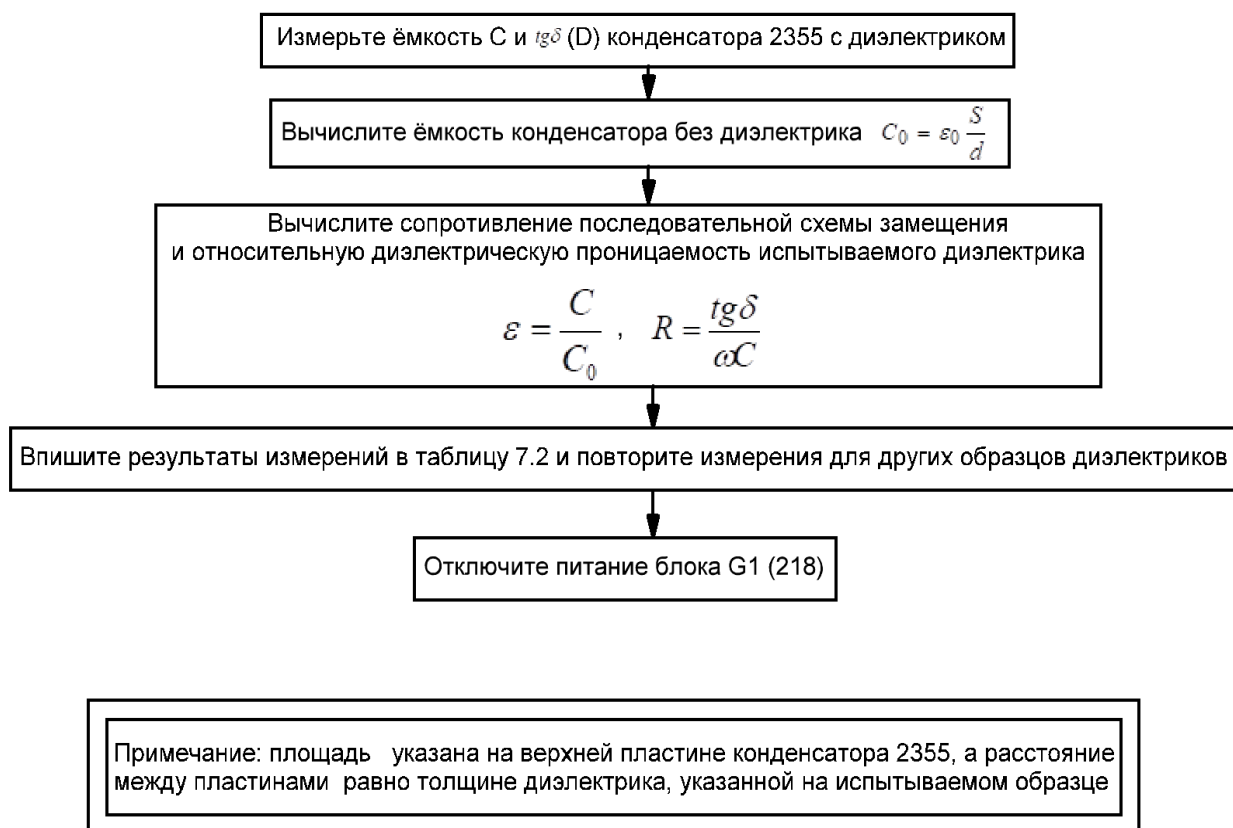


Рисунок 7.3 – Блок-схема эксперимента

Таблица 7.2 – Результаты измерений

Образец	$C$ , пФ	$tg\delta$	$\varepsilon$	$R$ , Ом
Образец 1				
Образец 2				
Образец 3				
Образец 4				
...				
...				
Образец 7				

По итогам проделанной работы сделать вывод.

## **8 Снятие петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и определение точки Кюри**

Цель работы: Снять петлю гистерезиса ферромагнетика экспериментально при различных температурах, определить намагниченность насыщения и температуру Кюри.

### **8.1 Терминологический минимум**

Ферромагнетики – твердые вещества, обладающие при не слишком высоких температурах самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздействий – магнитного поля, деформации, изменения температуры

Точка Кюри́, или температура Кюри́, — температура фазового перехода II рода, связанного со скачкообразным изменением свойств симметрии вещества.

Гистерезис — свойство систем (обычно физических), которые не сразу следуют приложенным силам. Реакция этих систем зависит от сил, действовавших ранее, то есть поведение системы зависит от её собственной истории.

Магнитный гистерезис — явление зависимости вектора намагничивания и вектора напряженности магнитного поля в веществе не только от приложенного внешнего поля, но и от предыстории данного образца. Магнитный гистерезис обычно проявляется в ферромагнетиках — Fe, Co, Ni и сплавах на их основе. Именно магнитным гистерезисом объясняется существование постоянных магнитов.

