

Документ подписан простой электронной подписью  
Информация о владельце:  
ФИО: Шебзухова Татьяна Александровна  
Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского  
федерального университета  
Дата подписания: 19.07.2023 17:19:34  
Уникальный программный ключ:  
d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕ-  
НИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

**Методические указания**  
по выполнению лабораторных работ  
по дисциплине «ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕ-  
ДЕНИЕ»  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 2C00000043E9AB8B952205E7BA5000600000043E  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
  
Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

## Содержание

| №<br>п/п | Содержание                                                                                                                                                           | Стр. |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|          | Введение                                                                                                                                                             |      |
| 1.       | Цель и задачи изучения дисциплины                                                                                                                                    |      |
| 2.       | Оборудование и материалы                                                                                                                                             |      |
| 3.       | Наименование лабораторных работ                                                                                                                                      |      |
| 4.       | Содержание лабораторных работ                                                                                                                                        |      |
| 4.1      | Лабораторная работа № 1. Классификация веществ по электрическим свойствам. Определение температурного коэффициента сопротивления.                                    |      |
| 4.2      | Лабораторная работа № 2. Классификация веществ по электрическим свойствам. Измерение сопротивлений и определение удельных сопротивлений проводников.                 |      |
| 4.3      | Лабораторная работа № 3. Диэлектрики. Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляционных материалов.                      |      |
| 4.4      | Лабораторная работа № 4. Диэлектрики. Снятие поляризационной характеристики диэлектрика и её зависимости от температуры.                                             |      |
| 4.5      | Лабораторная работа № 5. Магнитные материалы. Снятие петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и построение основной кривой намагничивания. |      |
| 4.6      | Лабораторная работа № 6. Магнитные материалы. Снятие петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и определение точки Кюри.                    |      |
| 4.7      | Лабораторная работа № 7. Магнитные материалы. Снятие начальной кривой намагничивания ферромагнитных материалов и определение магнитной проницаемости.                |      |
| 5        | Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины                                                                                                          |      |
| 5.1      | Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины                                                                                   |      |
| 5.2      | Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине                                                                           |      |

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |  |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 5.3 | <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p style="text-align: center; margin: 0;">ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН<br/>ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ</p> <p style="margin: 0;">Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E</p> <p style="margin: 0;">Владелец: Шебзухов, Татьяна Александровна</p> <p style="margin: 0;">Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023</p> </div> |  |
|     | Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины                                                                                                                                                                                                                                                                  |  |

## Приложения

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

## Введение

Целью работы в лаборатории является углубление и закрепление приобретенных теоретических знаний путем экспериментальной проверки теоретических положений, а также знакомство с электронными компонентами, оборудованием, измерительными приборами и аппаратурой, используемыми в лаборатории.

В результате выполнения лабораторных работ студенты должны приобрести умения и навыки по сборке и исследованию электронных схем и приборов, измерениям электрических величин. Тематика лабораторных работ полностью соответствует содержанию основных разделов курса, изучаемого в высших технических учебных заведениях. В предлагаемом учебном пособии описано одиннадцать лабораторных работ. В описании каждой лабораторной работы сформулирована ее цель, изложены основные теоретические положения, описана схема установки для проведения экспериментального исследования, даны рекомендации по проведению опытов и обработке результатов измерений, а также контрольные вопросы.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

## 1. Цель и задачи изучения дисциплины

Целью дисциплины является изучение состава и свойств конструкционных и электротехнических материалов в зависимости от их химического состава, структуры и той среды, в которой им предстоит находиться или работать.

Задачами изучения дисциплины являются:

- знакомство с основными достижениями в области электротехнического и конструкционного материаловедения;
- понимание процессов и явлений, которые происходят в электротехнических и конструкционных материалах при различных воздействиях;
- умение влиять на свойства материалов с помощью технологических процессов, позволяющих предотвращать вредные воздействия окружающей среды в процессе работы соответствующего оборудования.

## 2. Оборудование и материалы

Аппаратные средства:

- Комплект учебно-лабораторного оборудования «Электротехнические материалы».

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения. Переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

## 3. Наименование лабораторных работ

Для заочной формы обучения предусмотрены следующие лабораторные работы: Лабораторная работа № 3. Диэлектрики. Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляционных материалов – 1,5 часа; Лабораторная работа № 6. Магнитные материалы. Снятие петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и определение точки Кюри – 1,5 часа.

| № Темы дисциплины | Наименование тем дисциплины, их краткое содержание                                                                                       | Объем часов | Из них практическая подготовка, часов |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------|
| 4 семестр         |                                                                                                                                          |             |                                       |
| 1                 | <b>Лабораторная работа № 1. Классификация веществ по электрическим свойствам. Определение температурного коэффициента сопротивления.</b> | 3           |                                       |

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННЫМ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 2C0000043E9AB8B952305E7BA500060000043E

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |     |  |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|--|
|   | Определение температурных коэффициентов сопротивления различных проводников и полупроводников, а также прямого напряжения р-п перехода кремниевого диода.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |  |
| 2 | <b>Лабораторная работа № 2. Классификация веществ по электрическим свойствам.</b> Измерение сопротивлений и определение удельных сопротивлений проводников.<br>В учебных целях определить материал проводника путём измерения его сопротивления и вычисления удельного сопротивления.                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 1,5 |  |
| 3 | <b>Лабораторная работа № 3. Диэлектрики.</b> Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляционных материалов.<br>Определение основных характеристик изоляционных материалов: относительной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ) и тангенса угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ). Приобретение навыков измерения параметров электрических цепей с помощью прибора Е7-22.                                                                                                                                                            | 3   |  |
| 4 | <b>Лабораторная работа № 4. Диэлектрики.</b> Снятие поляризационной характеристики диэлектрика и её зависимости от температуры.<br>Снять экспериментально кулон-вольтовую характеристику нелинейного конденсатора $q(u)$ при различных температурах. При одном из значений температуры рассчитать и построить поляризационную характеристику диэлектрика $P(E)$ , и зависимость относительной диэлектрической проницаемости от напряжённости электрического поля ( $E$ ), приняв площадь поверхности обкладки конденсатора $S = 300\text{мм}^2$ и толщину изоляции $d = 0,01\text{ мм}$ . | 1,5 |  |
| 5 | <b>Лабораторная работа № 5. Магнитные материалы.</b> Снятие петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и построение основной кривой намагничивания.<br>Получить на осциллографе петлю гистерезиса ферромагнетика, снять экспериментально основную кривую намагничивания, рассчитать и построить зависимость относительной магнитной проницаемости от напряжённости магнитного поля.                                                                                                                                                                               | 1,5 |  |
| 6 | <b>Лабораторная работа № 6. Магнитные материалы.</b> Снятие петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и определение точки Кюри.<br>Снять экспериментально петлю гистерезиса ферромагнетика при различных температурах,                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 1,5 |  |

Документ подписан  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                           |             |  |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--|
|   | определить температуру Кюри и намагниченность насыщения.                                                                                                                                                                                                                                  |             |  |
| 7 | <b>Лабораторная работа № 7. Магнитные материалы.</b> Снятие начальной кривой намагничивания ферромагнитных материалов и определение магнитной проницаемости.<br>Снять экспериментально начальную кривую намагничивания ферромагнетика, рассчитать и построить графики $B(H)$ и $\mu(H)$ . | 1,5         |  |
|   | <b>Итого за 4 семестр:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>13,5</b> |  |
|   | <b>Итого:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                             | <b>13,5</b> |  |

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

#### 4. Содержание лабораторных работ

##### **Лабораторная работа № 1. Классификация веществ по электрическим свойствам. Определение температурного коэффициента сопротивления.**

**Цель работы:** Определение температурных коэффициентов сопротивления различных проводников и полупроводников, а также прямого напряжения р-п перехода кремниевого диода.

##### **Основы теории:**

Температурный коэффициент электрического сопротивления – величина, равная относительному изменению электрического сопротивления участка электрической цепи или удельного сопротивления вещества при изменении температуры на единицу.

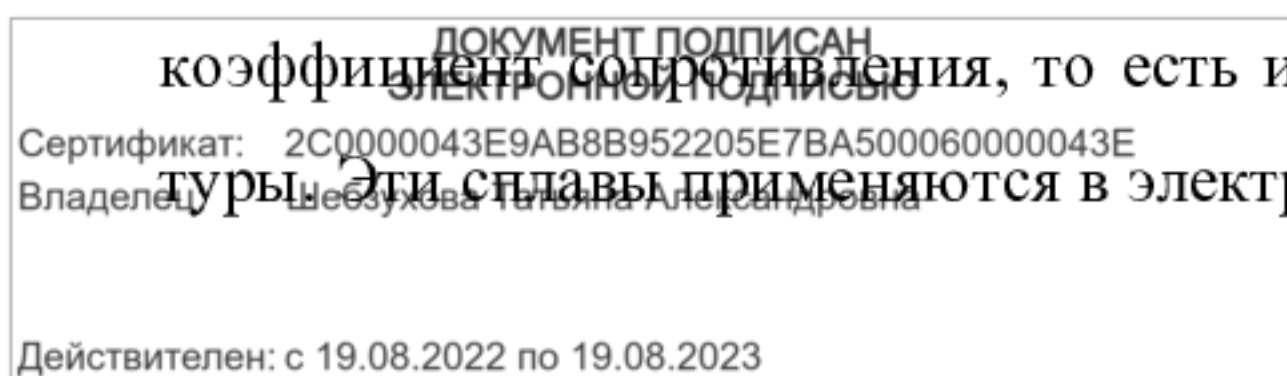
Температурный коэффициент сопротивления характеризует зависимость электрического сопротивления от температуры и измеряется в кельвинах в минус первой степени ( $K^{-1}$ ).

Для большинства металлов температурный коэффициент сопротивления положителен: их сопротивление растёт с ростом температуры, так как вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки с ростом температуры появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения свободных электронов под действием электрического поля, т. е. уменьшается средняя длина свободного пробега электрона  $\lambda$ , уменьшается подвижность электронов и, как следствие, уменьшается удельная проводимость металлов и возрастает удельное сопротивление.

Для полупроводников без примесей он отрицателен (сопротивление с ростом температуры падает), поскольку при повышении температуры всё большее число электронов переходит в зону проводимости, соответственно увеличивается и концентрация дырок. Качественно такой же характер (и по тем же причинам) имеет температурная зависимость сопротивления твёрдых и неполярных жидких диэлектриков. Полярные жидкости уменьшают своё удельное сопротивление с ростом температуры более резко вследствие роста степени диссоциации и уменьшения вязкости.

Температурная зависимость сопротивления металлических сплавов, газов, легированных полупроводников и электролитов носит более сложный характер.

Существуют сплавы (константан, манганин), имеющие очень малый температурный коэффициент сопротивления, то есть их сопротивление очень слабо зависит от температуры. Эти сплавы применяются в электроизмерительной аппаратуре.



Температурный коэффициент удельного сопротивления или средний температурный коэффициент удельного сопротивления выражается:

$$\alpha_{\rho} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dT}, \alpha = \frac{1}{\rho} \frac{\rho_2 - \rho_1}{T_2 - T_1}$$

где  $\rho_1, \rho_2$  – удельные сопротивления проводника при температурах  $T_1$  и  $T_2$  соответственно  $T_2 > T_1$ .

В технических справочниках обычно приводится величина  $\alpha$ , с помощью которой можно приближенно определить  $\rho$  при произвольной температуре  $T$ :

$$\rho = \rho_1(1 + \alpha_{\rho}(T - T_1))$$

Это выражение дает точное значение удельного сопротивления только для линейной зависимости  $\rho(T)$ . В остальных случаях этот метод является приближенным; он тем точнее, чем уже интервал температур, который использован для определения  $\alpha_{\rho}$ .

При выполнении эксперимента определяются температурные коэффициенты:

1. Полупроводникового резистора с положительным температурным коэффициентом (РТС). Используются резисторы КТ110, КТУ81 или аналогичные. Маркировка: «600.13-1; РТС».

2. Металлической пленки резисторов типа MF, С2-33Н или аналогичных. Маркировка: «600.19-1; MF».

3. Углеродной пленки резисторов типа CF, С2-14 или аналогичных. Маркировка: «600.19-2; С».

4. Полупроводникового резистора с отрицательным температурным коэффициентом (NTC). Используются резисторы В57861S, В57891М или аналогичные. Маркировка: «600.19-3; NTC».

5. Медного провода (термопреобразователь сопротивления медный типа дТС014-50М.В3.20/0,2. Номинальное сопротивление при  $0^{\circ}\text{C}$  – 50 Ом). Маркировка: «600.19-4; Cu».

6. Прямого напряжения р-п перехода кремниевого диода при постоянном токе. Используются диоды КД522, 1N4148 или аналогичные. Маркировка: «600.19-5; диод Si».

При выполнении работы используется электронагреватель (394.2). В блок встроены нагреватель с измерителем-регулятором температуры. Испытываемый образец вставляется в отверстие на лицевой панели нагревателя и с помощью мультиметра измеряется его выходное сопротивление или напряжение.

### Блок электронагревателя

Блок электронагревателя (рис. 1.1) используется для определения температурного коэффициента сопротивления различных материалов. Блок позволяет задать и автоматически поддерживать температуру нагревателя. В блоке установлен маломощный источник +5 В, используемый как дополнительный источник питания в некоторых экспериментах.

Слева от индикаторов 3 и 4 (рис. 1.1) на лицевой панели регулятора температуры установлены 4 светодиода

К1 – включен при нагреве;

K2 – не используется;

AL – индикатор превышения предельных значений (не используется).

RS – индикатор режима автоматического регулирования. Должен быть включен для нормальной работы блока в режиме автоматического регулирования. При выключении автоматического регулирования (см. ниже) прибор работает только как индикатор температуры нагревателя.

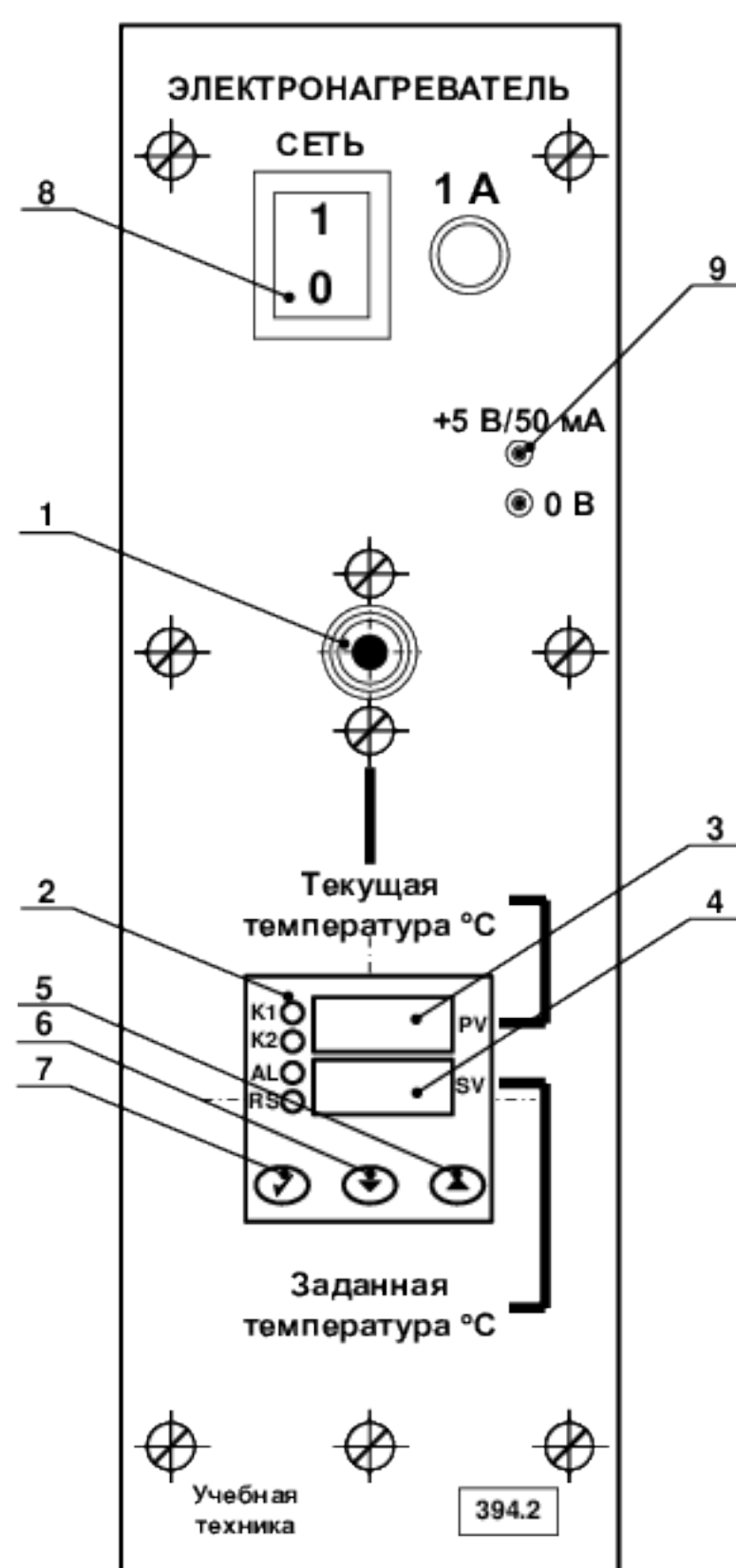


Рисунок 1.1 – Лицевая панель блока электронагревателя.

1 – отверстие нагревателя; 2 – измеритель-регулятор температуры; 3 – индикатор

текущего значения температуры нагревателя (PV); 4 – индикатор заданного значения тем-

температуры на регуляторе (SV), 5,6,7 – кнопки управления регулятором температуры; 8 – вы-

ключатель питания; 9 – гнезда источника питания +5 В.

текущего значения температуры нагрева  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 3600030048EFA3B895320557EAD40600000643E  
Владелец: Шибзухова Татьяна Александровна  
ключатель питания; 9  
Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

### ***Задание температуры электронагревателя.***

1. Нажать одну из кнопок управления 5 или 6 регулятора температуры 2 (рис. 1.1).

Начинает мигать индикатор заданного значения температуры нагревателя (SV, зеленый индикатор 4).

2. Для изменения заданного значения температуры повторно нажать кнопки 5 (уменьшение) или 6 (увеличение температуры). Удержание кнопки в течение некоторого времени включает режим автоматического ускоренного изменения значения. В процессе установки индикатор продолжает мигать.

3. После установки требуемого значения температуры необходимо однократно нажать кнопку 7 (рис. 1.1). Мигание индикатора 4 прекращается. Температура задана.

При выполнении экспериментов рекомендуется начинать с низких значений температуры (на 5...10° выше комнатной) и постепенно повышать её величину до 100° С, т. к. остывание электронагревателя происходит гораздо медленнее его нагрева.

### ***Включение (отключение) режима автоматического регулирования.***

При включении питания электронагревателя режим автоматического регулирования выключен. При выполнении экспериментов целесообразно задать начальное значение температуры и, после этого, включить режим автоматического регулирования.

Переключение режима автоматического регулирования:

1. Однократно нажать кнопку 7 (рис. 1.1) регулятора температуры. На индикаторе 3 (красный, PV) отобразится надпись «r-S». На индикаторе 4 (зеленый, SV) текущее состояние регулятора «StoP» (СТОП) или «rUn» (РАБОТА).

2. Для изменения состояния регулятора нажать любую из кнопок 5 или 6 – индикатор 4 начнет мигать. Повторное нажатие кнопки 5 или 6 переключит режим («StoP»↔«rUn»).

3. Нажатие кнопки 7 фиксирует выбранное значение (индикатор 4 не мигает). Повторное нажатие кнопки 7 возвращает регулятор температуры в исходное состояние – на индикаторе отображаются текущее и заданное значения температуры. Светодиод RS сигнализирует о состоянии регулятора: включен – режим «rUn» (РАБОТА), выключен - «StoP» (СТОП).

### ***Схема электрических соединений***

Схема электрических соединений при определении температурных коэффициентов сопротивления показана на рис. 1.2.

Все образцы подключаются к гнездам «VΩ» и «COM» мультиметра MY60T (блок

1416) и устанавливается один из пределов измерения сопротивления, соответствующий сопротивлению образца. При подключении кремниевого диода (образец 600.19-5, диод Si)

необходимо соблюдать полярность: анод (красный провод) подключается к гнезду «VΩ», а

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
Владелец: Шабалова Татьяна Александровна  
Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

катод (черный или синий провод) – к гнезду «COM». Для определения прямого напряжения на диоде в милливольтках используется предел измерения « $\rightarrow$ ». В этом случае через диод протекает постоянный прямой ток в диапазоне 1...1,5 мА. Точное значение тока можно измерить дополнительным мультиметром, включенным последовательно с испытываемым диодом.

Однофазный источник питания G1 предназначен для безопасного питания блока электронагревателя.

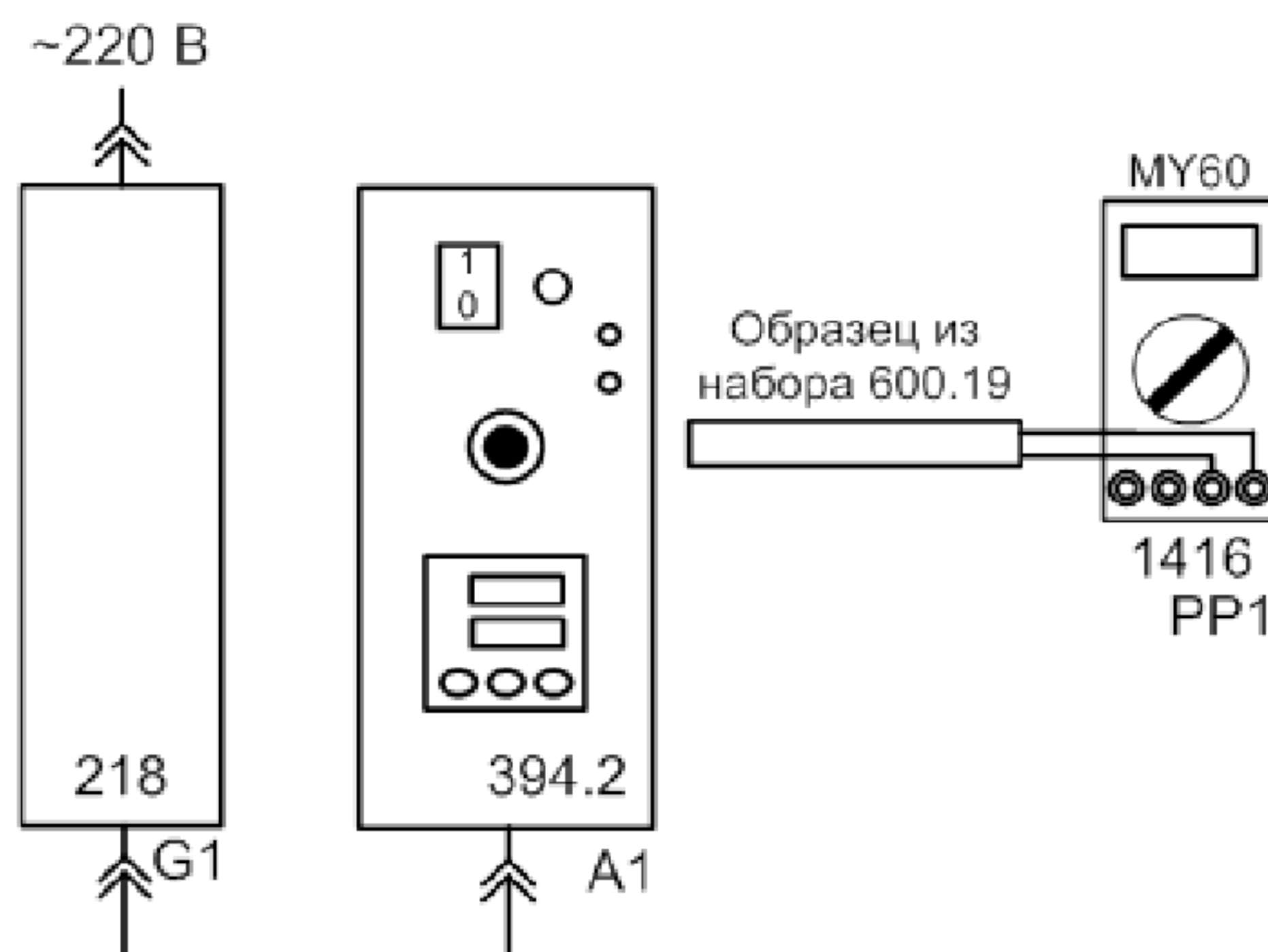


Рисунок 1.2 – Схема для определения температурного коэффициента сопротивления.