## 8.2 Теоретический минимум

Петля гистерезиса. При циклическом изменении напряженности постоянного магнитного поля от 0 до  $+H$ , от  $+H$  до  $-H$  и снова от  $-H$  до  $+H$  кривая изменения индукции (кривая перемагничивания) имеет форму замкнутой кривой – петли гистерезиса. Для слабых полей петля имеет вид эллипса. При увеличении значения напряженности магнитного поля  $H$  получают серию заключенных одна в другую петель гистерезиса. Когда все векторы намагниченности доменов сориентируются вдоль направления поля, процесс намагничивания закончится состоянием технического насыщения намагниченности материала. Петлю гистерезиса, полученную при условии насыщения намагничивания, называют предельной петлей гистерезиса (рисунок 8.1).

Она характеризуется максимально достигнутым значением индукции  $B_s$ , называется индукцией насыщения. При уменьшении напряженности магнитного поля от  $+H$  до 0 магнитная индукция сохраняет остаточную индукцию  $B_c$ . Чтобы получить остаточную магнитную индукцию, равную 0, необходимо приложить противоположно направленное размагничивающее поле определенной напряженности  $-H_c$ . Отрицательная напряженность магнитного поля  $-H_c$  называется коэрцитивной силой материала. При достижении напряженности магнитного поля значения  $-H$ , а затем 0 вновь возникает остаточная индукция  $-B_c$ . Если повысить напряженность магнитного поля до  $+H_c$ , то остаточная магнитная индукция  $B_c$  будет равна 0. Площадь гистерезисных петель в промежуточных и предельных состояниях характеризует рассеивание электрической энергии в процессе перемагничивания материала, т.е. потери на гистерезис.

Площадь гистерезисной петли зависит от свойств материала, его геометрических размеров и частоты перемагничивания. По предельной петле

гистерезиса определяют такие характеристики магнитных материалов, как индукцию насыщения  $B_s$ , остаточную индукцию  $B_r$ , коэрцитивную силу  $H_c$ .