Все образцы подключаются к гнездам «VΩ» и «COM» мультиметра MY60T (блок 1416) и устанавливается один из пределов измерения сопротивления, соответствующий сопротивлению образца. При подключении кремниевого диода (образец 600.19-5, диод Si) необходимо соблюдать полярность: анод (красный провод) подключается к гнезду «VΩ», а катод (черный или синий провод) – к гнезду «COM». Для определения прямого напряжения на диоде в милливольтках используется предел измерения « $\rightarrow$ ». В этом случае через диод протекает постоянный прямой ток в диапазоне 1...1,5 мА. Точное значение тока можно измерить дополнительным мультиметром, включенным последовательно с испытываемым диодом.

| Обозначение | Наименование                | Тип    | Параметры                     |
|-------------|-----------------------------|--------|-------------------------------|
| G1          | Однофазный источник питания | 218    | ~ 220 В / 16 А                |
| A1          | Электронагреватель          | 394.2  | 30...100°C,<br>источник +5 В, |
|             | Набор образцов резисторов   | 600.19 | 6 образцов.                   |
| PP1         | Мультиметр                  | 1416   | MY60T                         |

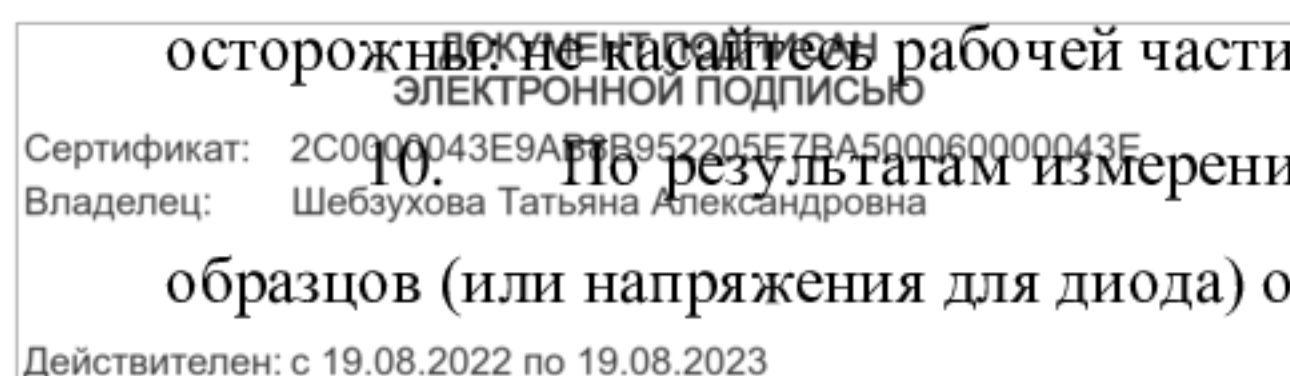
**Указание по технике безопасности:**

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

**Указания по выполнению лабораторной работы:**

1. Проверьте схему электропитания блоков электронагревателя и источника питания G1. Убедитесь, что выключатели «СЕТЬ» этих блоков отключены.
2. Соедините блоки в соответствии со схемой электрической соединений рис. 1.2.
3. Выберите значения температуры, при которых Вы хотите измерить сопротивления образцов. Из-за инерционности нагревателя целесообразно выбрать не более 5...7 точек в диапазоне температур до 100°C. Начальное значение – комнатная температура.
4. Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.
5. Включите выключатель «СЕТЬ» блока электронагревателя.
6. При включении питания автоматический режим регулятора температуры электронагревателя выключен. Установите требуемую температуру (см. раздел «Блок электронагревателя»). Включите автоматический режим регулятора температуры. Начнется разогрев нагревателя (включены светодиоды индикаторов K1 и RS).
7. Измерьте сопротивление образцов при комнатной температуре. Для исключения нагрева образцов от рук их необходимо брать за корпус вблизи выводов.
8. После стабилизации температуры нагревателя вблизи заданного значения поочередно вставьте каждый из образцов в отверстие нагревателя до упора. Выждите 2..3 минуты для стабилизации температуры и измерьте сопротивление образца.
9. Задайте следующее значение температуры, дождитесь её стабилизации и повторите измерения сопротивления образцов. При высоких температурах образцов будьте осторожны, не касайтесь рабочей части образца, извлеченного из нагревателя.

10. По результатам измерений постройте графики зависимостей сопротивления образцов (или напряжения для диода) от температуры.



11. По завершении измерений отключите питание всех блоков.
12. По результатам испытания отберите образцы, имеющих линейную зависимость сопротивления от температуры, и вычислите их температурный коэффициент сопротивления

$$\alpha = \frac{R(t_2) - R(t_1)}{R(t_1) \cdot t_2 - R(t_2) \cdot t_1}$$

где  $R(t_2)$ ,  $R(t_1)$  - сопротивление образца, соответственно при температуре  $t_2$  и  $t_1$ .

$\alpha$  [ $град^{-1}$ ] - температурный коэффициент сопротивления образца.

Сопротивление образца при произвольной температуре  $t$  вычисляется по формуле:

$$R(t) = R(t_1) \cdot \frac{1 + \alpha \cdot t}{1 + \alpha \cdot t_1}$$

При определении сопротивления только одного образца порядок выполнения эксперимента можно изменить.

- Соберите схему рис. 1.2.
- Установите испытываемый образец в отверстие нагревателя.
- Задайте температуру  $100^{\circ}\text{C}$  и включите автоматический режим регулятора температуры («rUn», режим «РАБОТА», индикатор RS включен). Дождитесь установления заданной температуры и выключите автоматический режим регулятора («StoP», режим «СТОП», индикатор RS выключен).
- По мере снижения температуры нагревателя измерьте сопротивление образца (или напряжение для диода) при нескольких значениях температуры в диапазоне  $100...30^{\circ}\text{C}$ . Ориентировочное время остывания датчика  $15...30$  мин.
- Обработайте результаты эксперимента в соответствии с приведенными выше рекомендациями.

| T, $^{\circ}\text{C}$ | 30 | 40 | 60 | 80 | 90 | 100 |
|-----------------------|----|----|----|----|----|-----|
| PTC600                |    |    |    |    |    |     |
| Cu                    |    |    |    |    |    |     |
| NTC                   |    |    |    |    |    |     |
| MF                    |    |    |    |    |    |     |
| Si                    |    |    |    |    |    |     |
| С                     |    |    |    |    |    |     |

Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

### ***Содержание отчета:***

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Какова зависимость сопротивления полупроводников и металлов от температуры?
2. Чем отличаются металлы, диэлектрики и полупроводники по своим электрическим свойствам?
3. Почему при низких температурах металлы являются хорошими проводниками, а полупроводники плохими? Каково сопротивление полупроводников при  $T = 0 \text{ K}$ ?
4. Что называют энергией активации полупроводника? Какие величины зависят от этой характеристики полупроводника?

**Лабораторная работа № 2. Классификация веществ по электрическим свойствам. Измерение сопротивлений и определение удельных сопротивлений проводников.**

**Цель работы:** В учебных целях определить материал проводника путём измерения его сопротивления и вычисления удельного сопротивления

**Основы теории:**

При замыкании электрической цепи, на зажимах которой имеется разность потенциалов, возникает электрический ток. Свободные электроны под влиянием электрических сил поля перемещаются вдоль проводника. В своем движении свободные электроны наталкиваются на атомы проводника и отдают им запас своей кинетической энергии. Таким образом, электроны, проходя по проводнику, встречают сопротивление своему движению. При прохождении электрического тока через проводник последний нагревается.

Электрическим сопротивлением проводника обусловлено явление преобразования электрической энергии в тепловую при прохождении электрического тока по проводнику.

Длинный проводник малого поперечного сечения создает току большое сопротивление. Короткие проводники большого поперечного сечения оказывают току малое сопротивление. Если взять два проводника из разного материала, но одинаковой длины и сечения, то проводники будут проводить ток по-разному. Это показывает, что сопротивление проводника зависит от материала самого проводника. Температура проводника тоже оказывает влияние на его сопротивление. С повышением температуры сопротивление металлов увеличивается, а сопротивление жидкостей и угля уменьшается. Только некоторые специальные металлические сплавы (манганин, константан, никелин и др.) с увеличением температуры своего сопротивления почти не меняют.

Итак, мы видим, что электрическое сопротивление проводника зависит от длины проводника, поперечного сечения проводника, материала проводника, температуры проводника.

При сравнении сопротивлений проводников из различных материалов необходимо брать для каждого образца определенную длину и сечение. Тогда мы сможем судить о том, какой материал лучше или хуже проводит электрический ток.

Сопротивление (в омах) проводника длиной 1 м, сечением 1 мм<sup>2</sup> называется удельным сопротивлением и обозначается греческой буквой  $\rho$ .

Удельное сопротивление проводника можно определить по формуле:

|                                           |                                        |
|-------------------------------------------|----------------------------------------|
| ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН<br>ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ |                                        |
| Сертификат:                               | 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E |
| Владелец:                                 | Шебаужава Татьяна Александровна        |
| Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023  |                                        |

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

где  $R$  – сопротивление проводника, измеренное при температуре  $20^0\text{C}$ , Ом;

$S$  – постоянное поперечное сечение проводника,  $\text{мм}^2$ ;

$l$  – длина в м.

Вместо единицы  $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  предпочтительно применять равную ей по размеру единицу СИ  $\text{мкОм} \cdot \text{м}$ . Связь между названными единицами удельного сопротивления:

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

В качестве основных проводниковых материалов применяют:

1) материалы высокой проводимости, используемые для изготовления всевозможных обмоток электрических машин, аппаратов и приборов и передачи электрической энергии; от этих материалов требуется, возможно, меньшая величина электрического сопротивления;

2) сплавы высокого сопротивления, используемые для изготовления всевозможных сопротивлений, нагревательных приборов, термопар и др.

К материалам высокой проводимости предъявляют следующие требования: возможно большая проводимость (возможно меньшее удельное сопротивление); возможно меньший температурный коэффициент удельного сопротивления; достаточно высокие механическая прочность, в частности предел прочности при растяжении и удлинение при разрыве; способность легко обрабатываться прокаткой и волочением для изготовления проводов; способность хорошо свариваться и спаиваться, создавая при этом надежные соединения с малым электрическим сопротивлением; достаточная коррозионная устойчивость. Для разных случаев применения эти требования в той или иной степени варьируют. Например, для большинства обмоток электрических машин, аппаратов и проводов выгодней иметь, возможно, меньшее удельное сопротивление, даже если за счет его снижения несколько снизится и предел прочности при растяжении; для троллейных (контактных) воздушных проводов, работающих на разрыв и на истирание, особое значение приобретают повышенные предел прочности при растяжении, твердость, стойкость против истирания.

Значения удельного сопротивления  $\rho$ ,  $\text{мкОм} \cdot \text{м}$  некоторых металлов приведенные ниже:

|        |       |
|--------|-------|
| Олово  | 0,076 |
| Кадмий | 0,210 |
| Свинец | 0,059 |
| Цинк   | 0,045 |

|                                           |                                        |
|-------------------------------------------|----------------------------------------|
| ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН<br>ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ |                                        |
| Сертификат:                               | 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E |
| Владелец:                                 | Шебзухова Татьяна Александровна        |
| Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023  |                                        |



**Указание по технике безопасности:**

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

**Указания по выполнению лабораторной работы:**

Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.

Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений (рис. 2.1). При этом миниблок «**R1**» установите в наборную панель и подключите его к измерителю R, L, C. Подключите блок питания 224.1 к разъему на верхней стороне корпуса прибора Е7-22. Вилку блока питания подключите к свободной розетке однофазного источника питания (218).

Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.

Если прибор Е7-22 (измеритель R, L, C) не включился, кратковременно нажмите левую верхнюю кнопку на лицевой панели прибора - ❶.

Выберите вид измеряемого параметра, нажимая кнопку «L/C/R» пока на дисплее слева не появится символ R. Запишите значение сопротивления, которое показывает прибор в табл. 2.1.

Измените частоту, нажимая кнопку «ЧАСТ», и убедитесь, что на обеих частотах прибор показывает одно и то же значение сопротивления.

Замените миниблок «**R1**» миниблоком «**R2**» и аналогично измерьте сопротивление установленного в нём резистора.

Вычислите удельные сопротивления испытываемых проводников по формуле:

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

Таблица 2.1

| Миниблок      | R, Ом | $\rho, \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ | Материал<br>(предположительно<br>по справочнику) |
|---------------|-------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| « <b>R1</b> » |       |                                                      |                                                  |
| « <b>R2</b> » |       |                                                      |                                                  |

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

***Содержание отчета:***

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

***Контрольные вопросы:***

1. Почему удельное сопротивление проводника зависит от рода материала?
2. Зависит ли удельное сопротивление от температуры?
3. Как изменится напряжение на участке электрической цепи, если медную проволоку на этом участке заменить никелевой?
4. Назвать известные вам методы определения сопротивления резистора?
5. Как электронная теория электропроводности металлов объясняет природу электрического сопротивления?
6. Почему наличие примесей в металле приводит к увеличению удельного сопротивления проводника?

### ***Лабораторная работа № 3. Диэлектрики. Определение диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь изоляционных материалов.***

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

#### ***Основы теории:***

Потери энергии в диэлектрике называются диэлектрическими потерями.

Диэлектрические потери по их особенностям и физической природе можно подразделить на четыре основных вида:

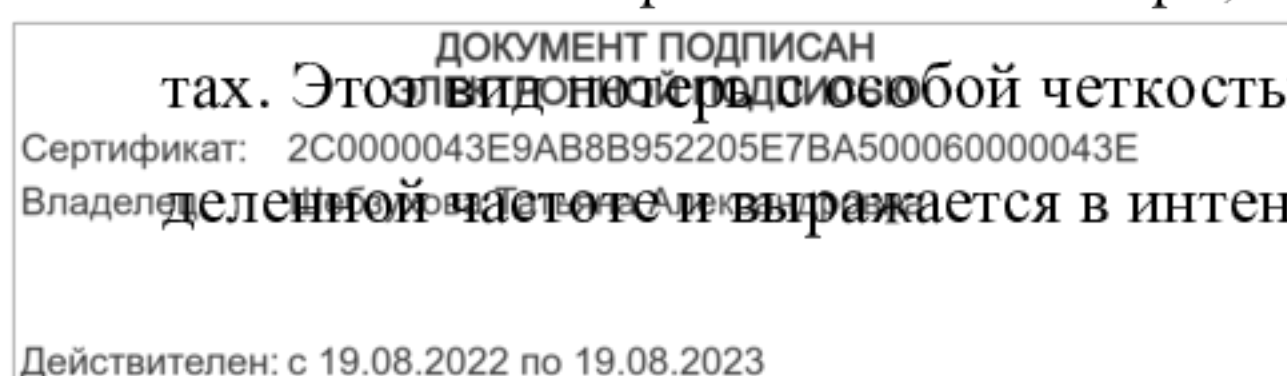
- 1) диэлектрические потери, обусловленные поляризацией;
- 2) диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью;
- 3) ионизационные диэлектрические потери;
- 4) диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры.

Диэлектрические потери, обусловленные поляризацией особенно отчетливо наблюдаются в веществах, обладающих релаксационной поляризацией: в диэлектриках дипольной структуры и в диэлектриках ионной структуры с неплотной упаковкой ионов.

Релаксационные диэлектрические потери обусловлены нарушением движения частиц под влиянием сил электрического поля.

В температурной зависимости тангенса угла релаксационных диэлектрических потерь наблюдается максимум при некоторой температуре, характерной для данного вещества. При этой температуре время релаксации диэлектрика примерно совпадает с периодом изменения приложенного электрического поля. Если температура такова, что время релаксации частиц значительно больше полупериода изменения приложенного переменного напряжения, то тепловое движение частиц будет менее интенсивным и потери уменьшатся; если температура такова, что время релаксации частиц значительно меньше полупериода изменения напряжения, то интенсивность теплового движения будет больше, связь между частицами уменьшится, в результате чего потери также снизятся.

К диэлектрическим потерям обусловленным поляризацией, следует отнести также так называемые резонансные потери, проявляющиеся в диэлектриках при высоких частотах. Это явление сопровождается четкостью наблюдается в некоторых газах при строго определенном частоте и выражается в интенсивном поглощении энергии электрического поля.



Резонансные потери возможны и в твердых веществах, если частота вынужденных колебаний, вызываемых электрическим полем, совпадает с частотой собственных колебаний частиц твердого вещества. Наличие максимума в частотной зависимости  $\operatorname{tg}\delta$  характерно также и для резонансного механизма потерь, однако в данном случае температура не влияет на положение максимума.

Диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью, обнаруживаются в диэлектриках, имеющих заметную объемную или поверхностную проводимость. Диэлектрические потери этого вида не зависят от частоты поля;  $\operatorname{tg}\delta$  уменьшается с частотой по гиперболическому закону.

Диэлектрические потери, обусловленные электропроводностью, возрастают с температурой по экспоненциальному закону  $P_{aT}=A \cdot \exp(-b/T)$ , где  $A$ ,  $b$  – постоянные материала.

Ионизационные диэлектрические потери свойственны диэлектрикам в газообразном состоянии. Ионизационные потери проявляются в неоднородных электрических полях при напряженностях, превышающих значение, соответствующее началу ионизации данного газа. Ионизационные потери можно вычислить по формуле

$$P_{a.u}=A_1 \cdot f \cdot (U-U_u)^3,$$

где  $A_1$ - постоянные коэффициент;

$f$ - частота поля;

$U$ - приложенное напряжение;

$U_u$ – напряжение, соответствующее началу ионизации.

Ионизационное напряжение  $U_u$  зависит от давления, при котором находится газ, поскольку развитие ударной ионизации молекул связано с длиной свободного пробега носителей заряда.

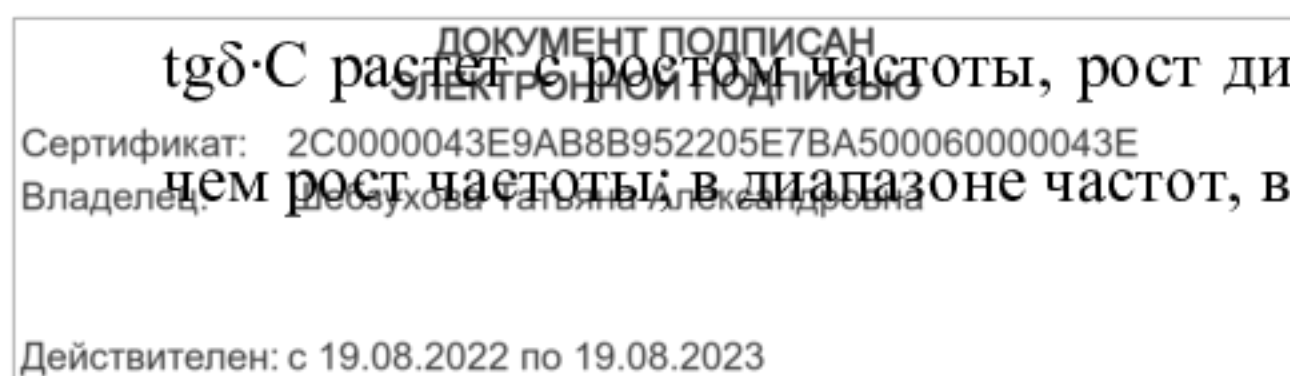
Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры, наблюдаются в слоистых диэлектриках, из пропитанной бумаги и ткани, в пластмассах с наполнителем, в пористой керамике, в миканитах и т.д.

Тангенс угла диэлектрических потерь имеет очень важное значение как электрическая характеристика диэлектрика. Мощность диэлектрических потерь прямо пропорциональна частоте:

$$P= \operatorname{tg}\delta \cdot \omega \cdot C \cdot U^2, \text{ Вт}$$

Однако, следует иметь ввиду, что и  $\operatorname{tg}\delta$  и  $C$  зависят от частоты, причем большим изменениям может подвергаться величина  $\operatorname{tg}\delta$ . В диапазоне частот, в котором произведение

$\operatorname{tg}\delta \cdot C$  растет с ростом частоты, рост диэлектрических потерь будет происходить быстрее, чем рост частоты; в диапазоне частот, в котором произведение  $\operatorname{tg}\delta \cdot C$  уменьшается с ростом



частоты, величина диэлектрических потерь может увеличиваться с ростом частоты более медленно.

Как правило, при высоких частотах диэлектрические потери больше, чем при низких, что создает определенные трудности при выборе электроизоляционных материалов для высокочастотной техники. В высокочастотной технике вместо  $\operatorname{tg}\delta$  часто пользуются понятием добротности изоляции, которую обозначают обычно величиной  $Q$ , обратной величине  $\operatorname{tg}\delta$ .

Тангенс угла диэлектрических потерь, или добротность, могут характеризовать не только конкретный материал, но и изоляционную конструкцию машины, аппарата или прибора в целом. Величина  $\operatorname{tg}\delta$  для большинства жидких и твердых диэлектриков колеблется в пределах от десятитысячных до десятых долей единицы.

Так же одной из важнейших характеристик диэлектрика является его относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$ . Эта величина представляет собой отношение заряда  $Q$ , полученного при некотором напряжении на конденсаторе, содержащем данный диэлектрик, к заряду  $Q_0$ , который можно было бы получить в конденсаторе тех же размеров и при том же направлении, если бы между электродами находился вакуум.

Относительная диэлектрическая проницаемость вещества не зависит от выбора системы единиц. Для вакуума диэлектрическую проницаемость принимают за единицу, а для любого другого вещества она всегда больше единицы. Относительная диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз емкость конденсатора с данным диэлектриком больше емкости аналогичного вакуумного конденсатора.

Для определения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь различных изоляционных материалов измеряются параметры последовательной схемы замещения конденсатора ( $C$  и  $R$ ) с диэлектриком из испытываемого материала. Схема электрическая соединений для измерения параметров конденсатора приведена на рис. 3.1. 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.

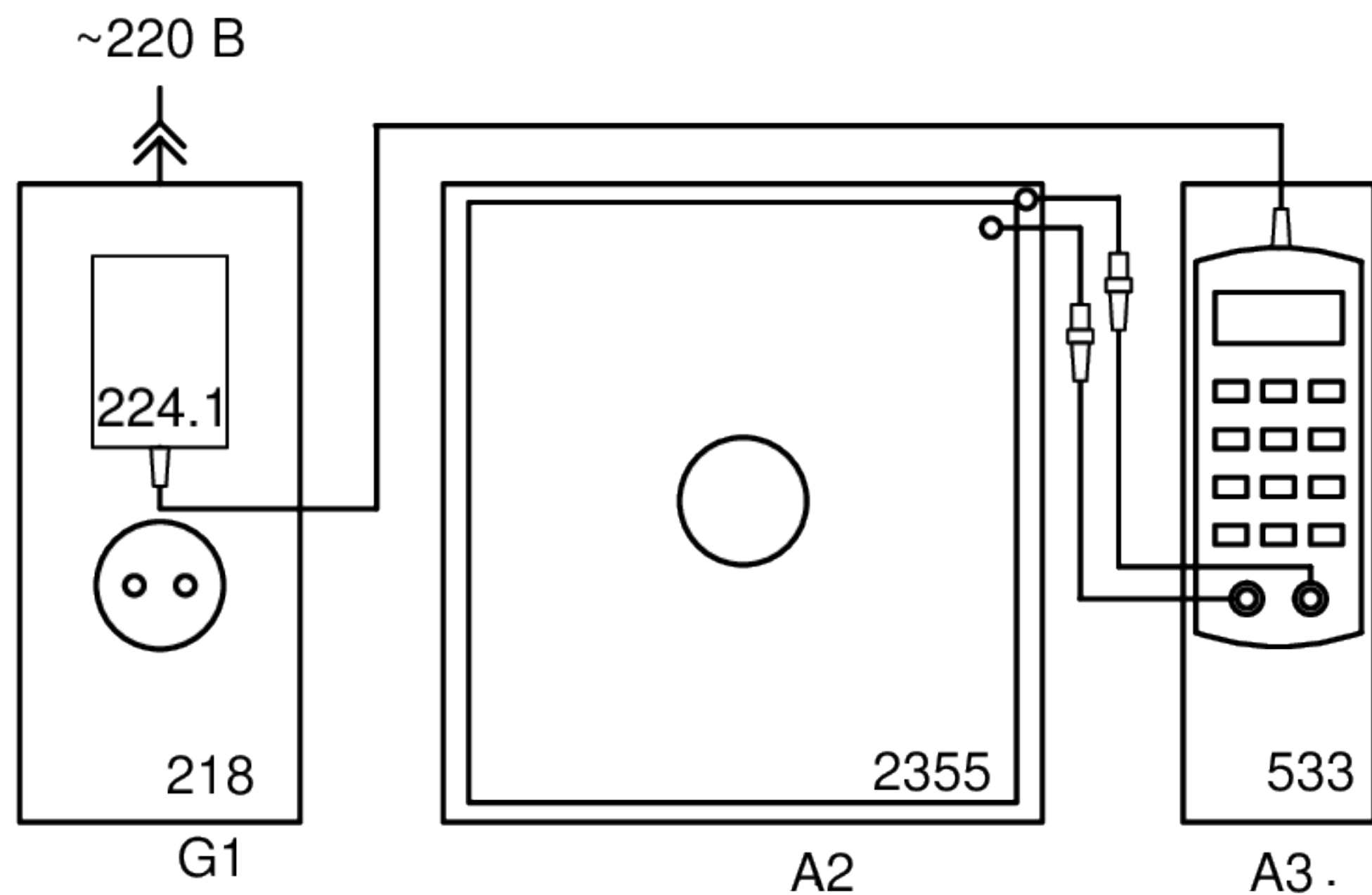


Рисунок 3.1 – Схема электрическая соединений для измерения параметров конденсатора с испытываемым диэлектриком.

Для вычисления относительной диэлектрической проницаемости испытываемого диэлектрика измеренная емкость  $C$  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  $C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$ . Отношение емкостей

$$\frac{C}{C_0} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S/d}{\varepsilon_0 S/d} = \varepsilon ,$$

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  $\omega$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R}{1/\omega C} ,$$

т. е. тангенс диэлектрических потерь равен отношению активного ( $R$ ) и емкостного ( $1/\omega C$ ) сопротивлений цепи. Отсюда можно определить сопротивление  $R$  последователь-

ной схемы замещения конденсатора:

Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

$$R = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega C} .$$

| Обозначение | Наименование                | Тип    | Параметры                                    |
|-------------|-----------------------------|--------|----------------------------------------------|
| G1          | Однофазный источник питания | 218    | $\sim 220 \text{ В} / 16 \text{ А}$          |
| A3          | Измеритель R-L-C            | 533    | Измерение R, L, C при частоте 120 Гц и 1 кГц |
| A2          | Блок конденсатора           | 2355   | Площадь пластин<br>790 кв. см                |
|             | Набор образцов диэлектриков | 600.20 | Образцы диэлектриков размером 285x297 мм     |

**Указание по технике безопасности:**

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

**Указания по выполнению лабораторной работы:**

- Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.
- Подключите блок питания 224.1 к блоку «Измеритель R-L-C» (533) и к розетке «220 В» однофазного источника питания G1 (блок 218) в соответствии со схемой 3.1.
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.

- Включите выключатель ❶ «Измерителя R-L-C» (533).

Выберите:

- вид измеряемого параметра – емкость C (кнопка «L/C/R»);
- вспомогательный измеряемый параметр – тангенс дельта D (кнопка «Q/D/R»);
- схему замещения элемента – последовательную (кнопка «ПАР/ПОСЛ», «SER» на индикаторе);
- частоту измерения – 120 Гц (кнопка «ЧАСТ»).
- Вложите испытываемый образец диэлектрика между пластинами конденсатора и подключите конденсатор к измерителю RLC, как показано на рис. 3.1. Верхнюю пластину блока конденсатора 2355 необходимо установить примерно по центру нижней пластины с равномерным отступом от краев по всему периметру пластины.
- На расстоянии менее 10...15 см от блока конденсаторов 2355 не должно быть посторонних и электропроводных предметов. **Недопустима подача напряжения от внешних источников на вход прибора и пластины блока конденсатора!**

- Измерьте емкость C и  $tg\delta$  (D) конденсатора 2355 с диэлектриком.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННО  
Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

- Вычислите емкость конденсатора без диэлектрика  $C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{d}$ . Площадь  $S$  указана на верхней пластине конденсатора 2355, а расстояние между пластинами  $d$  равно толщине диэлектрика, указанной на испытываемом образце.

- Вычислите относительную диэлектрическую проницаемость испытываемого диэлектрика и сопротивление последовательной схемы замещения

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}, R = \frac{tg \delta}{\omega C}$$

- Занесите результаты измерений в табл. 3.1 и повторите измерения для других образцов диэлектриков.

- Выключите питание блока G1 (218).

Таблица 3.1

| Образец | C, пФ | $tg d$ | $\varepsilon$ | R, Ом |
|---------|-------|--------|---------------|-------|
|         |       |        |               |       |
|         |       |        |               |       |
|         |       |        |               |       |

### Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

### Контрольные вопросы:

1. Что называется диэлектрическими потерями?
2. Какие виды потерь Вы знаете?
3. Что характеризует относительная диэлектрическая проницаемость?
4. Согласно проведенным испытаниям определите, какой из изоляционных материалов обладает наилучшими свойствами?

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН

Электронная подпись

Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E

Владелец: ИББ «Информационно-бытовой сервис»

Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

5. Что характеризует тангенс угла диэлектрических потерь? Каким показателем можно еще оценить качество изоляции?

## **Лабораторная работа № 4. Диэлектрики. Снятие поляризационной характеристики диэлектрика и её зависимости от температуры.**

**Цель работы:** Снять экспериментально кулон-вольтовую характеристику нелинейного конденсатора  $q(u)$  при различных температурах. При одном из значений температуры рассчитать и построить поляризационную характеристику диэлектрика  $P(E)$ , и зависимость относительной диэлектрической проницаемости от напряжённости электрического поля  $\epsilon(E)$ , приняв площадь поверхности обкладки конденсатора  $S = 300 \text{ мм}^2$  и толщину изоляции  $d = 0,01 \text{ мм}$ .

### **Основы теории:**

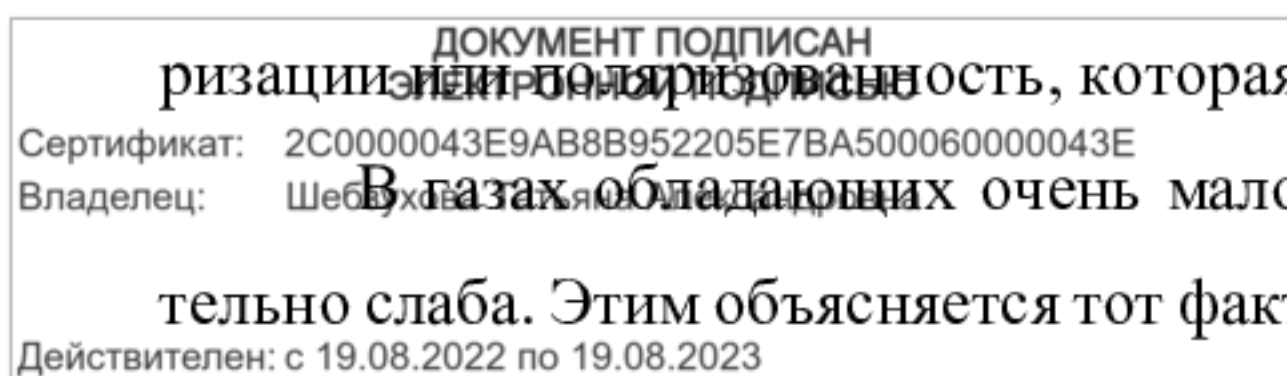
Обратимое поглощение энергии диэлектриком при создании электрического поля связано с определенным состоянием, которое характеризуется изменением формы орбит электронов в атомах или ионах (в зависимости от структуры диэлектрика). В электрическом поле электроны будут испытывать притяжение со стороны положительных зарядов одного из электродов и отталкивание со стороны отрицательных зарядов другого, в силу чего произойдет некоторое смещение их по направлению к положительному электроду. Это смещение электронов внутри атомов или ионов называется электронной поляризацией. Она превращает каждый атом или ион в диполь, так как центры положительного и отрицательного зарядов уже не будут совпадать и между ними появится некоторое расстояние  $l$ .

Большинство диэлектриков характеризуется линейной зависимостью электрического смещения от напряженности электрического поля, созданного в диэлектрике. Особую группу составляют диэлектрики, в которых с изменением напряженности поля смещение меняется нелинейно, обнаруживая насыщение при некотором значении напряженности поля. Такие диэлектрики называются *сегнетоэлектриками*. Наименование «сегнетоэлектрик» связано с тем, что нелинейность поляризации впервые была обнаружена у сегнетовой соли.

Поляризованная частица будет обладать элементарным электрическим моментом, определяющим уравнением  $\mu = q \cdot l$ , где  $q$  - элементарный заряд

Сумма элементарных электрических моментов в единице объема данного поляризованного диэлектрика численно определяет собой так называемую интенсивность поляризации или поляризованность, которая в большей степени зависит от плотности тела.

В газах обладающих очень малой плотностью, электронная поляризация сравнительно слаба. Этим объясняется тот факт, что у всех газов диэлектрическая проницаемость



очень мало отличается от единицы и в небольшой степени зависит от плотности. В жидких и твердых телах интенсивность электронной поляризации значительно выше.

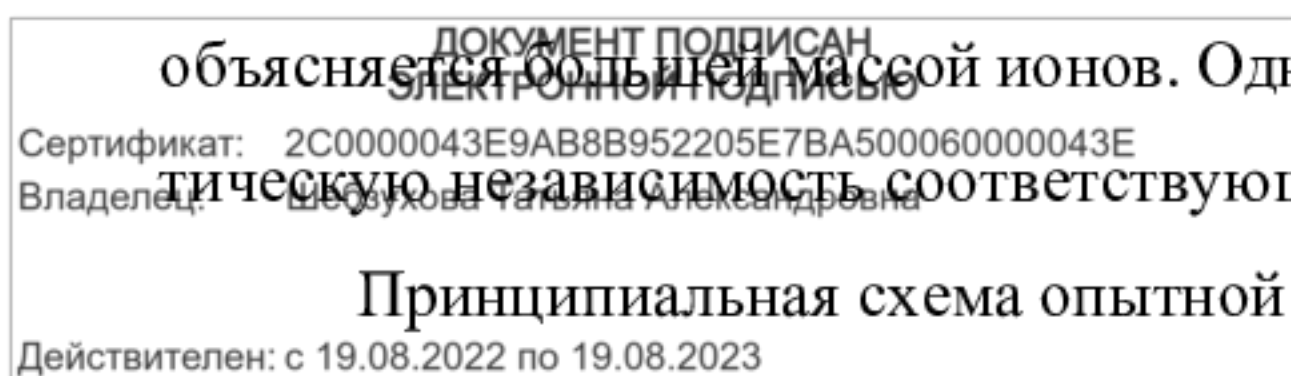
С увеличением температуры поляризованность при электронной поляризации уменьшается за счет расширения тела.

Диэлектрическая проницаемость при электронной поляризации не зависит от частоты: даже при очень малой продолжительности половины периода электроны успевают сместиться до предела, поэтому для завершения поляризации требуется очень небольшое время, порядка  $10^{-15}$ - $10^{-16}$  сек. Смещение электронов при электронной поляризации носит чисто упругий характер, и при исчезновении электрического поля – при разрядке конденсатора – электроны возвращаются в свое исходное состояние, причем весь процесс происходит без необратимого поглощения энергии. Энергия, израсходованная при создании электрического поля за счет электронной поляризации, т.е. энергия заряженного конденсатора, вся освобождается в процессе разряда – в процессе распада электрического поля.

Кроме электронной поляризации, в некоторых твердых диэлектриках может быть и другой вид поляризации – ионная характерна для ионных кристаллов. Сущность данной поляризации заключается в смещении ионов электрическим полем: положительных в сторону отрицательного электрода, отрицательных – в сторону положительного иона. Это смещение происходит на незначительные расстояния от положения равновесия при отсутствии электрического поля и носит упругий характер. Однако, в ионных кристаллах с рыхлой структурой, т.е. с неплотной упаковкой частиц, когда расстояние между ионами в узлах кристаллической решетки велики по сравнению с радиусами самих ионов, смещение последних может быть довольно велико. При этом возникают значительные суммарные электрические моменты в единице объема и наблюдается значительное возрастание емкости. Следовательно, такой диэлектрик будет иметь диэлектрическую проницаемость, намного превосходящую ее значение, обусловленное одной электронной поляризацией. Г.И. Сканави, изучая явление ионной поляризации, обнаружил у минерала перовскита диэлектрическую проницаемость, равную 160. Позднее им же были получены керамические материалы, у которых вследствие интенсивной поляризации ионного смещения диэлектрическая проницаемость имеет еще большее значение. Указанные материалы представляют большой интерес для практики, так как дают возможность получать конденсаторы с большой удельной емкостью в единице объема.

Время установления ионной поляризации несколько больше, чем электронной, что объясняется большей массой ионов. Однако оно достаточно мало, чтобы обеспечить практически независимость соответствующей диэлектрической проницаемости от частоты.

Принципиальная схема опытной установки изображена на рис. 4.1.



Синусоидальное напряжение подаётся через повышающий трансформатор на цепь, состоящую из последовательно соединённых линейного конденсатора  $C_1$  и нелинейного конденсатора  $C_0$  типа K10-17 с изоляцией из сегнетоэлектрика. (Повышающий трансформатор необходим для достижения насыщения диэлектрика.) Заряды на этих конденсаторах одинаковы и пропорциональны напряжению  $u_1$ :

$$q = C_1 u_1.$$

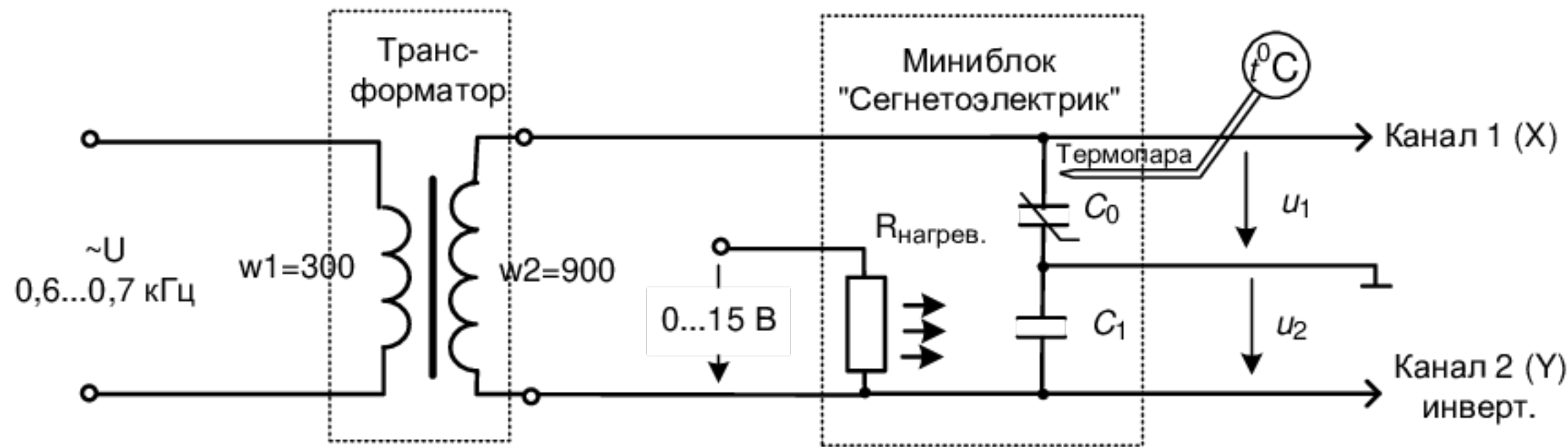


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема для снятия кулон-вольтовой характеристики конденсатора

Напряжение  $u_1$  подаётся на вертикальный вход осциллографа, а  $u_2$  - на горизонтальный. Сигнал  $u_1$  на осциллографе необходимо инвертировать, чтобы положительному напряжению соответствовало отклонение луча на дисплее вверх. На экране осциллографа появляется зависимость  $q(u)$  для нелинейного конденсатора, примерный вид которой для разных температур показан на рис. 4.2. По ней можно рассчитать поляризационную характеристику  $P(E)$ .

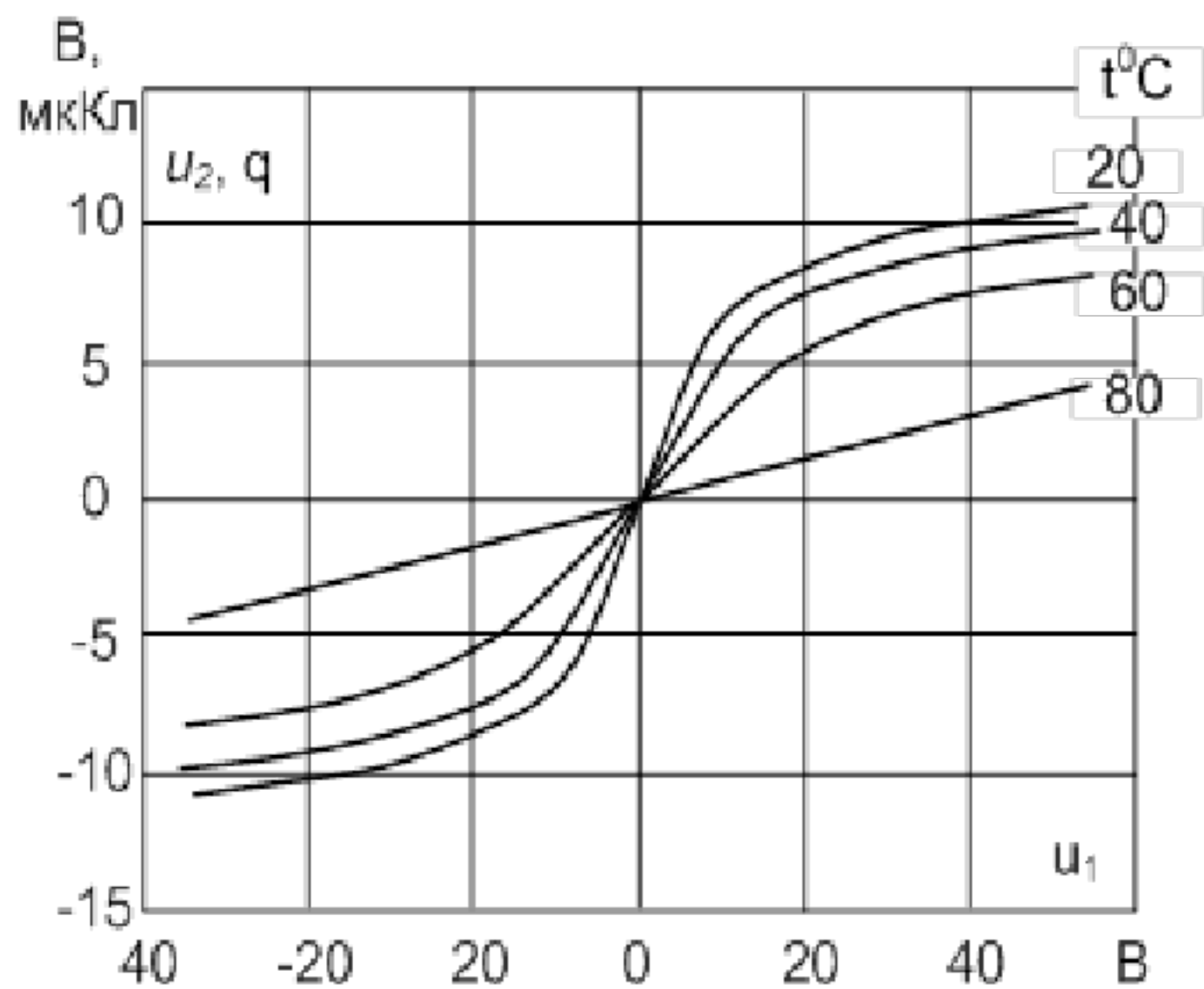


Рисунок 4.2 – Примерный вид кулон-вольтовой характеристики нелинейного кон-

денсатора при разных температурах

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
Электронно  
Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

Нагревание конденсатора осуществляется специальным резистором  $R_{\text{нагр.}}$  от регулируемого источника постоянного напряжения. Измерение температуры производится с помощью термопары мультиметром МУ60Т.

Точка Кюри диэлектрика конденсатора К10-17 лежит в области отрицательных температур, поэтому в данной работе она не определяется.

Для сборки схемы используется наборная панель блока генераторов напряжений, как показано на монтажной схеме (рис. 4.3).

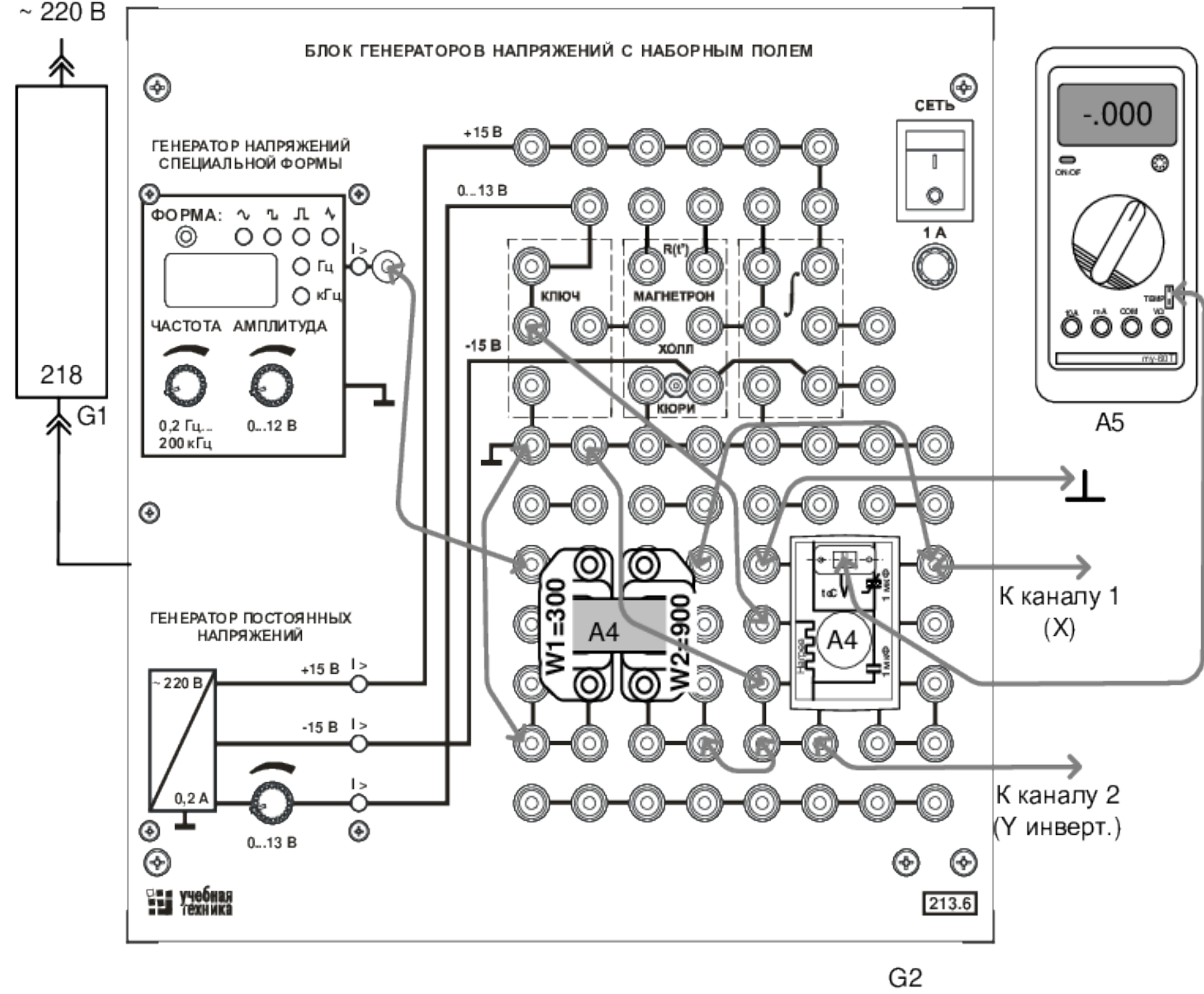


Рисунок 4.3 – Монтажная схема для снятия кулон-вольтых характеристик нелинейного конденсатора при разных температурах

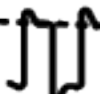
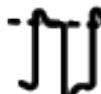
| Обозначение | Наименование                                    | Тип    | Параметры                                                             |
|-------------|-------------------------------------------------|--------|-----------------------------------------------------------------------|
| G1          | Однофазный источник питания                     | 218    | ~ 220 В / 16 А                                                        |
| G2          | Блок генераторов напряжений                     | 213.6  | ±15 В, 0...+13 В, ~0...12 В, Л 12В. 0,2 Гц...200 кГц                  |
| A4          | Набор миниблоков «Электротехнические материалы» | 600.18 | Миниблоки «Сегнетоэлектрик» и «Трансформатор с разъемным сердечником» |
| A5          | Мультиметр                                      | 1416   | Цифровой мультиметр МУ60Т                                             |
|             | USB осциллограф                                 |        |                                                                       |
|             | Ноутбук                                         |        |                                                                       |

Документ подписан  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500161000043E  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

### **Указание по технике безопасности:**

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

### **Указания по выполнению лабораторной работы:**

- Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений (рис. 3.2.3). **При подключении осциллографа аттенюаторы пробников-делителей установите в положение '10. Для подключения пробников-делителей к цепи используйте подпружиненные щипцы из комплекта аксессуаров.**
- Ручку регулирования выходного напряжения  $0 \dots 15\text{В}$  генератора постоянного напряжения G2 (213.2) поверните против часовой стрелки до упора.
- Подключите кабель USB к осциллографу и к ноутбуку. При работающем компьютере подключайте кабель USB **сначала** к осциллографу а, **затем**, к ноутбуку. Включите ноутбук и активизируйте программу осциллограф. (Ярлык  DSO-2090USB на рабочем столе).
- Установите на дисплее по каждому каналу осциллографа множители  $\times 10$  и чувствительность  $20\text{ В/дел}$  по первому каналу и  $5\text{ В/дел}$ . – по второму.
- Активизируйте полный комплект инструментов настройки осциллографа, используя пункты меню: Wiew – Complete Tools и уберите верхние дополнительные линейки инструментов, щёлкнув на пунктах меню: Wiew –Top Toolbar 1 и Top Toolbar 2. (*Top Toolbar Left оставьте*).
- С помощью левой вертикальной линейки инструментов настройки «включите» измерение амплитуд напряжения по первому и второму каналам (пункты меню: Ch1 -- , Ch2 --  ). Результат отображается в окне «Measurement» в виде надписей CH1: Top=\*\*\*\* и CH1: Top=\*\*\*\*. Появившиеся лишние позиции в этом окне сотрите. (*Top – положительная средневзвешенная амплитуда периодического сигнала*).
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1.
- Включите выключатель «СЕТЬ» блока генераторов напряжений G2
- Установите частоту синусоидального сигнала  $0,6 \dots 0,7\text{ кГц}$  и, регулируя амплитуду сигнала, убедитесь, что на дисплее появилось изображение двух кривых.