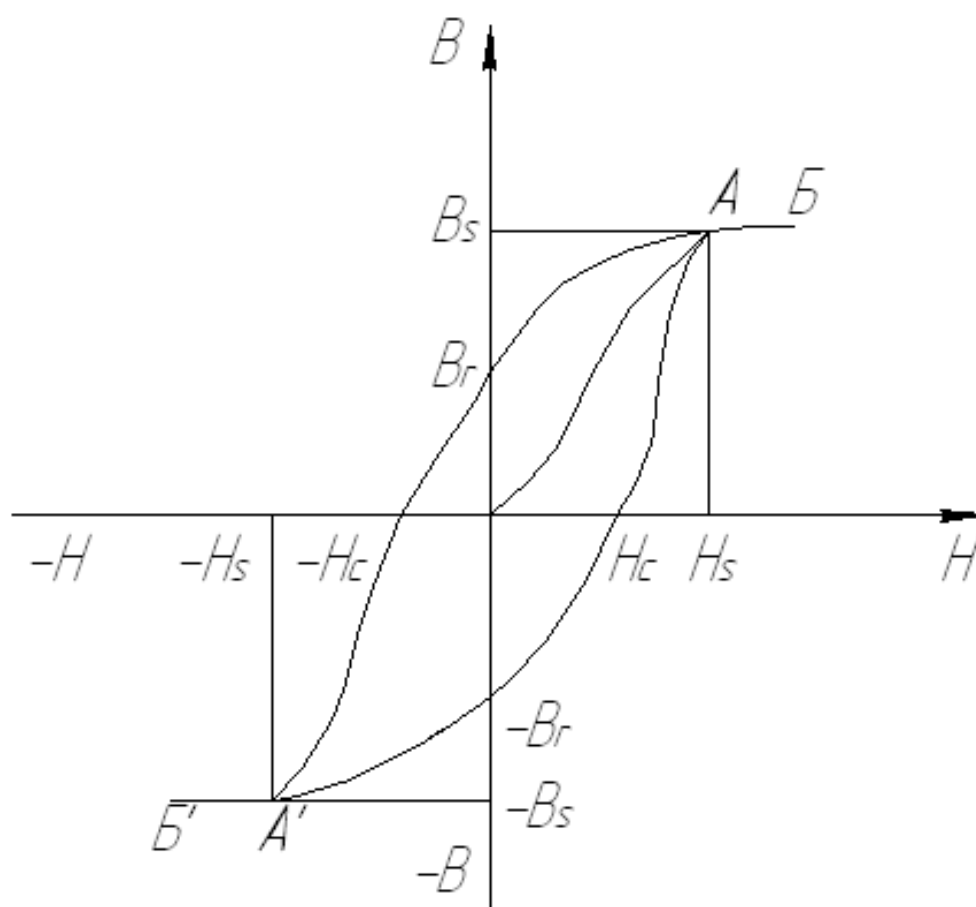


Рисунок 8.1 – Петля гистерезиса

Кривая намагничивания представлена на рисунке 8.2. Это важнейшая характеристика магнитных материалов, она показывает зависимость намагниченности или магнитной индукции материала от напряженности внешнего поля  $H$ . Магнитная индукция материала  $B_i$  измеряется в теслах (Тл) и связана с намагниченностью. Основная (коммутационная) кривая намагничивания представляет собой геометрическое место вершин петель гистерезиса, полученных при циклическом перемагничивании и отражает изменение магнитной индукции  $B$  в зависимости от напряженности магнитного поля  $H$ , которое создается в материале при намагничивании.

Напряженность магнитного поля в образце в виде тороида, когда магнитная цепь замкнута, равна напряженности внешнего поля  $H_v$ . В разомкнутой магнитной цепи на концах образца появляются магнитные полюса, создающие размагничивающее поле  $H_r$ . Разница между магнитными напряженностями внешнего и размагничивающего полей определяют внутреннюю магнитную напряженность  $H_i$  материала. Основная кривая намагничивания имеет ряд характерных участков, которые можно условно выделить при намагничивании монокристалла ферромагнетика. Первый участок кривой намагничивания соответствует процессу смещения границ менее благоприятно ориентированных доменов. На втором участке происходит поворот векторов намагниченности доменов в направлении внешнего магнитного поля. Третий участок соответствует парапроцессу, т.е. завершающему этапу процесса намагничивания, когда сильное магнитное поле поворачивает в направлении своего действия не сориентированные магнитные моменты доменов ферромагнетика.

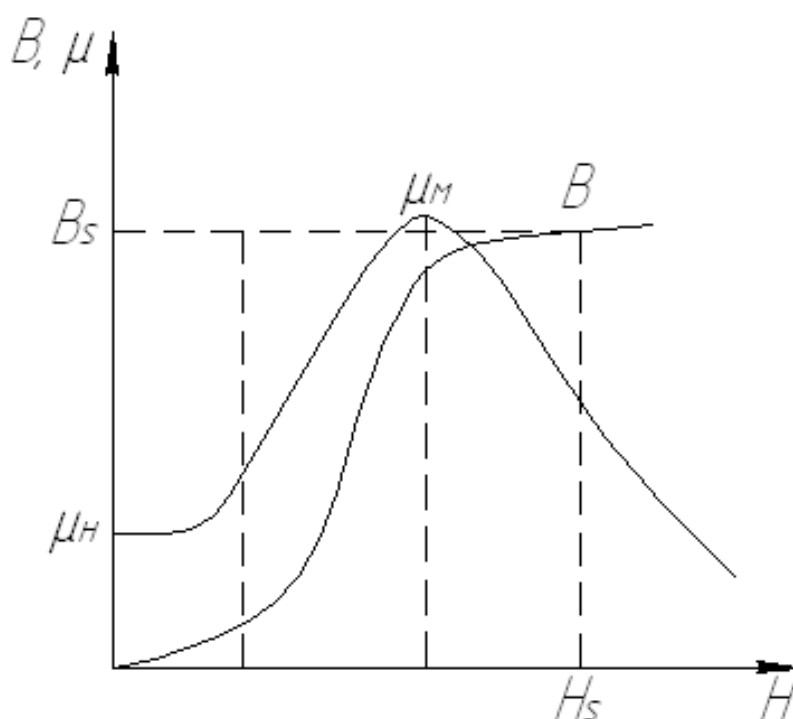


Рисунок 8.2 – Кривая намагничивания

### 8.3 Лабораторная установка и электрическая схема соединений

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рисунке 8.3.