- Отрегулируйте развёртку так, чтобы на дисплее было изображение одного – двух периодов кривых. (Чувствительность по горизонтали 0,2 мс/дел.). Выведите кривые в центр экрана, сделайте инвертирование второго канала (пункты меню: Channel – CH2 Settting – Invert Off).
- Убедитесь, что сигналы совпадают по фазе, что при регулировании подаваемого синусоидального напряжения они не выходят за пределы экрана, что измеряются «CH1 Top» и «CH2 Top».
- Включите режим X – Y и убедитесь, что на экране появилось изображение кулон-вольтовой характеристики конденсатора (узкой петли гистерезиса).
- Уменьшите синусоидальное напряжение до нуля и, увеличивая его шаг за шагом до максимально возможного напряжения генератора, записывайте в табл. 4.1 амплитуды напряжений на нелинейном конденсаторе -  $U_1$  (CH1) и на линейном -  $U_2$  (CH2).
- Рассчитайте поляризационную характеристику диэлектрика  $P(E)$  и дифференциальную зависимость  $\epsilon(E)$ . Выберите масштабы и постройте графики.
- При максимальном значении амплитуды приложенного напряжения сохраните изображение в желаемом формате (пункт меню File), или перерисуйте её в отчёт.
- Выберите значения температуры, при которых Вы хотите снять кулон-вольтовую характеристику. Рекомендуется, кроме комнатной температуры, снять характеристику при 40, 60, и 80°C.
- Включите на мультиметре режим измерения температуры и, подайте напряжение нагрева 15 В на миниблок, повернув ручку регулятора 0...15 В вправо до упора. Убедитесь, что в миниблоке загорелась сигнальная лампочка и температура начала увеличиваться. Скорость нагрева можно регулировать, увеличивая и уменьшая напряжение нагрева.
- По мере нагревания миниблока сохраняйте или перерисовывайте кривую в отчёт при выбранных значениях температуры.
- После достижения температуры 80°C отключите нагрев и выключите все используемые блоки.
- Закройте окно виртуального осциллографа, нажав на кнопку '.
- Закройте все окна и выключите ноутбук, используя кнопку «ПУСК».
- Разберите цепь

Таблица 4.1

| $U_1$ , В<br>(горизон-<br>тальный ка-<br>нал) | $U_2$ , В<br>вертикаль-<br>ный канал) | $E$ , В/м | $D = \frac{C_1 u_1}{S}$<br>Кл/м <sup>2</sup> | $P = D - \varepsilon_0 E$<br>Кл/м <sup>2</sup> | $\varepsilon = \Delta D / (\varepsilon_0 \Delta E)$ | $E_{\text{ср}}$ , В/м |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------|-----------|----------------------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------|
| 0                                             |                                       |           |                                              |                                                |                                                     |                       |
| 10                                            |                                       |           |                                              |                                                |                                                     |                       |
| 20                                            |                                       |           |                                              |                                                |                                                     |                       |
| 30                                            |                                       |           |                                              |                                                |                                                     |                       |
| 40                                            |                                       |           |                                              |                                                |                                                     |                       |
| 50                                            |                                       |           |                                              |                                                |                                                     |                       |
| 60                                            |                                       |           |                                              |                                                |                                                     |                       |

**Содержание отчета:**

Отчет должен содержать:

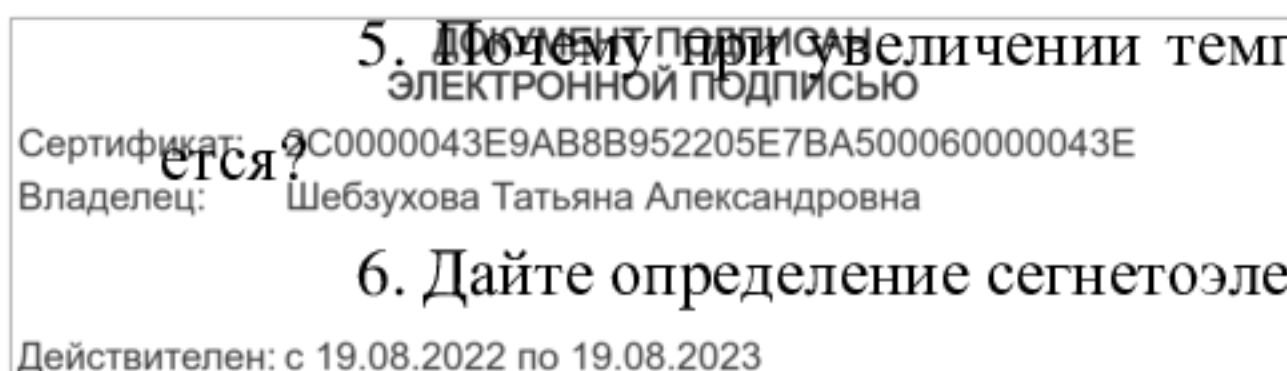
1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

**Контрольные вопросы:**

1. Что называется поляризацией диэлектрика?
2. Назовите виды поляризации, и в каких веществах они встречаются?
3. От каких факторов зависит поляризация диэлектрика?
4. Из какой зависимости нелинейного конденсатора можно рассчитать поляризационную характеристику?

5. Почему при увеличении температуры поляризованность диэлектрика уменьшается?

6. Дайте определение сегнетоэлектрику?



**Лабораторная работа № 5. Магнитные материалы. Снятие петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и построение основной кривой намагничивания.**

**Цель работы:** Получить на осциллографе петлю гистерезиса ферромагнетика, снять экспериментально основную кривую намагничивания, рассчитать и построить зависимость относительной магнитной проницаемости от напряжённости магнитного поля.

**Основы теории:**

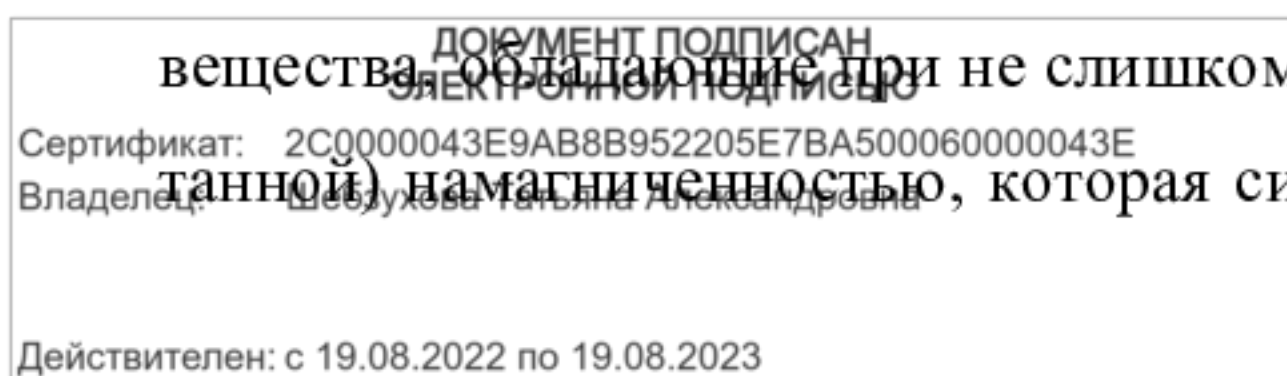
Все вещества при рассмотрении магнитных свойств принято называть магнетиками, когда они способны под действием магнитного поля приобретать магнитный момент (намагничиваться). По своим магнитным свойствам магнетики подразделяются на три основные группы: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики.

Количественной характеристикой намагниченного состояния вещества служит векторная величина – намагниченность  $J$ .

Диамагнетиками называются вещества, которые намагничиваются во внешнем магнитном поле в направлении, противоположном направлению вектора магнитной индукции поля, т.е. магнитные моменты атомов, ионов или молекул в отсутствие внешнего магнитного поля равны нулю. К диамагнетикам относятся: инертные газы, молекулярный водород и азот, цинк, медь, золото, висмут, парафин и многие другие органические и неорганические соединения.

Парамагнетики – вещества намагничивающиеся во внешнем магнитном поле по направлению поля. При внесении парамагнетиков во внешнее магнитное поле устанавливается преимущественная ориентация магнитных моментов атомов по полю (полной ориентации препятствует тепловое движение атомов). Таким образом, парамагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, совпадающее по направлению с внешним полем и усиливающее его. При ослаблении внешнего магнитного поля до нуля ориентация магнитных моментов вследствие теплового движения нарушается и парамагнетик размагничивается.

Особый класс магнетиков образуют вещества, обладающие намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля. По своему наиболее распространенному представлению (железо) их называют ферромагнетиками. Ферромагнетиками называются твердые вещества, обладающие при не слишком высоких температурах самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздей-



Кольцевой магнитопровод из ферромагнитного материала не намагничен и тока в витках катушки нет, т.е.  $B=0$  и  $H=0$  (начало координат на рисунке 5.2). При постепенном увеличении намагничивающего тока, т.е. магнитодвижущая сила МДС, а, следовательно, и напряженности поля от нуля до некоторого наибольшего значения магнитная индукция увеличивается по кривой начального намагничивания и достигает соответствующего максимального значения  $B_m$ . Если затем ток и напряженность поля уменьшаются, то и магнитная индукция уменьшается, при соответствующих значениях напряженности магнитная индукция несколько больше, чем при увеличении напряженности. Кривая изменения магнитной индукции располагается выше кривой начального намагничивания. При нулевых значениях тока и напряженности поля магнитная индукция имеет некоторое значение  $B_0$ , называемое остаточной индукцией.

Таким образом, магнитная индукция в ферромагнитном материале зависит не только от напряженности поля, но и от предшествующего состояния ферромагнетика. Это явление называется гистерезисом. Оно обусловлено как бы внутренним трением, возникающим при изменении ориентации магнитных моментов доменов.

При изменении направления напряженности поля и постепенном увеличении тока обратного направления напряженность поля достигает значения  $H_c$ , называемого коэрцитивной силой, при котором магнитная индукция  $B=0$ . При дальнейшем увеличении тока и напряженности поля магнитопровод намагничивается в противоположном направлении и при напряженности поля  $-H_m$  магнитная индукция достигнет значения  $-B_m$ . Затем при уменьшении тока и напряженности поля до нуля магнитная индукция становится равной  $-B_0$ . Наконец при следующем увеличении напряженности поля до прежнего значения  $H_m$  магнитная индукция увеличится также до прежнего значения  $B_m$ . Рассмотренный цикл перемагничивания ферромагнетика по кривой называется гистерезисным циклом (петлей гистерезиса).

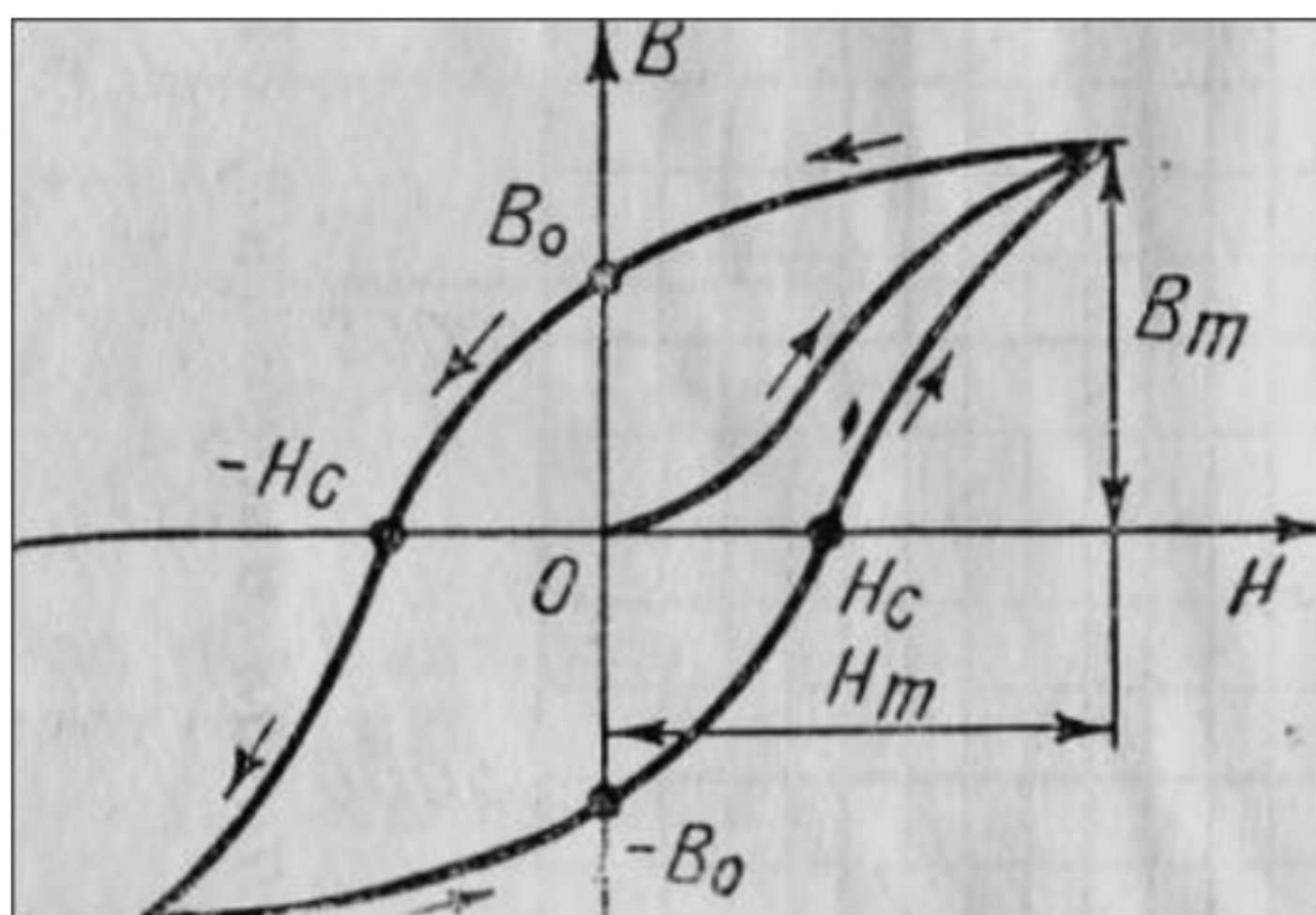


Рисунок 5.2 - Петля гистерезиса

Такая симметричная замкнутая петля гистерезиса получается в действительности только после нескольких перемагничиваний. При первых циклах перемагничивания петля несимметричная и незамкнутая. Наибольшая замкнутая петля, которая может быть получена для данного ферромагнитного материала, называется предельной.

Периодическое перемагничивание связано с затратой энергии, которая, превращаясь в тепло, вызывает нагрев магнитопровода. Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии, затраченной при одном цикле перемагничивания. Эта энергия называется потерями на гистерезис и выражается в ваттах на килограмм, зависит от материала, максимальной магнитной индукции и числа циклов перемагничивания.

### Перечень используемого оборудования:

В работе снимается петля гистерезиса сердечника из феррита М2000НМ (миниблок «Трансформатор тороидальный») и сердечников из аморфных ферромагнитных материалов ГМ11ДС и ГМ14ДС (одноимённые миниблоки).

Зависимость  $B(H)$  - кривая намагничивания ферромагнитного материала при циклическом перемагничивании имеет вид петли. Она может быть снята с помощью осциллографа.

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 5.3.

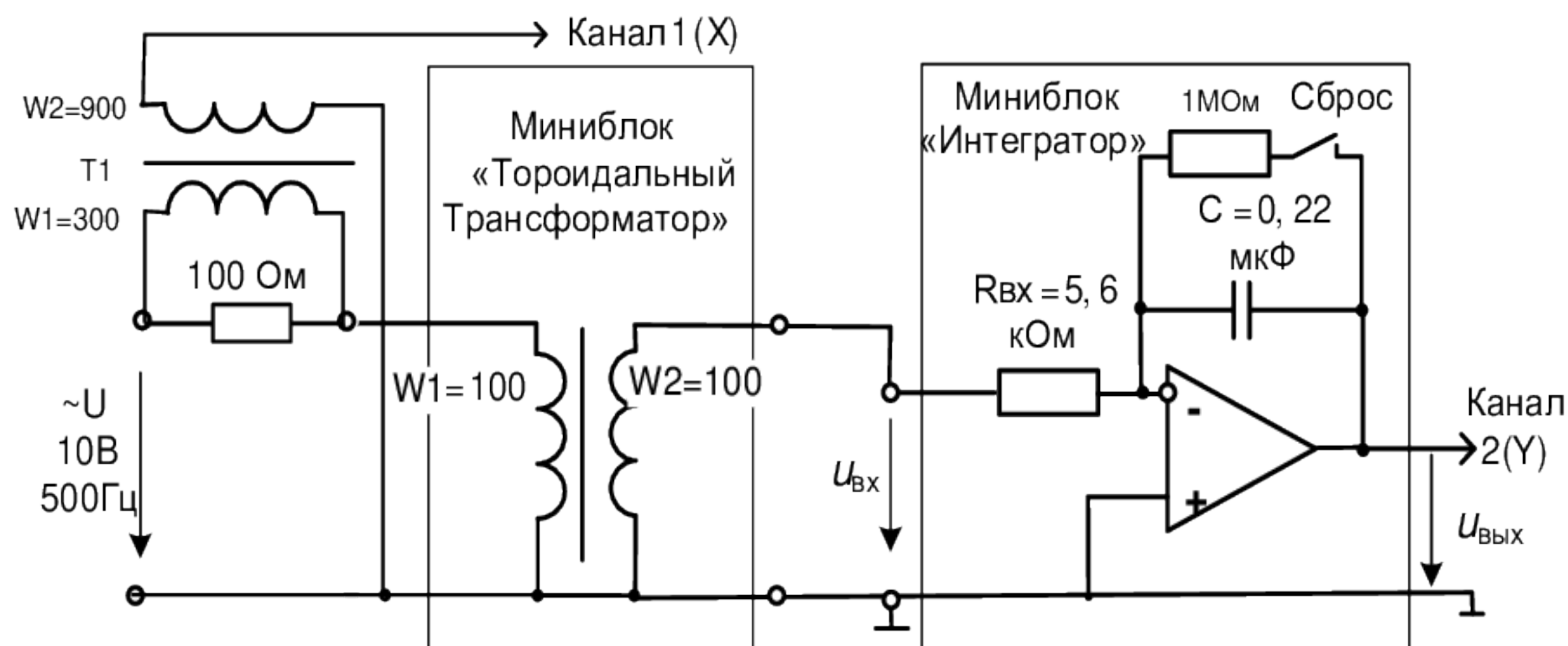


Рисунок 5.3 – Принципиальная схема для снятия петли гистерезиса

Исследуемые образцы ферромагнетиков представляют собой кольцевые сердечники, на которые намотаны по 2 обмотки 100 витков каждая. Они заключены в миниблоки: «Трансформатор тороидальный» (феррит М2000НМ), «ГМ14ДС» и «ГМ11ДС» (по обозначению марки ферромагнетика). Аналогично может сниматься петля гистерезиса кольцевого сердечника из феррита М6000НМ, который помещён в миниблоке «Точка Кюри». Этот опыт с дополнительным определением точки Кюри описан в разделе 7. Сечение магнитопровода и длина средней линии указаны на этикетках миниблоков. Первичная обмотка подключается к источнику синусоидального напряжения и служит для создания переменного магнитного потока в сердечнике. К вторичной обмотке подключён интегратор для измерения магнитного потока.

Выходное напряжение интегратора:

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

где  $R_{вх}$  и  $C$  – параметры интегратора,  $S$  – сечение сердечника а  $B$  – магнитная индукция.

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

Из рассмотренного выражения магнитная индукция в сердечнике:

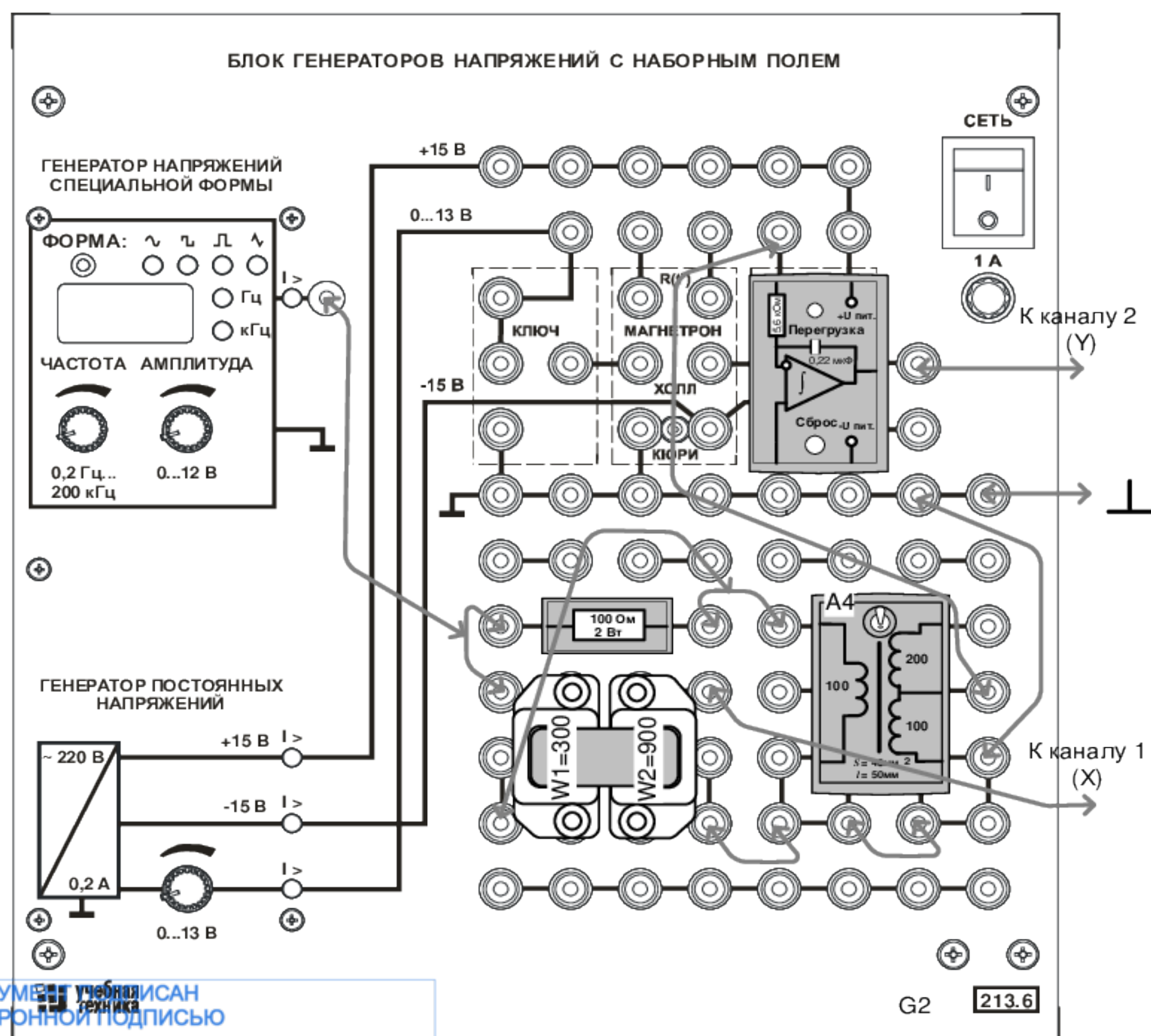
$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{R_{6x} C}{w_2 S} u_{6bix}$$

Напряжённость магнитного поля в сердечнике вычисляется по закону полного тока:

$$H = \frac{iw}{l}$$

где  $l$  – длина средней линии сердечника.

Напряжение с шунта 100 Ом через трансформатор гальванической развязки Т1 подаётся на горизонтальный вход осциллографа, а напряжение  $u_{\text{ВЫХ}}$  с выхода интегратора подаётся на вертикальный вход. Поскольку первое пропорционально напряжённости магнитного поля, а второе – магнитной индукции, экране осциллографа отображается в определённом масштабе зависимость  $B(H)$ . Цепь собирается на наборном поле блока генераторов напряжений как показано на монтажной схеме (рис. 5.4). Причём, интегратор устанавливается в наборную панель точно на отведённое для него место. Тогда к нему автоматически подводятся напряжения питания «+» и «–» 15 В.



ДОКУМЕНТ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ПЕДАГОГИЧЕСКОГО ПОСОБИЯ  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Рисунок 5.4 – Монтажная схема для снятия петли гистерезиса

Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023



Отрегулируйте развёртку так, чтобы на дисплее было 1...2 периода сигналов. Отрегулируйте чувствительность по каналам так, чтобы кривые не выходили за пределы экрана осциллографа.

- Активизируйте полный комплект инструментов настройки осциллографа, используя пункты меню: **Wiew – Complete Tools** и уберите верхние дополнительные линейки инструментов, щёлкнув на пунктах меню: **Wiew –Top Toolbar 1** и **Top Toolbar 2**. (**Top Toolbar Left оставьте**).

- С помощью левой вертикальной линейки инструментов настройки «включите» измерение амплитуд напряжения по первому и второму каналам (пункты меню: **Ch1 --  , Ch2 -- **). Результат отображается в окне «Measurement» в виде надписей **CH1: Top=\*\*\*\*** и **CH2: Top=\*\*\*\***. Появившиеся лишние позиции в этом окне сотрите. (*Top – положительная средневзвешенная амплитуда периодического сигнала*).

- Включите режим X-Y (канал 1 – X, канал 2 – Y) и убедитесь, что на экране появилось изображение петли гистерезиса. Отрегулируйте намагничивающий ток таким образом, чтобы максимальная магнитная индукция несколько превышала границу области насыщения. При необходимости измените чувствительность.

- Запишите в табл. 5.1 исходные значения амплитуды напряжения на шунте (CH1) и амплитуды выходного напряжения интегратора (CH2).

- Уменьшая шаг за шагом намагничивающий ток до нуля, снимите зависимость амплитуды выходного напряжения интегратора от амплитуды тока (Ток определяется как  $U_{\text{шунта}}/R_{\text{шунта}}$ ).

- Рассчитайте соответствующие значения магнитной индукции, напряжённости магнитного поля и постройте график  $B(H)$  на рис. 5.3. Вычислите относительную магнитную проницаемость по двум соседним в таблице значениям:

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_{n+1} - B_n}{H_{n+1} - H_n},$$

где  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  – магнитная проницаемость пустоты

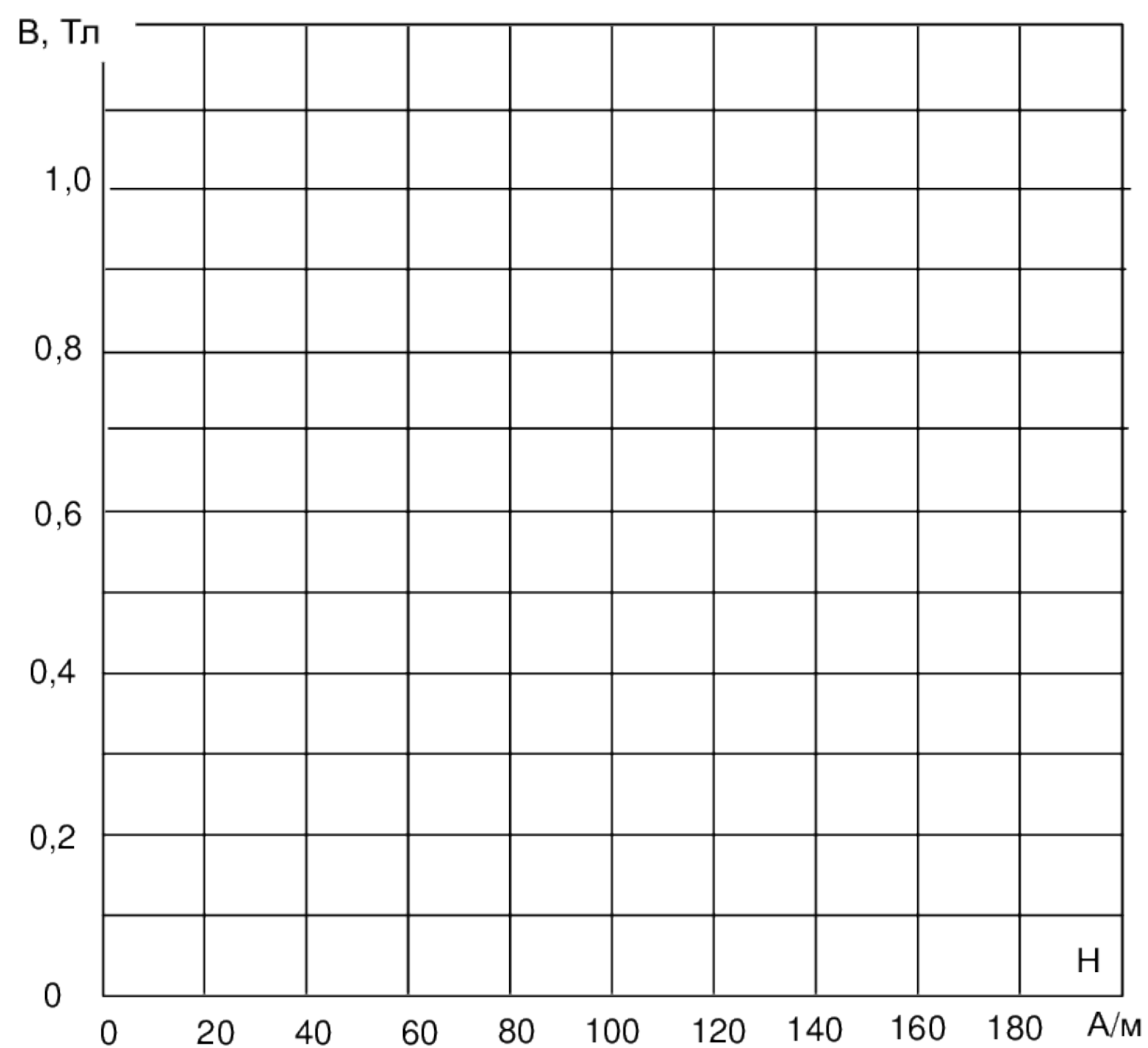


Рисунок 5.5

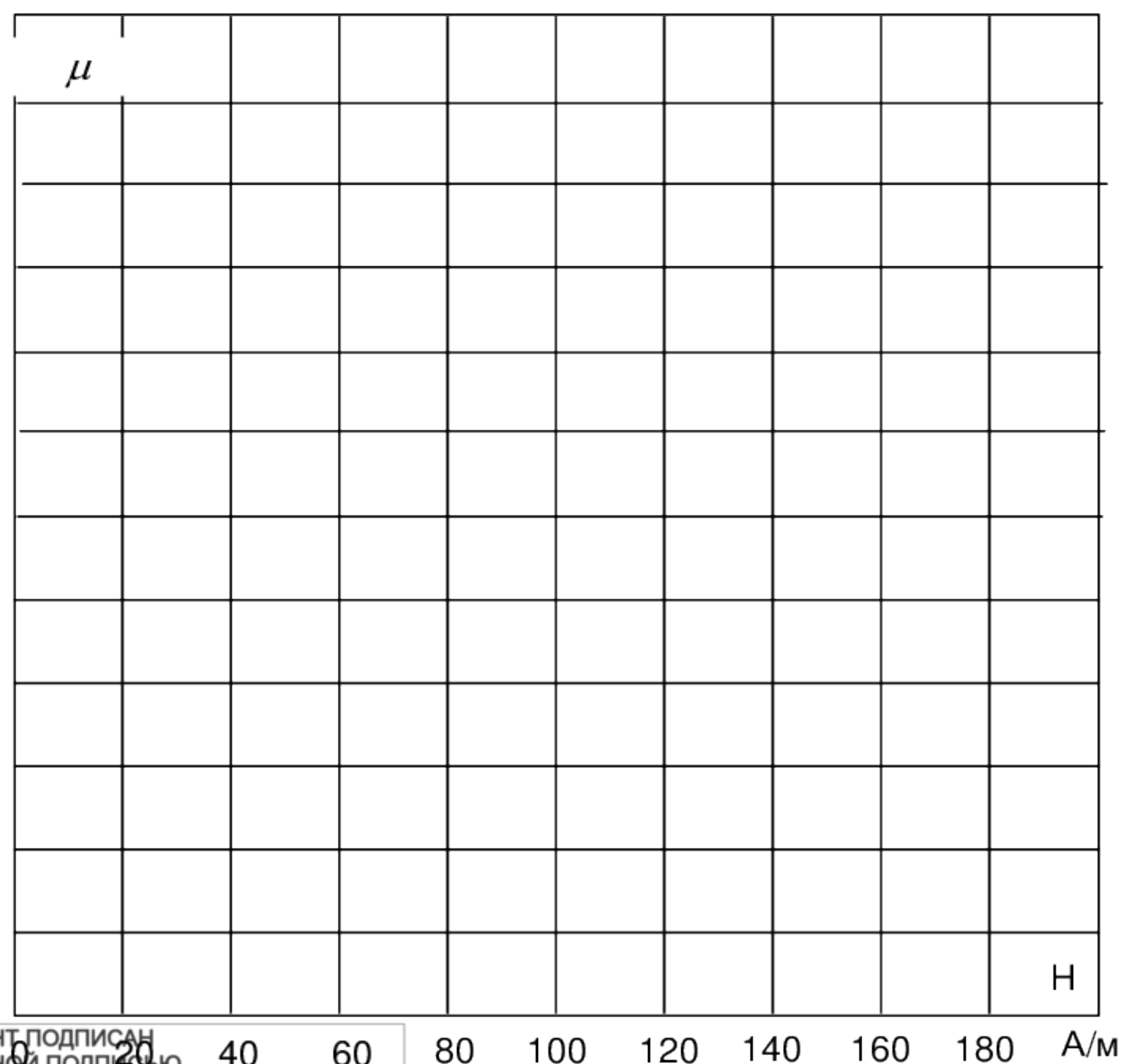


Рисунок 5.6

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

Таблица 5.1

| $I_{\text{макс}}, \text{мА}$ | $U_{\text{макс}}, \text{мВ}$ | $H, \text{А/м}$ | $B, \text{Тл}$ | $\mu$ | $H_{\text{ср}}, \text{А/м}$ |
|------------------------------|------------------------------|-----------------|----------------|-------|-----------------------------|
| 10                           |                              |                 |                |       |                             |
| 20                           |                              |                 |                |       |                             |
| 30                           |                              |                 |                |       |                             |
| 40                           |                              |                 |                |       |                             |
| 50                           |                              |                 |                |       |                             |
| 60                           |                              |                 |                |       |                             |
| 70                           |                              |                 |                |       |                             |
| 80                           |                              |                 |                |       |                             |
| 90                           |                              |                 |                |       |                             |
| 100                          |                              |                 |                |       |                             |

- На рис. 5.5. постройте график  $m(H)$ , относя каждое вычисленное значение  $m$  к среднему значению напряжённости:

$$H_{\text{ср}} = \frac{H_{n+1} + H_n}{2}.$$

- Повторите опыт, вычисления и построения для трансформаторов «ГМ11ДС» и «ГМ14ДС». При замене миниблока с трансформатором не забудьте соединить вторичную обмотку с интегратором в соответствии с рисунком на этикетке миниблока.
- Закройте окно виртуального осциллографа, нажав на кнопку **✕**.
- Закройте все окна и выключите ноутбук, используя кнопку «ПУСК».
- Разберите цепь.

### ***Содержание отчета:***

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Как классифицируются магнетики?
2. Каковы основные свойства ферромагнетиков?
3. Как и от чего зависит вектор магнитной индукции в веществе до и после насыщения.
4. Что такое магнитная проницаемость и от чего она зависит.
5. Нарисуйте петлю гистерезиса ферромагнетика. Объясните механизм намагничивания ферромагнетика с помощью доменной структуры.
6. Объясните, что называется коэрцитивной силой.
7. Каким образом можно объяснить остаточную намагниченность.

**Лабораторная работа № 6. Магнитные материалы. Снятие петли гистерезиса ферромагнитного материала с помощью осциллографа и определение точки Кюри.**

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

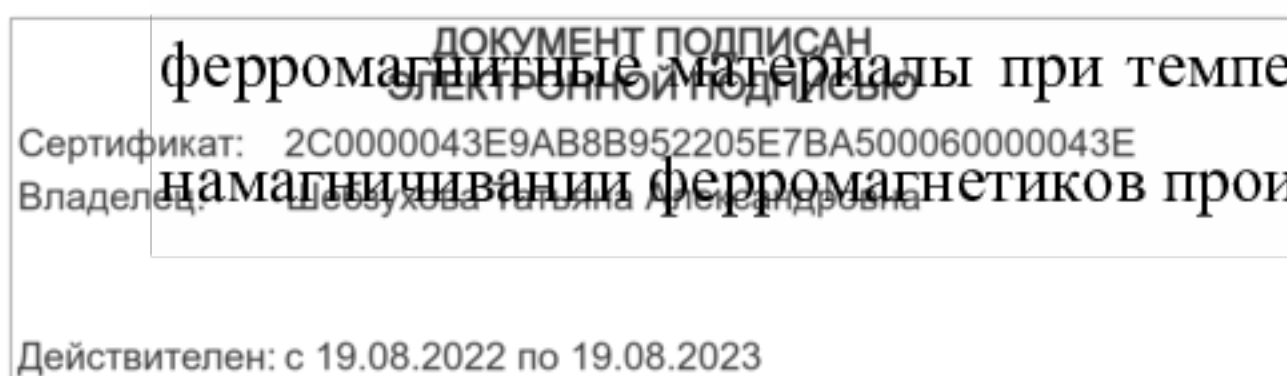
**Основы теории:**

Точка Кюри, или температура Кюри, – температура фазового перехода II рода, связанного со скачкообразным изменением свойств симметрии вещества (например, магнитной – в ферромагнетиках, электрической – в сегнетоэлектриках, кристаллохимической – в упорядоченных сплавах). Названа по имени французского физика Пьера Кюри открывшего в 1895 году для железа существование температуры, выше которой у него исчезают ферромагнитные свойства и скачкообразно изменяются некоторые другие свойства, например удельная электропроводность и теплоемкость (1895). При температуре  $T$  ниже точки Кюри  $Q$  ферромагнетики обладают самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью и определённой магнитно-кристаллической симметрией.

В точке Кюри ( $T = Q$ ) интенсивность теплового движения атомов ферромагнетика оказывается достаточной для разрушения его самопроизвольной намагниченности («магнитного порядка») и изменения симметрии, в результате ферромагнетик становится парамагнетиком. Таким образом, во всех случаях фазовых переходов II рода (типа точки Кюри) при  $T = Q$  в веществе происходит исчезновение того или иного вида атомного «порядка» (упорядоченной ориентации магнитных или электрических моментов, дальнего порядка в распределении атомов по узлам кристаллической решётки в сплавах и т. п.). Вблизи точки Кюри в веществе происходят специфические изменения многих физических свойств (например, теплоёмкости, электропроводимости, магнитной восприимчивости и др.), достигающие максимума при  $T = Q$ , что обычно и используется для точного определения температуры фазового перехода.

Для разных материалов точка Кюри различна, например, для чистого железа она составляет  $768^{\circ}\text{C}$ , для никеля  $358^{\circ}\text{C}$ , для кобальта  $1131^{\circ}\text{C}$ . Значения точки Кюри приводятся в специальных справочниках и являются характеристикой магнитного материала.

Ферромагнетики при температурах ниже точки Кюри обладают спонтанной намагниченностью независимо от наличия внешнего намагничивающего поля. Однако многие ферромагнитные материалы при температурах ниже точки Кюри не намагничены. При намагничивании ферромагнетиков происходит небольшое изменение их линейных разме-



ров, т.е. увеличение или уменьшение их длины с одновременным уменьшением или увеличением поперечного сечения. Это явление называется магнитострикцией, оно зависит от строения кристаллической решетки ферромагнетика. Характеристикой магнитострикции материала является константа магнитострикции  $\lambda_s$ , выражаемая следующей формулой:

$$\lambda_s = \frac{\Delta l}{l}$$

где  $\Delta l$  – увеличение (или уменьшение) длины образца  $l$  в направлении поля  $H$  при увеличении напряженности поля от нуля до величины, вызывающей техническое насыщение.

Константа магнитострикции может быть положительной или отрицательной. Ферромагнитные материалы в большей или меньшей степени обладают магнитной анизотропией.

**Перечень используемого оборудования:**

При выполнении работы испытывается кольцевой сердечник из феррита М6000НМ.

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 6.1.

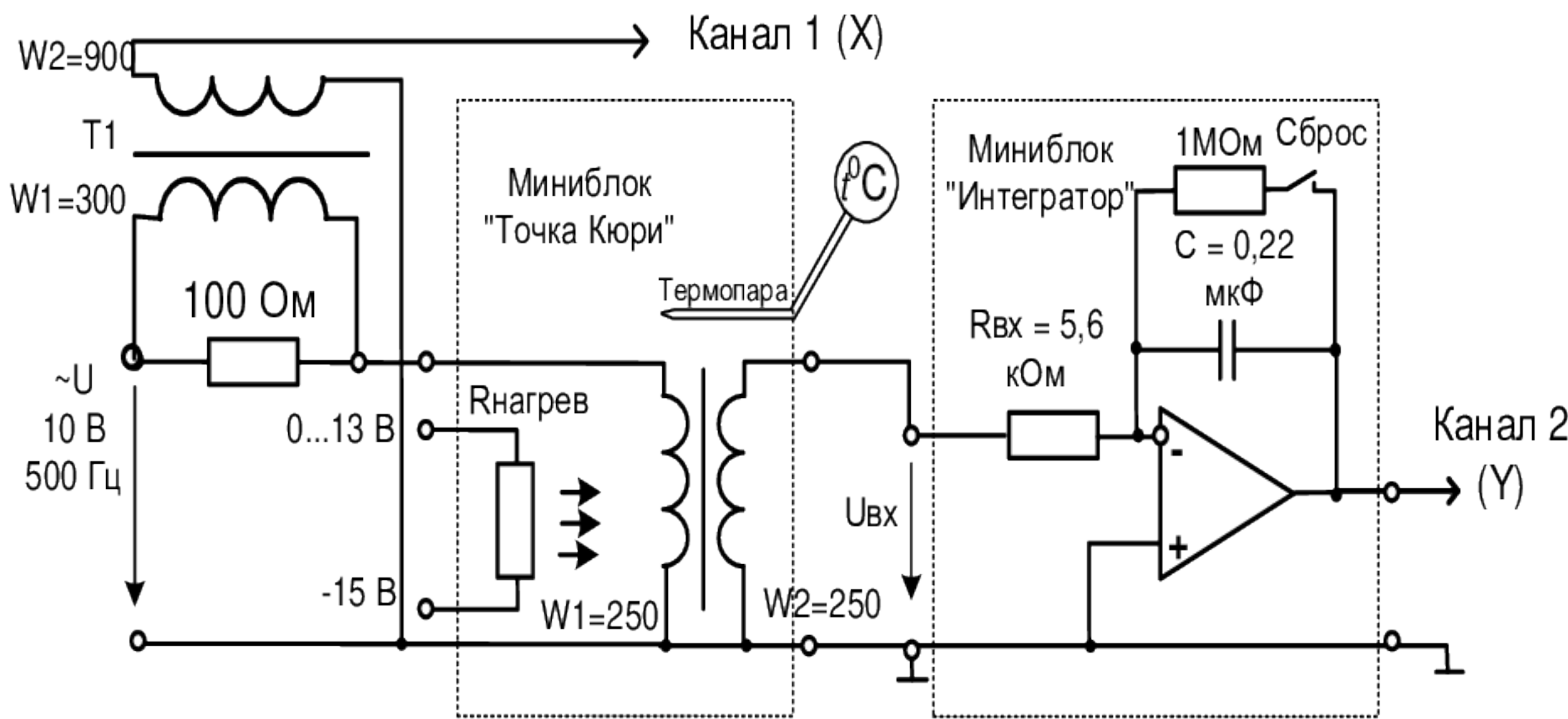


Рисунок 6.1 – Принципиальная схема для снятия петли гистерезиса и определения точки Кюри

Исследуемый образец ферромагнетика представляет собой кольцевой сердечник из феррита, сечение и длина 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

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
Электронно-подписью  
Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
Владелец: ООО «Спецавтоцентр»  
Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

магнитного потока в сердечнике. К другой катушке подключён интегратор для измерения магнитного потока.

Выходное напряжение интегратора:

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

где  $R_{\text{ex}}$  и  $C$  – параметры интегратора,  $S$  – сечение сердечника, а  $B$  – магнитная индукция.

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

Из рассмотренного выражения магнитная индукция в сердечнике:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{R_{\text{ex}} C}{w_2 S} u_{\text{вых}}.$$

Напряжённость магнитного поля в сердечнике вычисляется по закону полного тока:

$$H = iw/l,$$

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. Поскольку первое пропорционально напряжённости магнитного поля, а второе - магнитной индукции, экране осциллографа отображается в определённом масштабе зависимость  $B(H)$ .

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

Цепь собирается на наборном поле блока генераторов напряжений как показано на монтажной схеме (рис. 6.2). Причём, миниблоки «Интегратор» и «Точка Кюри» устанавливается 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 - 15В. Кроме того, вторичная катушка трансформатора, встроенного в миниблок соединяется с входом интегратора. Это существенно уменьшает количество внешних соединений.