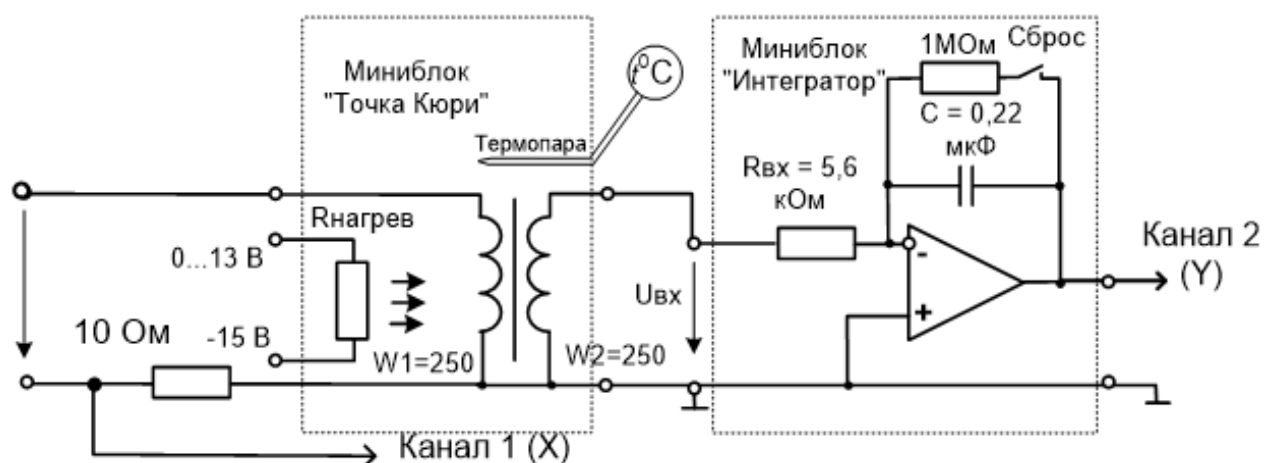


Рисунок 8.3 – Принципиальная схема для снятия петли гистерезиса и определения точки Кюри

Исследуемый образец ферромагнетика представляет собой кольцевой сердечник из феррита, длина и сечение средней линии которого указаны на этикетке миниблока «Точка Кюри». На сердечнике имеются две одинаковых катушки по 250 витков. Одна из них подключается к источнику синусоидального напряжения и служит для создания переменного магнитного потока в сердечнике. К другой катушке подключён интегратор для измерения магнитного потока.

Выходное напряжение интегратора:

$$u_{\text{вых}} = \frac{1}{R_{\text{ex}} C} \int u_{\text{вх}}(t) dt = \frac{1}{R_{\text{ex}} C} \int w_2 \frac{d\Phi}{dt} dt = \frac{w_2}{R_{\text{ex}} C} \Phi = \frac{w_2}{R_{\text{ex}} C} BS, \quad (8.1)$$

где  $R_{\text{ex}}$  и  $C$  – параметры интегратора,

$S$  – сечение сердечника,

$B$  – магнитная индукция.

Для исключения интегрирования постоянной составляющей входного сигнала переключатель «Сброс» интегратора должен находиться в замкнутом состоянии.

Из рассмотренного выражения магнитная индукция в сердечнике:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{R_{\text{ex}} C}{w_2 S} u_{\text{вых}} \quad (8.2)$$

Напряжённость магнитного поля в сердечнике вычисляется по закону полного тока:

$$H = \frac{i \cdot w}{l} \quad (8.3)$$

где  $l$  – длина средней линии сердечника.



Напряжение с шунта 100 Ом подаётся на горизонтальный вход осциллографа, а напряжение  $u_{\text{вых}}$  с выхода интегратора - на вертикальный вход. Так как первое пропорционально напряжённости магнитного поля, а второе - магнитной индукции, на экране осциллографа отображается зависимость  $B(H)$  в определённом масштабе.

Нагревание образца осуществляется резистором  $R_{\text{нагрев}}$ , встроенным в миниблок «Точка Кюри». С помощью ручки управления регулируемого источника постоянного напряжения, напряжение на нём можно регулировать от 15 до 30 В. С увеличением напряжения увеличивается яркость свечения, встроенной в миниблок сигнальной лампочки.

Цепь собирается на наборном поле блока генераторов напряжений, как показано на монтажной схеме (рисунок 8.4). При этом, миниблоки «Точка Кюри» и «Интегратор» устанавливаются в наборную панель точно на отведённое для них место. Тогда к интегратору автоматически подводятся напряжения питания «+» и «-» 15 В, а к нагревателю миниблока «Точка Кюри» подаётся напряжение – 15 В. Кроме того, вторичная катушка трансформатора, встроенного в миниблок, соединяется с входом интегратора. Это определённо уменьшает количество внешних соединений.

Перечень аппаратуры представлен в таблице 8.1.