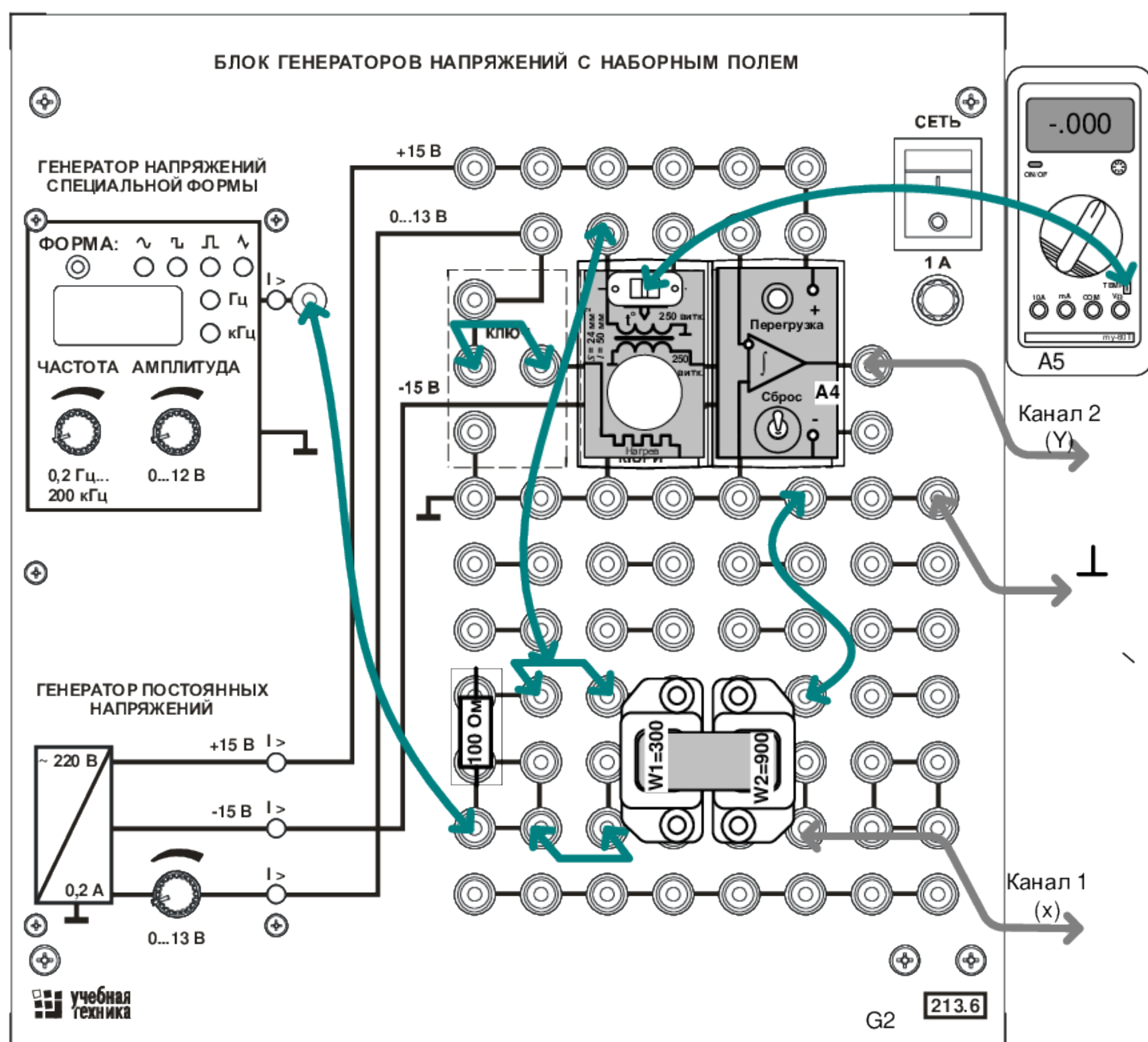


Рисунок 6.2 – Монтажная схема для снятия петли гистерезиса и определения точки Кюри

| 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,<br>~0...12 В, Л 12В.<br>0,2 Гц...200 кГц                                                 |
| A4          | Набор миниблоков «Электро-<br>технические материалы» | 600.18 | Миниблоки: «Точка<br>Кюри», «Интегратор»,<br>Трансформатор с разъем-<br>ным сердечником, «Рези-<br>стор 100 Ом» |
| A5          | Мультиметр                                           | 1416   | Цифровой мультиметр<br>MY60T                                                                                    |
|             | USB осциллограф                                      | 1419   |                                                                                                                 |
|             | Ноутбук                                              | 1420   |                                                                                                                 |

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

### **Указание по технике безопасности:**

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

### **Указания по выполнению лабораторной работы:**

- Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений (рис. 6.2). **При подключении осциллографа аттенюаторы пробников-делителей установите в положение '1. Для подключения пробников-делителей к цепи используйте подпружиненные щипцы из комплекта аксессуаров.**
- Подключите кабель USB к осциллографу и к ноутбуку. При работающем компьютере подключайте кабель USB **сначала** к осциллографу а, **затем**, к ноутбуку. Включите ноутбук.
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1 (218).
- Установите минимальное выходное напряжение генератора постоянных напряжений блока генераторов A1 (213.2). Для этого ручку регулирования выходного напряжения 0...15В генератора постоянного напряжения поверните против часовой стрелки до упора.
- Включите блок генераторов напряжений, установите на генераторе напряжений специальной формы синусоидальный сигнал частотой 500 Гц максимальной амплитуды.
- Запустите программу осциллографа двойным щелчком левой кнопки мыши на значке  «DSO -2090 USB» на рабочем столе Windows и убедитесь, что на дисплее появилось изображение двух сигналов: кривая изменения тока и кривая магнитного потока. Отрегулируйте развёртку так, чтобы на дисплее было 1...2 периода сигналов. Отрегулируйте чувствительность по каналам так, чтобы кривые не выходили за пределы экрана осциллографа.
- Настройте осциллограф и убедитесь, что на дисплее появилось изображение двух сигналов: кривая изменения тока и кривая магнитного потока. Отрегулируйте развёртку так, чтобы на дисплее было 1...2 периода сигналов.

- Включите режим X-Y (канал 1 – X, канал 2 – Y) и убедитесь, что на экране появилось изображение петли гистерезиса. Отрегулируйте намагничивающий ток таким образом, чтобы максимальная магнитная индукция несколько превышала границу области

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ  
Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
Владелец: Шабурова Татьяна Александровна  
Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

насыщения. Для этого уменьшайте ток до тех пор, пока не исчезнут однолинейные концы петли гистерезиса. При необходимости сместите изображение в центр экрана.

- Сохраните изображение петли гистерезиса в желаемом формате (пункт меню File), или перерисуйте её в отчёт.
- Включите на мультиметре режим измерения температуры и, подайте напряжение нагрева 15 В на миниблок, повернув ручку регулятора 0...15 В вправо. Убедитесь, что в миниблоке загорелась сигнальная лампочка и температура начала увеличиваться. *Скорость нагрева можно регулировать, увеличивая и уменьшая напряжение нагрева.*
- По мере нагревания миниблока сохраняйте или перерисовывайте кривую при выбранных значениях температуры.
- Дождитесь нагрева до температуры точки Кюри (примерно 110...120°C) и сразу же отключите или убавьте нагрев. Снова сохраните изображение петли гистерезиса в желаемом формате (пункт меню File), или перерисуйте её в отчёт. Запишите температуру точки Кюри.

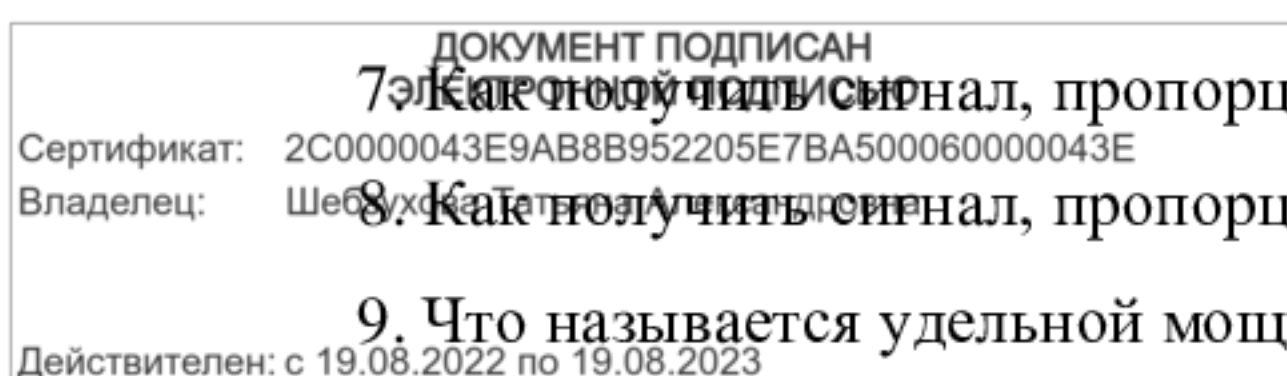
### ***Содержание отчета:***

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Что называется магнитной проницаемостью вещества?
2. Классическая теория ферромагнетизма Вейса.
3. Квантовая природа ферромагнетизма.
4. Как происходит процесс перемагничивания?
5. В чем заключается явление гистерезиса?
6. Как объясняется остаточная намагниченность?
7. Как получить сигнал, пропорциональный напряженности магнитного поля  $H$ ?
8. Как получить сигнал, пропорциональный магнитной индукции  $B$ ?
9. Что называется удельной мощностью электромагнитных потерь?



**Лабораторная работа № 7. Магнитные материалы. Снятие начальной кривой намагничивания ферромагнитных материалов и определение магнитной проницаемости.**

**Цель работы:** Снять экспериментально начальную кривую намагничивания ферромагнетика, рассчитать и построить графики  $B(H)$  и  $\mu(H)$ .

**Основы теории:**

В технике используется несколько видов магнитной проницаемости в зависимости от конкретных применений магнитного материала.

Протекание процессов намагничивания ферромагнитного материала практически характеризуют кривыми намагничивания  $B(H)$ , имеющими сходный характер для всех ферромагнетиков. Относительная магнитная проницаемость определяется по основной кривой намагничивания как отношение индукции  $B$  к напряженности магнитного поля  $H$  в данной точке кривой намагничивания с учетом магнитной постоянной  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 \cdot H}$$

Относительная магнитная проницаемость связана с магнитной восприимчивостью следующим образом:

$$\mu = 1 + c \text{ (в единицах СИ)}$$

где  $c$  – магнитная восприимчивость.

Магнитная проницаемость физического вакуума  $\mu = 1$ , так как  $c = 0$ .

Относительную магнитную проницаемость (далее просто магнитная проницаемость) при напряженности магнитного поля  $H \approx 0$  называют начальной проницаемостью  $\mu_{\text{н}}$ . Эта характеристика имеет важнейшее значение при техническом использовании многих магнитных материалов. Экспериментально ее определяют в слабых магнитных полях с напряженностью порядка 0,1 А/м. Наибольшее значение магнитной проницаемости носит наименование максимальной проницаемости и обозначается  $\mu_{\text{г макс}}$ .

Магнитная проницаемость – отвлеченное число.

Для диамагнитных материалов магнитная проницаемость меньше единицы, а у парамагнетиков не намного больше единицы. У тех и у других магнитная проницаемость не зависит от напряженности внешнего поля. Ферромагнетики – материалы, у которых магнит-

ная проницаемость значительно больше единицы и зависит от магнитных свойств материала, температуры, интенсивности магнитного поля, т.е. величины индукции или от величины напряженности магнитного поля. Такие материалы в электротехнике применяются в

качестве магнитных материалов. К числу ферромагнетиков относятся железо, никель, кобальт и многие их сплавы и соединения; ферромагнитными свойствами обладают также некоторые сплавы и соединения содержащие алюминий, хром, марганец, медь, серебро.

Для характеристики изменения магнитной проницаемости при изменении температуры пользуются температурным коэффициентом магнитной проницаемости ( $K^{-1}$ )

Характеристикой ферромагнетиков в переменных магнитных полях является динамическая магнитная проницаемость, представляющая собой отношение наибольшего значения индукции к наибольшему значению напряженности магнитного поля. С увеличением частоты переменного поля динамическая магнитная проницаемость уменьшается из-за инерционности магнитных процессов.

Абсолютная магнитная проницаемость равна произведению относительной магнитной проницаемости на магнитную постоянную:

$$\mu_a = \mu_r \cdot \mu_0$$

Абсолютную магнитную проницаемость различных материалов и сред сравнивают с магнитной постоянной

В работе снимается начальная кривая намагничивания сердечника из феррита М2000НМ (миниблок «Трансформатор тороидальный»).

Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 7.1.

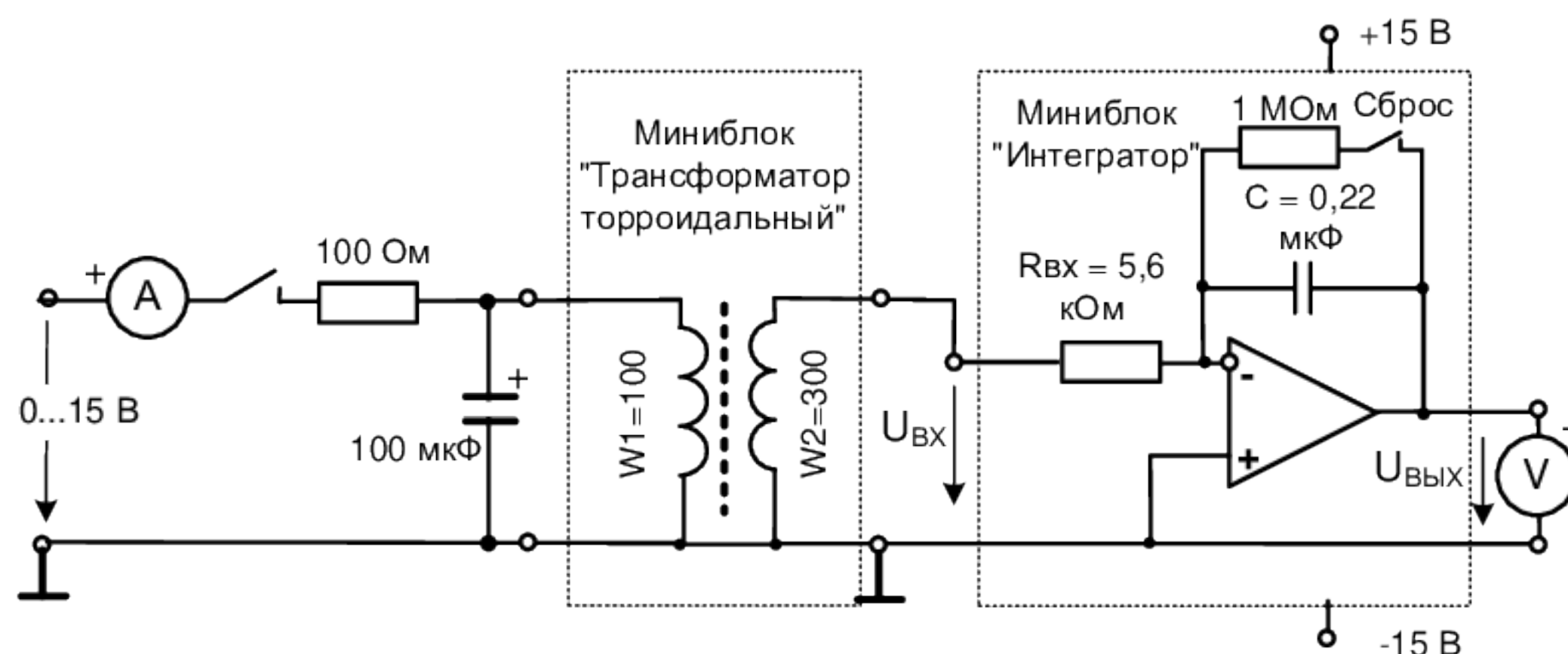


Рисунок 7.1 – Принципиальная схема для снятия начальной кривой намагничивания

Исследуемый образец ферромагнетика представляет собой кольцевой сердечник из феррита, сечение и длина средней линии которого указаны на этикетках миниблока «Трансформатор тороидальный». На сердечнике имеются две катушки. Катушка  $w_1=100$  витков подключается к источнику регулируемого постоянного напряжения и служит для создания магнитного поля в сердечнике. Направление тока можно изменять тумблером на мини-блоке. К другой катушке ( $w_2=300$  витков) подключён интегратор для измерения магнитного

потока.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННЫМ ПОДПИСОМ  
Сертификат: 2C00000043E9AB8B952205E7BA5000600000043E  
Владелец: ООО «ИТ-Информ»  
Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

Начальная кривая намагничивания снимается путём включения катушки  $w_1$  на различные по величине постоянные токи. Ток регулируется величиной подаваемого напряжения и ограничивается резистором 100 Ом на входе. Конденсатор 100 мкФ, включённый параллельно катушке, служит для ограничения перенапряжений и создания колебательного контура при отключении цепи. При выключении цепи в катушке возникает затухающий колебательный процесс и сердечник размагничивается.

При включении цепи магнитный поток изменяется от 0 до  $+\Phi$  и в процессе этого изменения во вторичной катушке наводится ЭДС

$$e(t) = w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Выходное напряжение интегратора:

$$u_{\text{вых}} = \frac{1}{R_{\text{ex}} C} \int_0^t u_{\text{ex}}(t) dt + u_{\text{вых}}(0).$$

где  $R_{\text{ex}}$  и  $C$  – параметры интегратора, а  $u_{\text{ex}}(t) = e(t)$ .

На интеграторе имеется переключатель «Сброс», с помощью которого перед началом интегрирования устанавливается  $u_{\text{вых}}(0)=0$ . Поэтому:

$$u_{\text{ао}} = \frac{1}{R_{\text{ао}} C} \int_0^t w_2 \frac{d\hat{\Phi}}{dt} dt = \frac{1}{R_{\text{ао}} C} \int_0^{\hat{\Phi}} d\hat{\Phi} = \frac{w_2}{R_{\text{ао}} C} \hat{\Phi} = \frac{w_2}{R_{\text{ао}} C} BS,$$

где  $S$  – сечение сердечника а  $B$  – магнитная индукция.

Отсюда магнитная индукция в сердечнике:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{R_{\text{ао}} C}{w_2 S} u_{\text{ао}}$$

Напряжённость магнитного поля определяется по закону полного тока:

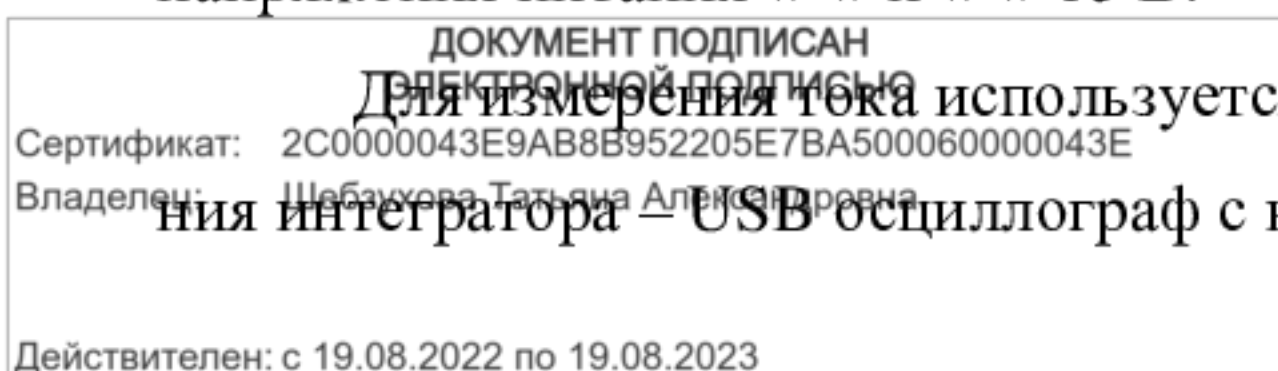
$$H = \frac{I_1 w_1}{l},$$

где  $l$  – длина средней линии сердечника.

Включая катушку на различные по величине токи и измеряя выходное напряжение интегратора  $u_{\text{вых}}$  и ток  $I_1$ , можно вычислить начальную кривую намагничивания  $B(H)$ .

Цепь собирается на наборном поле блока генераторов напряжений как показано на монтажной схеме (рис. 7.2). Причём, миниблок «Интегратор» устанавливается в наборную панель точно на отведённое для его место. Тогда к интегратору автоматически подводятся напряжения питания «+» и «-» 15 В.

Для измерения тока используется мультиметр, а для измерения выходного напряжения интегратора – USB осциллограф с ноутбуком.





### **Указания по выполнению лабораторной работы:**

- Убедитесь, что переключатели «Сеть» блоков, используемых в эксперименте, выключены.
- Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрической соединений (рис. 7.2). **При подключении осциллографа аттенюаторы пробника-делителя установите в положение '1. Для подключения пробника-делителя к цепи используйте подпружиненные щипцы из комплекта аксессуаров.**
- Подключите кабель USB к осциллографу и к ноутбуку. При работающем компьютере подключайте кабель USB **сначала** к осциллографу а, **затем**, к ноутбуку. Включите ноутбук.
- Включите устройство защитного отключения и автоматический выключатель в однофазном источнике питания G1 (218).
- Установите минимальное выходное напряжение генератора постоянных напряжений блока генераторов A1 (213.2). Для этого ручку регулирования выходного напряжения 0...15В генератора постоянного напряжения поверните против часовой стрелки до упора и включите генератор. Переключатель на интеграторе должен быть в положении «Сброс».
- Запустите программу осциллографа двойным щелчком левой кнопки мыши на значке  «DSO -2090 USB» на рабочем столе Windows. Установите развёртку по горизонтали 10 мс/дел., включите инвертирование первого канала (пункты меню: Channel – CH1 Setting – Invert Off) и переключите первый канал на «открытый вход» (с постоянной составляющей). Второй канал можете отключить.
- Включите тумблер на входе исследуемой цепи и установите первое значение тока  $I_1$ , например, 5 мА. Включая и выключая тумблер, убедитесь по осциллографу, что на выходе появляется напряжение, причём, при включении и отключении цепи возникает колебательный процесс.
- Отрегулируйте чувствительность по оси Y так, чтобы броски напряжения при включении и выключении не выходили за пределы экрана.
- При выключенном токе переведите переключатель «Сброс» в нижнее положение и сразу же включите ток тумблером на входе цепи. На выходе интегратора произойдёт бросок напряжения, который нужно сразу зафиксировать (записать, запомнить или измерить с помощью курсора и горизонтальной оси, как описано в Руководстве пользователя). В дальнейшем напряжение будет медленно меняться в ту или другую сторону вследствие инте-

гирования токов утечки и неточности балансировки усилителя. Для большей достоверности повторите этот опыт несколько раз и запишите в табл. среднее, либо наиболее часто повторяющееся значение выходного напряжения. Переведите тумблер в положение «Сброс»

- Установите следующее значение тока, выключите ток и повторите опыт при новом значении тока. При этом возможно понадобится изменение масштаба по оси Y.
- Постепенно увеличивайте ток намагничивания и повторяйте опыт при каждом его значении, записывая результаты в табл. 7.1.
- Вычислите магнитную индукцию и напряжённость магнитного поля.
- Вычислите магнитную проницаемость по двум соседним в таблице значениям:

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{B_{n+1} - B_n}{H_{n+1} - H_n},$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  – магнитная проницаемость пустоты.

- Постройте графики  $B(H)$  и  $\mu(H)$ , относя каждое вычисленное значение  $\mu$  к среднему значению напряжённости

$$H_{cp} = \frac{H_{n+1} + H_n}{2}.$$

Таблица 7.1

| $I$ , мА | $U_{\text{вых}}$ мВ | $H$ , А/м | $B$ , Тл | $\mu$ | $H_{\text{ср}}$ , А/м |
|----------|---------------------|-----------|----------|-------|-----------------------|
| 2        |                     |           |          |       |                       |
| 4        |                     |           |          |       |                       |
| 6        |                     |           |          |       |                       |
| 8        |                     |           |          |       |                       |
| 10       |                     |           |          |       |                       |
| 15       |                     |           |          |       |                       |
| 20       |                     |           |          |       |                       |
| 30       |                     |           |          |       |                       |
| 50       |                     |           |          |       |                       |

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН

ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA5000600000043E

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

30

50

Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

***Содержание отчета:***

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

***Контрольные вопросы:***

1. Опишите магнитное поле в веществе.
2. Охарактеризуйте вещества по их магнитным свойствам.
3. Какой формулой определяется магнитная проницаемость вещества?
4. Что такое домены?
5. Как получается петля гистерезиса?

## **5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

### **5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины**

#### **5.1.2 Перечень основной литературы:**

1. Бондаренко, Г. Г. Основы материаловедения : учебник / Г. Г. Бондаренко, Т. А. Кабанова, В. В. Рыбалко ; под редакцией Г. Г. Бондаренко. — Москва : Лаборатория знаний, 2020. — 761 с. — ISBN 978-5-00101-755-4. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/37076.html>

2. Электроматериаловедение : учеб. Пособие / А.С. Красько, С.Н. Павлович, Е.Г. Пономоренко. — 2-изд., стер. — Минск : РИПО, 2015. — 212 с. Режим доступа: [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_view\\_red&book\\_id=463625](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=463625)

3. Привалов, Е. Е. Электротехнические материалы систем электроснабжения: учебное пособие / Е.Е. Привалов. — М.-Берлин: Директ-Медиа, 2016. — 266 с. Режим доступа: [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_view\\_red&book\\_id=436753](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=436753)

#### **5.1.3 Перечень дополнительной литературы:**

1. Основы материаловедения: учебное пособие / Е.А. Астафьева, Ф.М. Носков, В.И. Аникина — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. — 152 с. Режим доступа: [http://biblioclub.ru/index.php?page=book\\_view\\_red&book\\_id=364047](http://biblioclub.ru/index.php?page=book_view_red&book_id=364047)

### **5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

1. Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение».

2. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение».

3. Методические указания по выполнению контрольной работы по дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение».

4. Методические указания по организации и проведению самостоятельной работы по дисциплине «Электротехническое и конструкционное материаловедение».

***5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет,  
необходимых для освоения дисциплины***

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

## Приложение А

### *Указание по технике безопасности*

До начала работы студенты обязаны изучить правила техники безопасности при работе с электроустановками. Об изучении правил техники безопасности и получении инструктажа студенты расписываются в специальном журнале. Студенты, не изучившие правила техники безопасности и не прошедшие инструктаж, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Учебная группа (или подгруппа) разбивается на бригады, число которых указывается преподавателем, а состав бригад комплектуется студентами на добровольных началах. Список группы (подгруппы), разбитой на бригады, староста предоставляет преподавателю, ведущему лабораторные занятия.

Каждая из бригад выполняет лабораторную работу в соответствии с графиком, находящемся в лаборатории.

Перед каждым занятием студент обязан подготовиться к выполнению лабораторной работы по данному методическому пособию и рекомендуемой литературе. Перед началом работы преподаватель проверяет знания студентов по содержанию выполняемой работы. Плохо подготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Работая в лаборатории, необходимо соблюдать следующие правила:

К выполнению лабораторной работы следует приступать только после полного уяснения ее содержания и получения допуска к ней.