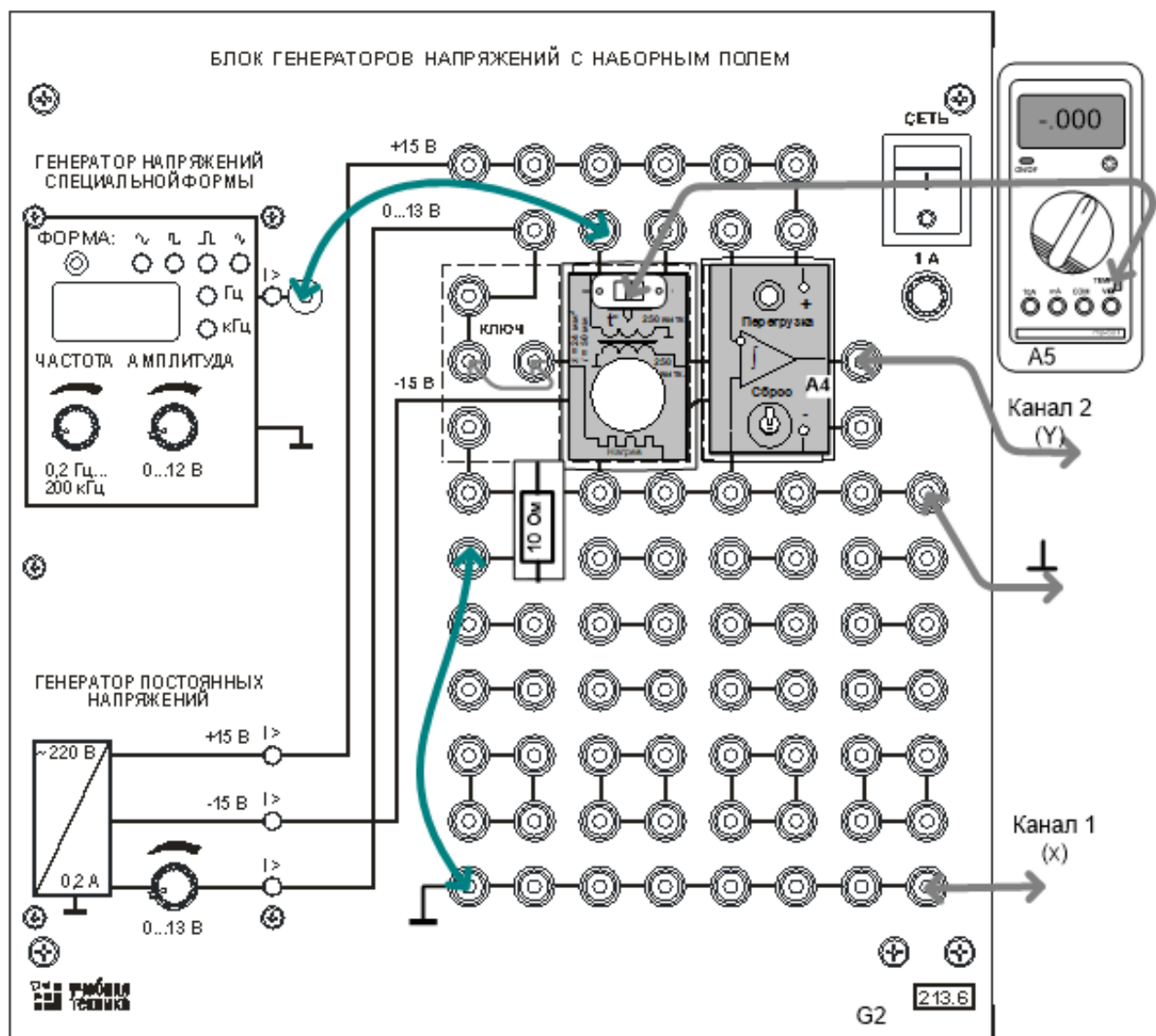


Рисунок 8.4 – Монтажная схема для снятия петли гистерезиса и определения точки Кюри

Таблица 8.1 – Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Однофазный источник питания	218	~220 В / 16 А
G2	Блок генераторов напряжения	213.2	$\pm 15$ В, 0...+13 В, ~0...12В, л 12В. 0,2 Гц...200 кГц
A1	Набор миниблоков «Электротехнические материалы»	600.18	Миниблоки: «Точка Кюри», «Интегратор», и «Резистор 100 Ом»
PP1	Мультиметр	1416	Цифровой мультиметр МУ60Т
	USB осциллограф	1419	
	Нетбук	1420	

#### 8.4 Указания по проведению эксперимента

Выполните эксперимент на лабораторном стенде, следуя указаниям согласно блок-схеме, на рисунке 8.5.