2. Начинать работу следует с ознакомления с приборами и оборудованием, применяемыми в данной работе.

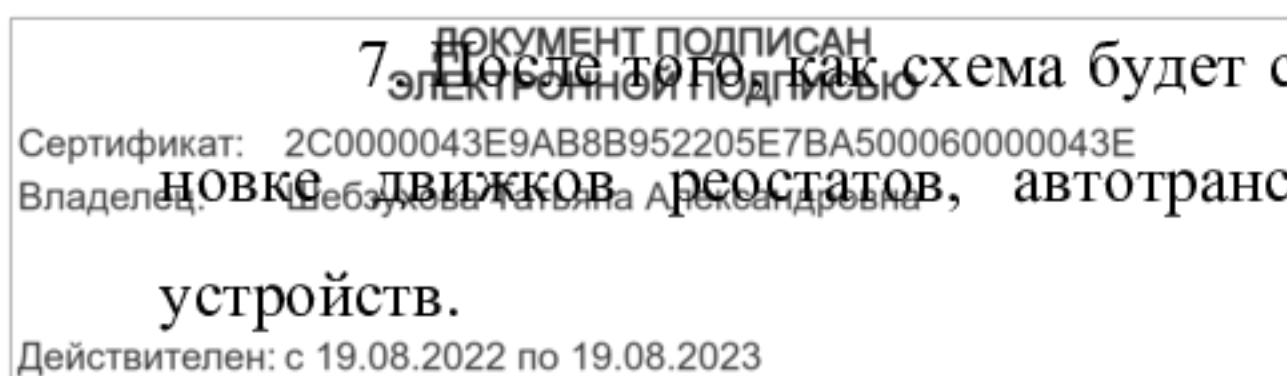
3. На лабораторном столе должны находиться только предметы, необходимые для выполнения данной работы.

4. Расположение аппаратуры на рабочем столе должно быть таким, чтобы схема соединений получилась наиболее простой, наглядной и работа с аппаратурой была удобной.

5. Желательно, чтобы схему собирал один из членов бригады, а другие контролировали.

6. При сборке сложных схем следует вначале соединить главную, последовательную цепь, начиная сборку от одного зажима источника тока и заканчивая на другом, а затем уже подключить параллельные цепи.

7. После того, как схема будет собрана, необходимо убедиться в правильной установке движков реостатов, автотрансформаторов и рукояток других регулирующих устройств.



8. Собранная схема обязательно должна быть проверена преподавателем или старшим лаборантом и только с их разрешения может быть включена под напряжение.

9. При включении схемы особое внимание следует обратить на показания амперметров и других измерительных приборов. В случае резкого движения стрелки амперметра к концу шкалы схему необходимо немедленно отключить от источника напряжения.

10. Необходимо бережно относиться к аппаратуре, используемой в работе. Обо всех замеченных неисправностях или повреждениях студент должен немедленно сообщить преподавателю или лаборанту.

11. После выполнения работы студент обязан, не разбирая схемы показать полученные данные преподавателю. Если результаты измерений верны, то преподаватель их подписывает. Эксперимент с неправильными результатами следует повторить.

12. Схему следует разбирать только после ее отключения от сети.

13. Категорически запрещается:

- трогать руками оголенные провода и части приборов, находящиеся под напряжением, даже если оно невелико;
- производить изменения в схеме при подключенном источнике питания;
- заменять или брать оборудование, или приборы с других рабочих мест
- без разрешения преподавателя или лаборанта;
- отходить от приборов и машин, находящихся под напряжением или оставлять схему под напряжением при обработке результатов измерений;
- перегружать приборы током или напряжением, превышающим номинальное значение.

Проверку наличия, подаваемого к схеме или элементам схемы напряжения необходимо производить только контрольной лампочкой или вольтметром, соблюдая правила техники безопасности.

При работе в лаборатории следует строго соблюдать меры предосторожности, так как электрический ток, проходящий через тело человека, величиной в 0,025 А уже является опасным для жизни.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

## **Методические указания**

по выполнению практических работ  
по дисциплине «ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ И КОНСТРУКЦИОННОЕ МАТЕРИАЛОВЕ-  
ДЕНИЕ»  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

## Содержание

| №<br>п/п |                                                                                                                                       | Стр. |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
|          | Введение                                                                                                                              |      |
| 1.       | Цель и задачи изучения дисциплины                                                                                                     |      |
| 2.       | Оборудование и материалы                                                                                                              |      |
| 3.       | Наименование практических работ                                                                                                       |      |
| 4.       | Содержание практических работ                                                                                                         |      |
| 4.1      | Практическая работа № 1. Строение металлов. Способы упрочнения металлов и сплавов.                                                    |      |
| 4.2      | Практическая работа №2. Общая теория сплавов. Сплавы цветных металлов.                                                                |      |
| 4.3.     | Практическая работа № 3. Диаграмма железо-цементит и фазовые превращения. Диаграммы состояния сплавов.                                |      |
| 4.4      | Практическая работа №4. Теория и технология термической обработки стали. Термическая обработка углеродистых сталей.                   |      |
| 4.5      | Практическая работа №5. Диэлектрики. Расчет опорно-стержневого изолятора наружной установки.                                          |      |
| 4.6      | Практическая работа №6. Электропроводность металлов. Расчет свинцового высоковольтного кабеля.                                        |      |
| 4.7      | Практическая работа №7. Классификация проводниковых материалов и их основные свойства. Расчет питающей линии электрической установки. |      |
| 5        | Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины                                                                           |      |
| 5.1      | Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины                                                    |      |
| 5.2      | Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине                                            |      |
| 5.3      | Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины                               |      |

## Введение

Практические занятия создают оптимальные дидактические условия для деятельностного освоения студентами содержания и методологии изучаемой дисциплины. Практические занятия занимают преимущественное место при изучении общепрофессиональных и профессиональных дисциплин. Практические занятия проводятся с целью выработки практических умений и приобретения навыков в решении задач, отработки упражнений, выполнении чертежей, производстве расчётов и т.п.

Целью практических занятий является формирование практических умений – профессиональных (выполнять определённые действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности) или учебных, необходимых в последующей учебной деятельности по общепрофессиональным и профессиональным дисциплинам.

Библиографический список содержит сведения о справочной литературе и дополнительных изданиях, необходимых для углубленного изучения отдельных вопросов.

## 1. Цель и задачи изучения дисциплины

Целью дисциплины является изучение состава и свойств конструкционных и электротехнических материалов в зависимости от их химического состава, структуры и той среды, в которой им предстоит находиться или работать.

Задачами изучения дисциплины являются:

- знакомство с основными достижениями в области электротехнического и конструкционного материаловедения;
- понимание процессов и явлений, которые происходят в электротехнических и конструкционных материалах при различных воздействиях;
- умение влиять на свойства материалов с помощью технологических процессов, позволяющих предотвращать вредные воздействия окружающей среды в процессе работы соответствующего оборудования.

## 2. Оборудование и материалы

Аппаратные средства: переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения.

## 3. Наименование практических работ

Для заочной формы обучения предусмотрены следующие практические работы: Практическая работа № 3. Диаграмма железо-цементит и фазовые превращения. Диаграммы состояния сплавов – 1,5 часа; Практическая работа №5. Диэлектрики. Расчет опорно-стержневого изолятора наружной установки – 1,5 часа.

| № Темы дисциплины | Наименование тем дисциплины, их краткое содержание                                                                                                                                                                      | Объем часов | Из них практическая подготовка, часов |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------------------------------------|
| 4 семестр         |                                                                                                                                                                                                                         |             |                                       |
| 1                 | <b>Практическая работа № 1. Строение металлов.</b> Способы упрочнения металлов и сплавов. Получить представление о способах упрочнения металлов и количественной зависимости предела текучести от параметров структуры. | 3           |                                       |
| 2                 | <b>Практическая работа №2. Общая теория сплавов.</b> Сплавы цветных металлов. Получить представление о сплавах на основе алюминия, меди, титана и других цветных ме-                                                    | 1,5         |                                       |

Сертификат: 2C0000043E9AB8B932203E7BA300060000043E  
Владелец: Шебзухова Татьяна Викторовна  
Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

|   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |             |  |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--|
|   | таллов. Ознакомиться с возможностями термической обработки цветных сплавов. Усвоить маркировку сплавов на основе алюминия и меди. Освоить основы выбора сплавов с необходимыми свойствами для конкретных условий эксплуатации.                                                                                                                                                                                                                                                                   |             |  |
| 3 | <b>Практическая работа № 3. Диаграмма железо-цементит и фазовые превращения.</b> Диаграммы состояния сплавов.<br>Изучить основные разновидности диаграмм состояния двойных сплавов; научиться анализировать диаграммы состояния: определять температуры начала и окончания плавления сплавов, находить области равновесного существования твёрдых растворов, обосновывать возможность проведения упрочняющей термической обработки сплавов, оценивать их технологические свойства.               | 3           |  |
| 4 | <b>Практическая работа №4. Теория и технология термической обработки стали.</b> Термическая обработка углеродистых сталей.<br>Получить представление об операциях термической обработки, применяемых для упрочнения и разупрочнения углеродистых сталей. Изучить взаимосвязь между содержанием углерода в стали, структурой и механическими свойствами стали после термической обработки; научиться выбирать режим термической обработки стали для получения необходимых в эксплуатации свойств. | 1,5         |  |
| 5 | <b>Практическая работа №5. Диэлектрики.</b> Расчет опорно-стержневого изолятора наружной установки.<br>Познакомиться с конструкцией и основами расчета опорных стержневых изоляторов.                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 1,5         |  |
| 6 | <b>Практическая работа №6. Электропроводность металлов.</b> Расчет свинцового высоковольтного кабеля.<br>Познакомиться с конструкцией и основами расчета свинцового высоковольтного кабеля.                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1,5         |  |
| 7 | <b>Практическая работа №7. Классификация проводниковых материалов и их основные свойства.</b> Расчет питающей линии электрической установки.<br>Познакомиться с основами расчета питающей линии электрической установки.                                                                                                                                                                                                                                                                         | 1,5         |  |
|   | <b>Итого за 4 семестр:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>13,5</b> |  |
|   | <b>Итого:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | <b>13,5</b> |  |

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

#### 4. Содержание практических работ

##### **Практическая работа № 1. Строение металлов. Способы упрочнения металлов и сплавов.**

**Цель:** Получить представление о способах упрочнения металлов и количественной зависимости предела текучести от параметров структуры.

##### **Основы теории:**

Значительная пластическая деформация деталей машин и конструкций при эксплуатации недопустима. Поэтому повышение прочности металлов и сплавов означает, прежде всего, повышение предела текучести.

Область II на диаграмме растяжения является областью борьбы за прочность (рис. 1.1). Здесь происходит пластическая деформация, т. е. движение дислокаций

Чтобы затруднить перемещение дислокаций, нужно создать препятствия для их движения – или избавиться от дислокаций совсем.

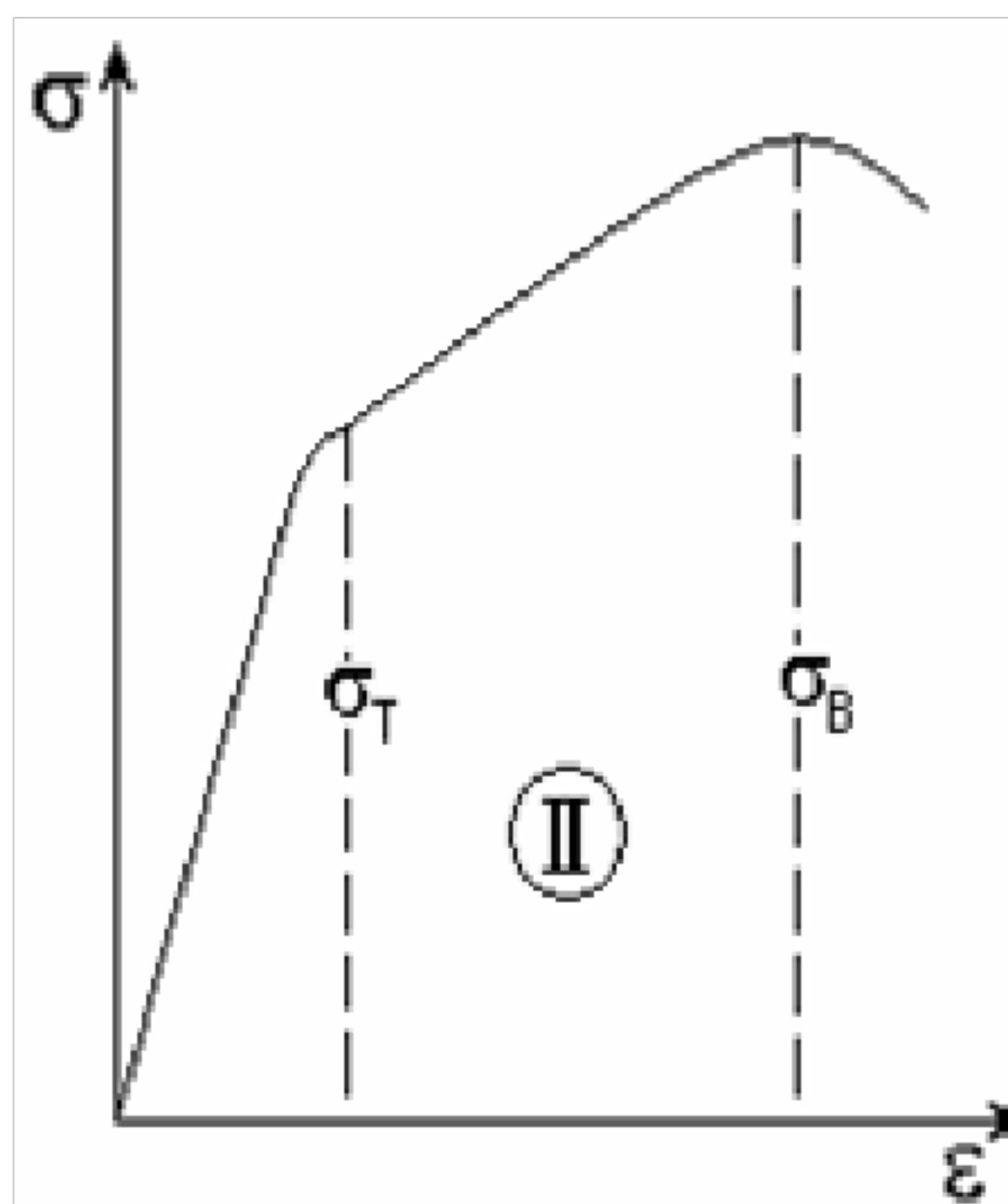
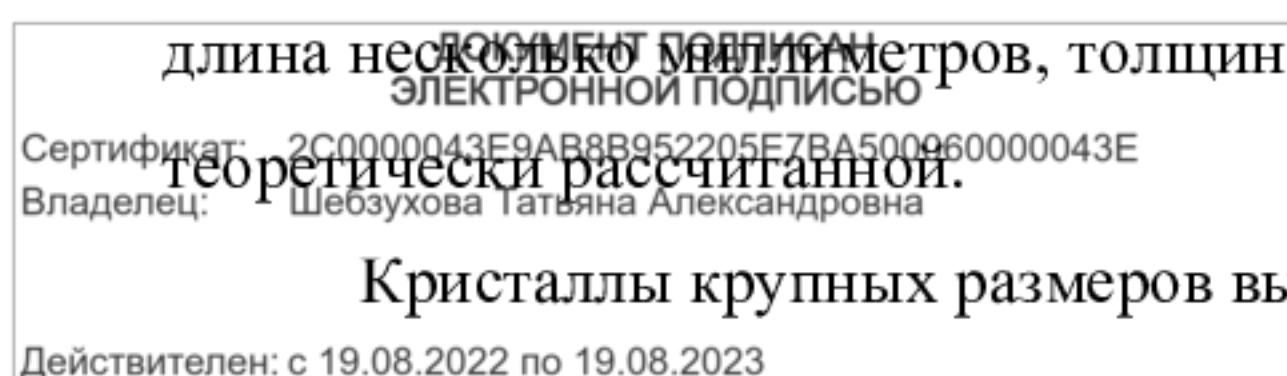


Рисунок 1.1 – Область пластической деформации

Упрочнение за счёт создания бездефектных кристаллов

Бездефектные кристаллы удастся вырастить в виде тонких нитей, или «усов» (их длина несколько миллиметров, толщина до 20 мкм). Их прочность действительно близка к теоретически рассчитанной.

Кристаллы крупных размеров вырастить без дефектов не удаётся.



Не совсем ясно, играет в прочности «усов» главную роль отсутствие дефектов или поверхностное натяжение. Изделия, содержащие такие кристаллы, высокой прочностью не обладают.

Можно сказать, что пока этот путь создания высокопрочных материалов не реализован.

Упрочнение за счёт торможения движущихся дислокаций

#### 1) Упрочнение самими дислокациями

В ходе пластической деформации создается такая высокая плотность дислокаций, что они сами начинают взаимно тормозить скольжение друг друга. Возникает так называемый «лес дислокаций». При повторном испытании уже продеформированного образца предел текучести оказывается больше:  $\sigma_{T2} > \sigma_{T1}$  (рис. 1.2).

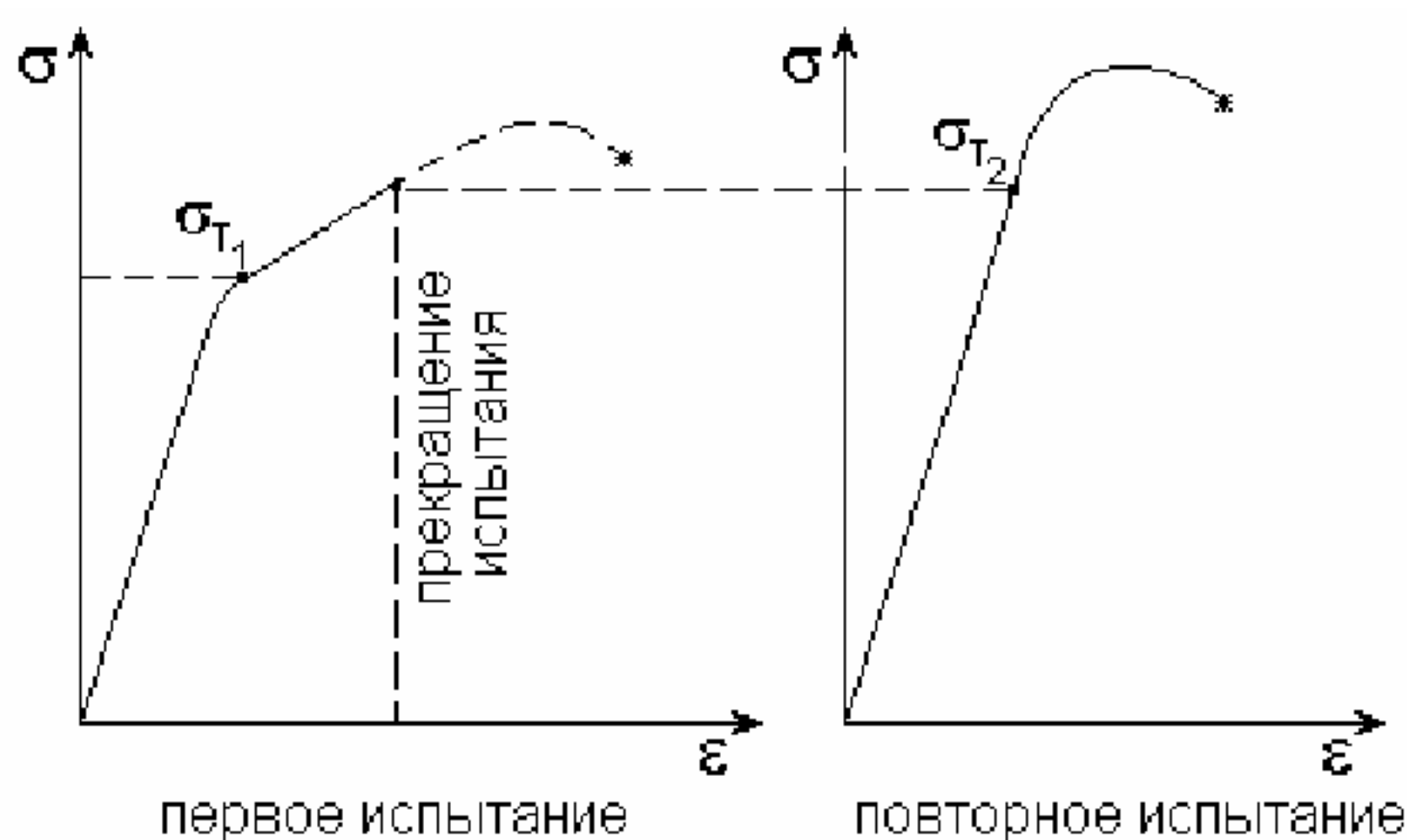


Рисунок 1.2 – Упрочнение металла при повторном испытании на растяжение

Увеличение предела текучести связано с плотностью дислокаций зависимостью

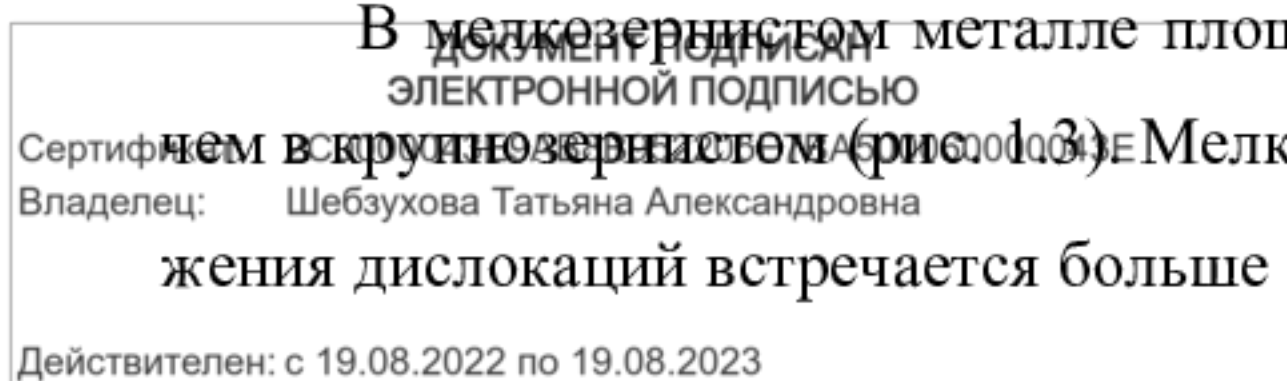
$$\sigma_T = \sigma_0 + \alpha \cdot G \cdot b \cdot \sqrt{\rho},$$

где  $\sigma_0$  – напряжение сдвига до упрочнения;  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от природы металла;  $G$  – модуль сдвига;  $b$  – вектор Бюргерса (равен расстоянию между соседними атомными плоскостями),  $\rho$  – плотность дислокаций.

Примерами использования такого механизма упрочнения являются дробеструйный наклёп пружин, рессор и штампов, патентирование проволоки, чистовая обработка поверхностным пластическим деформированием (обкатка роликами, дорнование отверстий).

#### 2) Упрочнение границами зёрен

В мелкозернистом металле площадь поверхности зёрен в единице объёма больше, чем в крупнозернистом (рис. 1.3). Мелкозернистый металл прочнее, так как на пути скольжения дислокаций встречается больше барьеров – границ зёрен:  $\sigma_{T2} > \sigma_{T1}$ .



Зависимость предела текучести от размера зерна описывается отношением Холла–Петча:

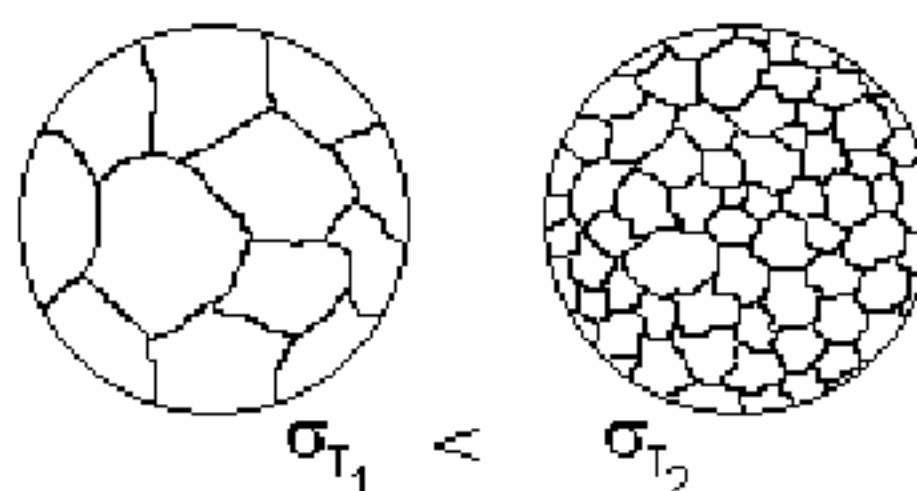


Рисунок 1.3 – Упрочнение границами зерен

$$\sigma_T = \sigma_0 + k \cdot d^{1/2},$$

где  $\sigma_0$  – напряжение сдвига до упрочнения;  $k$  – постоянная для данного металла,  $d$  – диаметр зерна.