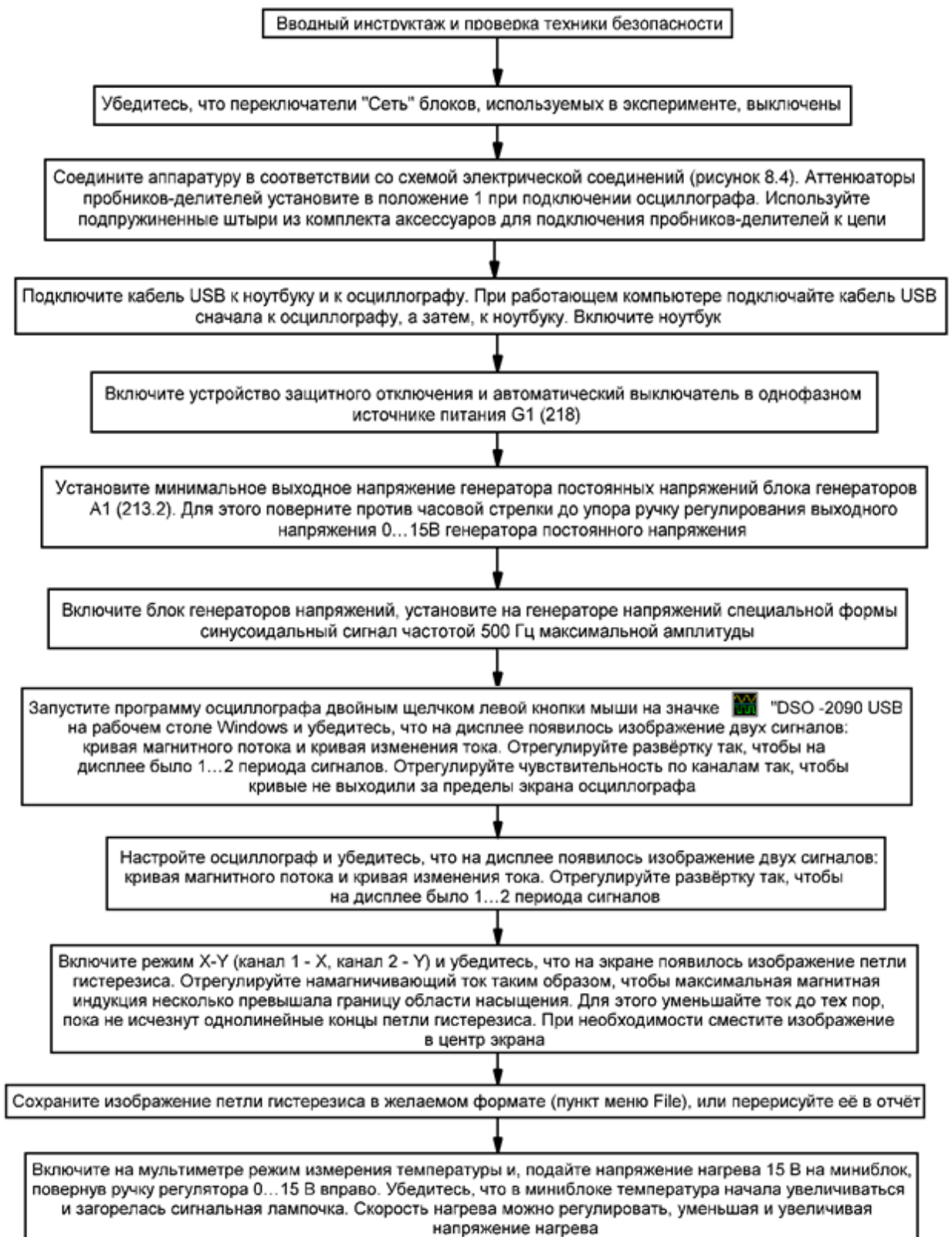


Рисунок 8.5 – Блок-схема эксперимента

При выбранных значениях температуры по мере нагревания миниблока сохраняйте или перерисовывайте кривую.

Дождитесь нагрева до температуры точки Кюри (примерно 110...1200С) и сразу же убавьте нагрев или отключите. Снова сохраните изображение петли гистерезиса в желаемом формате (пункт меню File), или перерисуйте её в отчёт. Зафиксируйте температуру точки Кюри.

По итогам проделанной работы сделать вывод.

## Список использованных источников

1. Посягина, Т.А. Электротехническое и конструкционное материаловедение : практикум / Т.А. Посягина ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет», Кумертауский филиал ОГУ. – Оренбург : ОГУ, 2016. – 104 с. : ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=485375> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-7410-1568-1. – Текст : электронный.

2. Основы материаловедения : учебное пособие / Е.А. Астафьева, Ф.М. Носков, В.И. Аникина и др. ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Сибирский Федеральный университет. – Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2013. – 152 с. : граф., схем., ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=364047> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-7638-2779-8. – Текст : электронный.

3. Технология конструкционных электротехнических материалов : учебное пособие : в 2 кн. / авт.-сост. С.В. Горелов, Р.В. Манчук, А.С. Попов, С.О. Хомутов и др. – 3-е изд. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2016. – Кн. 1. Водный транспорт. – 389 с. : ил., схем., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=364596> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-4475-5863-5. – DOI 10.23681/364596. – Текст : электронный.

4. Материаловедение : учебное пособие / С. Богодухов, А. Проскурин, Е. Шеин, Е. Приймак ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет». – Оренбург : ОГУ, 2013. – 198 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=259154> (дата обращения: 11.12.2019). – Текст : электронный.

5. Привалов, Е.Е. Основы электроматериаловедения : учебное пособие / Е.Е. Привалов. – 2-е изд., стер. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2017. – 301 с. : ил., схем., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=481652> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-4475-9418-3. – DOI 10.23681/481652. – Текст : электронный.

6. Королев, А.П. Поведение материалов в электрическом поле : учебное пособие / А.П. Королев, Д.М. Мордасов ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет». – Тамбов : Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 80 с. : табл., схем., ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=437087> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-8265-1158-9. – Текст : электронный.

7. Привалов, Е.Е. Электротехнические материалы систем электроснабжения : учебное пособие / Е.Е. Привалов. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2016. – 266 с. : ил., схем., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=436753> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-4475-7619-6. – DOI 10.23681/436753. – Текст : электронный.

8. Конструкционные электротехнические материалы : учебное пособие / В.П. Горелов, С.В. Горелов, В.С. Горелов, Е.А. Григорьев ; под ред. В.П.

Горелова. – 5-е изд., стер. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2016. – 341 с. : ил., схем., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=445841> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-4475-8609-6. – DOI 10.23681/445841. – Текст : электронный.

9. Композиционные электросетевые конструкции для энергоснабжения : монография / В.П. Горелов, С.В. Горелов, В.С. Горелов, Е.А. Григорьев ; под ред. В.П. Горелова. – 4-е изд., стер. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2016. – 444 с. : ил., схем., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=445837> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-4475-8612-6. – DOI 10.23681/445837. – Текст : электронный.

10. Демин, Ю.В. Обеспечение долговечности электросетевых материалов и конструкций в агрессивных средах : практическое пособие / Ю.В. Демин, Р.Ю. Демина, В.П. Горелов ; под ред. В.П. Горелова. – 2-е изд., стер. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2016. – Кн. 1. Теоретические основы. – 210 с. : ил., схем., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=435015> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-4475-6582-4. – DOI 10.23681/435015. – Текст : электронный.

11. Применение электрических неоднородных композитов в электросетевых конструкциях : монография / В.П. Горелов, С.В. Горелов, Г.А. Данилов, Г.Р. Манчук ; под ред. В.П. Горелова, В.Г. Сальникова. – 2-е изд., стер. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2016. – 359 с. : ил., схем., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=434951> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр.: с. 319-337. – ISBN 978-5-4475-6036-2. – DOI 10.23681/434951. – Текст : электронный.



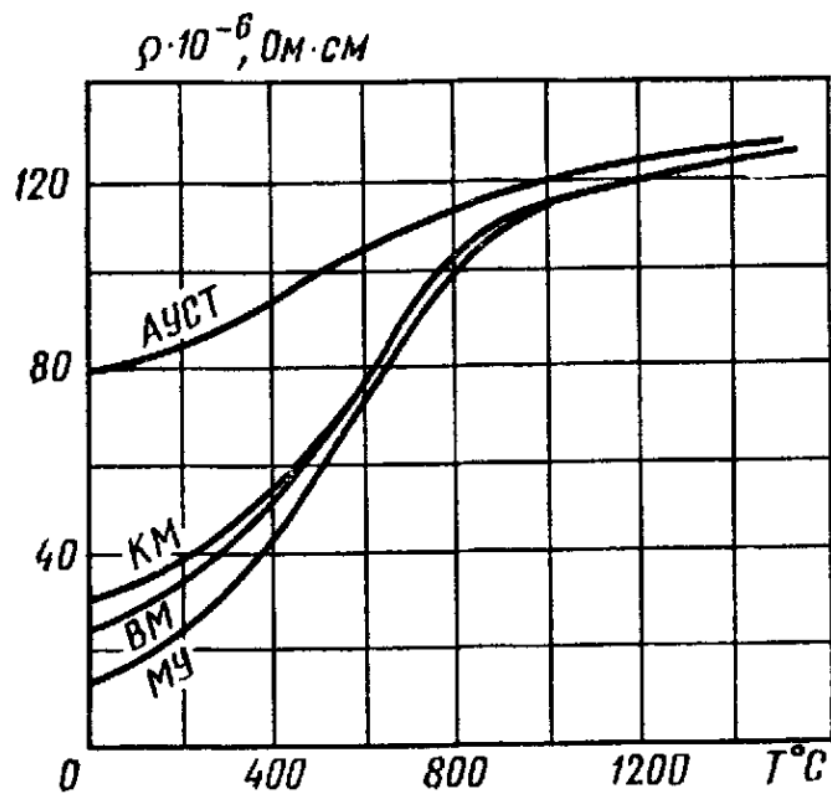
12. Целебровский, Ю.В. Материаловедение для электриков в вопросах и ответах : учебное пособие / Ю.В. Целебровский ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Новосибирский государственный технический университет. – 3-е изд. – Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2015. – 64 с. : табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=438299> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-7782-2676-0. – Текст : электронный.

13. Эксплуатация линий распределительных сетей систем электроснабжения : учебное пособие / Е.Е. Привалов, А.В. Ефанов, С.С. Ястребов, В.А. Ярош ; под ред. Е.Е. Привалова. – Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2018. – 205 с. : ил., схем., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493603> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-4475-9695-8. – DOI 10.23681/493603. – Текст : электронный.

14. Эксплуатация линий распределительных сетей систем электроснабжения : учебное пособие / Е.Е. Привалов, А.В. Ефанов, С.С. Ястребов, В.А. Ярош ; под ред. Е.Е. Привалова ; Ставропольский государственный аграрный университет. – Ставрополь : Параграф, 2018. – 169 с. : ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=485019> (дата обращения: 11.12.2019). – Библиогр.: с. 166. – Текст : электронный.

## Приложение А (справочное)

Изменение удельного сопротивления стали с температурой



АУСТ – аустенитная электродная проволока;

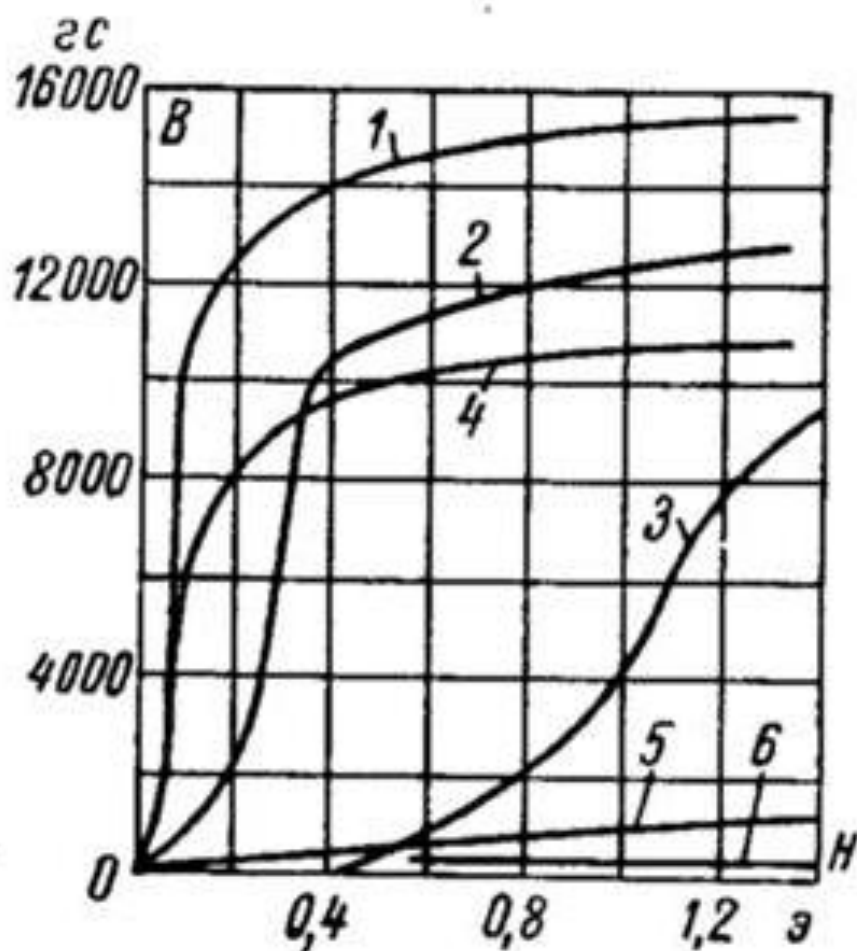
КМ – кремнемарганцовистая;

ВМ – высокомарганцовистая;

МУ – малоуглеродистая.

## Приложение Б (справочное)

### Кривые намагничивания



1 – железо особо чистое;

2 – железо чистое (99,98% Fe);

3 – железо технически чистое (99,92% Fe);

4 – пермоля;

5 – никеля;

6 – сплава железо - никель (26% Ni).

## Приложение В (справочное)

График зависимости тангенса угла диэлектрических потерь от температуры на различных пропитывающих составах (испытательное напряжение 1 кВ)