Примеры: модифицирование сплавов при выплавке и литье, рекристаллизация сильно наклепанного металла, измельчение зерна при фазовых превращениях.

### 3) Упрочнение растворёнными атомами примесей

Искажения решётки, вызванные атомами примесей, мешают дислокациям свободно скользить (рис. 1.4).

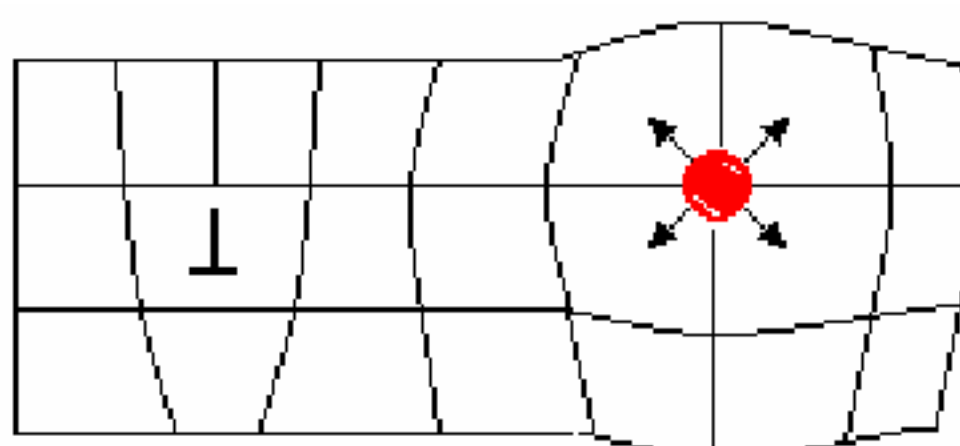


Рисунок 1.4 – Упрочнение твёрдым раствором

В первом приближении упрочнение при образовании твёрдого раствора можно определить по формуле Мотта-Набарро в зависимости от количества примеси:

$$\sigma_T = G \cdot \varepsilon^2 \cdot C,$$

где  $G$  – модуль сдвига,  $\varepsilon$  – параметр, зависящий от различия размеров атомов растворённого компонента  $r$  и растворителя  $r_0$ ,  $C$  – атомная концентрация растворённого компонента. Можно принять параметр  $\varepsilon = (r - r_0)/r_0$ .

Примерами применения такого механизма упрочнения являются практически все сплавы в современной технике. Все они являются твёрдыми растворами. При закалке сплавов создают пересыщенные твёрдые растворы, добиваясь значительного упрочнения.

### 4) Упрочнение дисперсными частицами второй фазы

Дисперсные, т. е. очень мелкие, частицы имеют размеры порядка 100 нм. Более крупные частицы не являются таким эффективным препятствием для дислокаций.

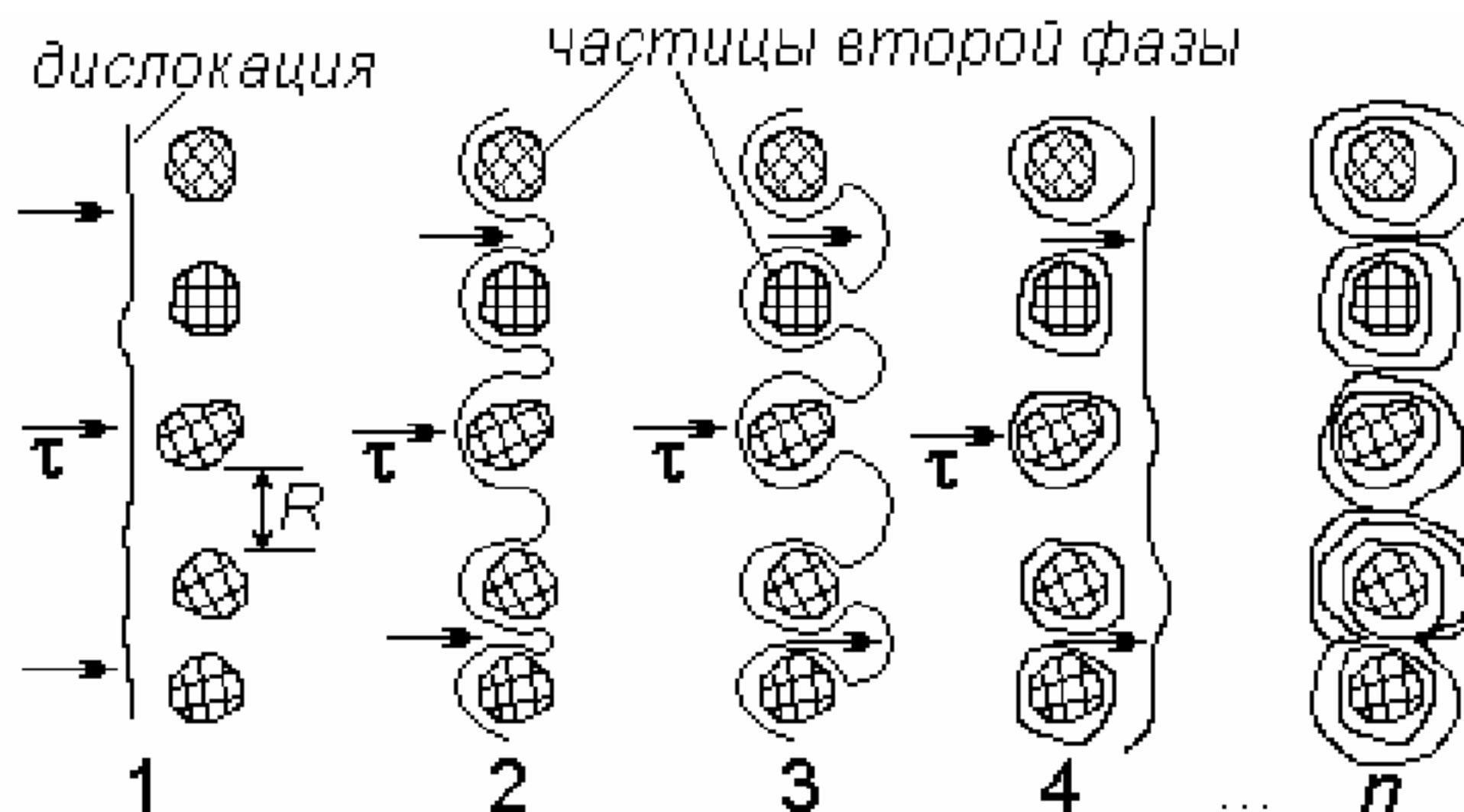


Рисунок 1.5 – Упрочнение дисперсными частицами второй фазы

Огибая мелкие частицы (рис. 1.5, 2), дислокации замыкаются вокруг них (3), при этом возникают дислокационные петли (4), или кольца. Прохождение множества дислокаций приводит к образованию так называемых колец Орована (n).

Дальнейшее скольжение дислокаций на этом участке затруднено.

Если частицы второй фазы не округлые, а игольчатые, то дислокации «наматываются» на них, как нитки на веретено.

Упрочнение дисперсными частицами зависит от расстояния между ними  $L$ :

$$\sigma_T = \sigma_0 + (G \cdot b) / L,$$

где  $\sigma_0$  – напряжение сдвига до упрочнения;  $G$  – модуль сдвига;  $b$  – вектор Бюргерса (равен расстоянию между соседними атомными плоскостями).

По такому механизму упрочняются очень многие сплавы: дуралюмины, бронзы, сплавы титана, некоторые стали.

В большинстве современных высокопрочных материалов используются несколько способов упрочнения одновременно: твёрдый раствор и мелкие частицы химического соединения, твёрдый раствор с высокой плотностью дислокаций и т. п.

По такому механизму упрочняются очень многие сплавы: дуралюмины, бронзы, сплавы титана, некоторые стали.

В большинстве современных высокопрочных материалов используются несколько способов упрочнения одновременно: твёрдый раствор и мелкие частицы химического соединения, твёрдый раствор с высокой плотностью дислокаций и т. п.

## Вопросы и задания

1. Объясните следующие явления на основе представлений о дислокациях:

- а) холодная механическая обработка повышает твёрдость алюминия;
- б) сплав, состоящий из 20 % цинка и 80 % меди, твёрже чистой меди;
- в) твёрдость никеля возрастает при введении в него частиц окиси тория.

2. Необходимо получить сплав:

- а) с большим сопротивлением деформации, твёрдостью, прочностью, имеющий высокую долговечность и работоспособность при работе в условиях износа и значительных механических нагрузок;

- б) с высокой пластичностью, низкими значениями твёрдости и сопротивления деформации, имеющий хорошую обрабатываемость резанием и давлением.

Опишите структуру сплава, которая обеспечит требуемые свойства в обоих случаях.

3. Определить предел текучести и величину упрочнения металла после холодной пластической деформации, в результате которой плотность дислокаций увеличилась до  $10^{10} \text{ см}^{-2}$ .

| Металл   | $\sigma_0$ , МПа | $b$ , нм | $\alpha$ | $G$ , ГПа |
|----------|------------------|----------|----------|-----------|
| Алюминий | 40               | 0,404    | 0,3      | 27        |
| железо   | 130              | 0,286    | 0,2      | 77        |

Связь между пределом текучести и плотностью дислокаций описывается уравнением

$$\sigma_T = \sigma_0 + \alpha \cdot G \cdot b \cdot \sqrt{\rho},$$

где  $\sigma_0$  – напряжение сдвига до упрочнения;  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от природы металла;  $G$  – модуль сдвига;  $b$  – вектор Бюргерса (равен расстоянию между соседними атомными плоскостями).

4. Сплав железа с 0,8 % углерода имеет структуру твёрдого раствора с дисперсными частицами карбида железа  $\text{Fe}_3\text{C}$ , очень твёрдыми и прочными. Определить предел текучести сплава, если расстояние между частицами  $\text{Fe}_3\text{C}$  составляет: а) 20 нм, б) 40 нм, в) 60 нм, г) 80 нм, д) 100 нм.

Считать, что дислокации проходят между частицами. Предел текучести зависит от расстояния между частицами следующим образом:

$$\sigma_T = \sigma_0 + (G \cdot b) / L,$$

где  $\sigma$  – напряжение сдвига до упрочнения;  $G$  – модуль сдвига;  $b$  – вектор Бюргерса (равен расстоянию между соседними атомными плоскостями).

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 2C017D4E-9AB8-4A6B-AF0E-BE0D9E5E9C9A где  $d_{\max}$  — напряжение сдвига до у  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
**(равен расстоянию между соседними ат**  
Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

| Металл | $\sigma_0$ , МПа | $b$ , нм | $G$ , ГПа |
|--------|------------------|----------|-----------|
| железо | 130              | 0,286    | 77        |

Построить график зависимости  $\sigma_T = f(L)$  и проанализировать его.

5. Определить предел текучести железа с величиной зерна 100, 50, 30, 10 и 5 мкм, используя отношение Холла–Петча:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k \cdot d^{1/2},$$

где  $\sigma_0$  – напряжение сдвига до упрочнения (130 МПа для железа);  $k$  – постоянная для данного металла (129 МПа·мм<sup>1/2</sup> для железа).

Построить график зависимости  $\sigma_T = f(d)$  и проанализировать его.

6. Сплав алюминия с 4 % меди имеет структуру твёрдого раствора с дисперсными частицами интерметаллического соединения CuAl<sub>2</sub>, имеющими повышенную прочность. Определить предел текучести сплава, если расстояние между частицами CuAl<sub>2</sub> составляет: а) 24 нм, б) 40 нм, в) 60 нм, г) 80 нм, д) 100 нм.

Считать, что дислокации проходят между частицами. Предел текучести зависит от расстояния между частицами следующим образом:

$$\sigma_T = \sigma_0 + (G \cdot b) / L,$$

где  $\sigma_0$  – напряжение сдвига до упрочнения;  $G$  – модуль сдвига;  $b$  – вектор Бюргерса (равен расстоянию между соседними атомными плоскостями).

| Металл | $\sigma_0$ | $b$  | $G$ |
|--------|------------|------|-----|
| алюми- | 40         | 0,40 | 27  |

Построить график зависимости  $\sigma_T = f(L)$  и проанализировать его.

7. Определить напряжение сдвига  $\tau$ , необходимое, чтобы выгнуть линию дислокации в полуокружность между мелкими твердыми частицами, расположенными на расстоянии  $L$  друг от друга.

8. Предел текучести крупнозернистой латуни 20 МПа. При величине зерна 4 мкм – 120 МПа. Чем объясняется такое увеличение и чему равен коэффициент  $\beta$  для латуни? ( $\sigma_T = \beta \cdot d^{1/2}$ .)

9. Определить предел текучести и величину упрочнения металла после холодной пластической деформации, в результате которой плотность дислокаций увеличилась до  $10^{10}$  см<sup>-2</sup>.

| Металл | $\sigma_0$ , МПа | $b$ , нм | $\alpha$ | $G$ , ГПа |
|--------|------------------|----------|----------|-----------|
| титан  | 450              | 0,296    | 0,4      | 44        |
| никель | 150              | 0,352    | 0,3      | 73        |

Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

Связь между пределом текучести и плотностью дислокаций описывается уравнением

$$\sigma_T = \sigma_0 + \alpha \cdot G \cdot b \cdot \sqrt{\rho},$$

где  $\sigma_0$  – напряжение сдвига до упрочнения;  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от природы металла;  $G$  – модуль сдвига;  $b$  – вектор Бюргерса (равен расстоянию между соседними атомными плоскостями).

10. Два образца из одного и того же металла были пластически деформированы с уменьшением площади поперечного сечения. Один образец представляет собой цилиндр, а второй – прямоугольный параллелепипед; форма поперечного сечения в ходе деформации не изменилась.

Исходные и конечные размеры образцов следующие:

|                  | Цилиндрический<br>(диаметр, мм) | Призматический (мм) |
|------------------|---------------------------------|---------------------|
| Исходные размеры | 15,2                            | 125/175             |
| Конечные размеры | 11,4                            | 75/200              |

Какой из образцов приобрёл наибольшую твёрдость после деформации? Объясните ответ.

11. Недеформированный металл имеет средний размер зерна 40 мкм. Можно ли добиться уменьшения величины зерна до 10 мкм?

Если да, то объясните, каким способом это можно сделать и какие процессы произойдут в структуре металла. Если нет – объясните, почему.

## **Практическая работа №2. Общая теория сплавов. Сплавы цветных металлов.**

**Цель:** Получить представление о сплавах на основе алюминия, меди, титана и других цветных металлов. Ознакомиться с возможностями термической обработки цветных сплавов. Усвоить маркировку сплавов на основе алюминия и меди. Освоить основы выбора сплавов с необходимыми свойствами для конкретных условий эксплуатации.

### **Основы теории:**

Сталь – почти идеальный металлический материал, но она имеет существенный недостаток: детали и конструкции, сделанные даже из высокопрочной, стали, тяжелы. Во многих отраслях техники, особенно в самолётостроении, необходимы такие же прочные, но более лёгкие материалы. Лёгкими принято считать все металлы и сплавы, плотность которых составляет меньше половины плотности железа, т. е. не превышает  $3,5 \text{ г/см}^3$ . К ним относятся алюминий Al ( $\gamma = 2,7 \text{ г/см}^3$ ), магний Mg ( $\gamma = 1,74 \text{ г/см}^3$ ), бериллий Be ( $\gamma = 1,82 \text{ г/см}^3$ ). Наибольшее применение из этих металлов в качестве конструкционного материала имеет алюминий.

#### **Алюминий и его сплавы**

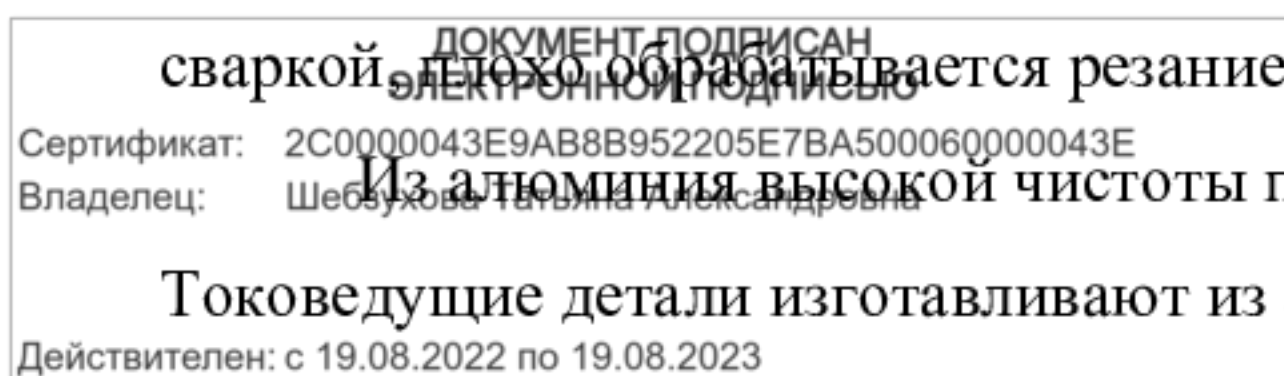
Алюминий – серебристо-белый металл с матовым оттенком. Кристаллическая решётка алюминия – гранецентрированный куб с периодом,  $a = 0,4041 \text{ нм}$ . Полиморфных превращений алюминий не имеет. Температура плавления –  $660^\circ\text{C}$ . Чистый отожжённый алюминий непрочен:  $\sigma_B = 50\text{--}60 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{0,2} = 15\text{--}20 \text{ МПа}$ , твёрдость  $20\text{--}25 \text{ НВ}$ , зато пластичность у него высокая: удлинение при разрыве составляет  $30\text{--}50 \%$ , относительное сужение –  $80\text{--}95 \%$ .

Чистый алюминий применяют в электротехнике для изготовления проводников тока, его электропроводимость  $37,6 \text{ м/Ом}\cdot\text{мм}^2$ . Он уступает только серебру с проводимостью  $63,0 \text{ м/Ом}\cdot\text{мм}^2$  и меди –  $60,1 \text{ м/Ом}\cdot\text{мм}^2$ . Все примеси, присутствующие в алюминии (постоянными являются Fe и Si), ухудшают его тепло- и электропроводимость. Алюминий устойчив к коррозии на воздухе, а также в среде многих газов и жидкостей благодаря защитному действию плотной пленки оксида  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Чем чище металл, тем выше его коррозионная стойкость.

Алюминий допускает глубокую вытяжку, хорошо сваривается газовой и контактной сваркой, хорошо обрабатывается резанием, имеет низкие литейные качества.

Из алюминия высокой чистоты получают фольгу для электрических конденсаторов.

Токоведущие детали изготавливают из алюминия технической чистоты.



Основная масса алюминия расходуется на производство алюминиевых сплавов. Предел прочности алюминиевых сплавов достигает 500–700 МПа при плотности не более 2,85 г/см<sup>3</sup>. По удельной прочности некоторые алюминиевые сплавы соответствуют высокопрочным сталям:  $\sigma_B/(\rho \cdot g) = 23$ .

В зависимости от способа изготовления деталей и изделий сплавы алюминия делятся на деформируемые и литейные.

Деформируемые сплавы легко поддаются обработке давлением и предназначены для прокатки,ковки, прессования. Литейные сплавы отличаются жидкотекучестью, хорошо заполняют форму, малочувствительны к литейным трещинам; их используют для изготовления фасонных отливок при помощи литья в землю или в металлические формы.

*Деформируемые сплавы*, в зависимости от химического состава, делятся на сплавы с естественной твёрдостью, т. е. не поддающиеся упрочнению термической обработкой, и термически упрочняемые сплавы. Сплавы, *не упрочняемые термической обработкой*, содержат мало легирующих элементов и применяются вместо чистого алюминия в тех случаях, когда его прочность недостаточна. Они легированы магнием в количестве 0,5–5 %, а также марганцем (до 1,2 %). Их прочность можно повысить путём холодной обработки давлением (явление наклёпа). Например, деформируемый алюминиевый сплав АМгЗ ( $\approx 3\%$  Mg) в отожжённом состоянии имеет прочность на разрыв 180 МПа и удлинение 15 %, при небольшом наклёпе – 230 МПа и 8 %, после сильного наклёпа – 260 МПа и 3 %. Как видно из этих данных, в результате холодной деформации прочность сплава возрастает, а пластичность снижается.

Эти сплавы предназначены для работы в коррозионных средах, так как и марганец, и магний увеличивают коррозионную стойкость алюминиевых сплавов.

Применяют сплавы, не упрочняемые термической обработкой, для изготовления оконных рам вагонов, кузовов автомобилей, трубопроводов для бензина и масла, сварных баков и т. д.

Большая часть деформируемых алюминиевых сплавов – это сплавы, упрочняемые термической обработкой, значительно повышающей прочностные свойства. Прочность возрастает в результате дисперсионного твердения, или старения, после закалки. Это многокомпонентные сплавы, в которые входят различные элементы для повышения прочности (Cu, Mg, Zn), жаропрочности (Fe), антикоррозионных свойств (Mn, Mg).

Химический состав некоторых алюминиевых сплавов, упрочняемых термической обработкой, приводится в табл. 4.1.

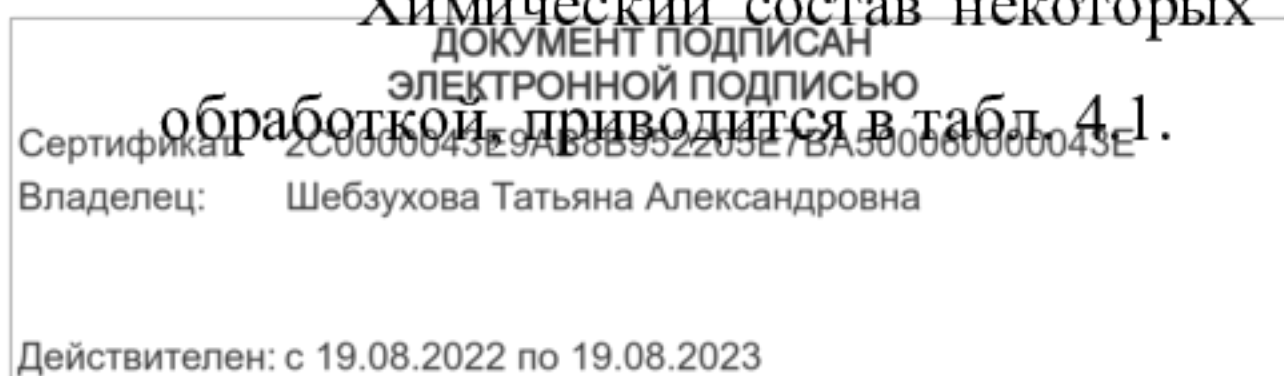


Таблица 4.1 – Химический состав термически упрочняемых алюминиевых сплавов (ГОСТ 4784-97)

| Сплавы        | Марка        | Химический состав, % |          |         |       |         |          |         |          |
|---------------|--------------|----------------------|----------|---------|-------|---------|----------|---------|----------|
|               |              | Cu                   | Mg       | Si      | Zn    | Fe      | Mn       | Ni      | Cr       |
| Дуралюмины    | Д1           | 3,8–4,8              | 0,4–0,8  | – 0,7   | – 0,3 | – 0,7   | 0,4–0,8  | – 0,1   | –        |
|               | Д16          | 3,8–4,9              | 1,2–1,8  | <0,5    | <0,3  | <0,5    | 0,3–0,9  | 0,1     | –        |
|               | Д18          | 2,2–3                | 0,2–0,5  | 0,8     | 0,25  | 0,7     | 0,2      | –       | 0,1      |
| Авиаль        | АВ           | 0,2–0,6              | 0,45–0,9 | 0,5–1,2 | <0,2  | <0,5    | 0,15–0,3 | –       | –        |
| Ковочные      | АК6<br>(АК8) | 1,8–2,6              | 0,4–0,8  | 0,7–1,2 | <0,3  | <0,7    | 0,4–0,8  | <0,1    | –        |
| Жаропрочные   | АК2<br>(АК4) | 3,5–4,5              | 0,4–0,8  | 0,5–1,0 | <0,3  | 0,5–1,0 | <0,2     | 1,8–2,3 | –        |
| Высокопрочные | В95          | 1,4–2,0              | 1,8–2,8  | –       | 5–7   | –       | 0,2–0,6  | –       | 0,1–0,25 |

Типичным представителем упрочняемых термообработкой алюминиевых сплавов являются дуралюмины, в которых основной легирующий элемент – медь. Диаграмма состояния сплавов алюминий – медь приведена на рис. 4.1.

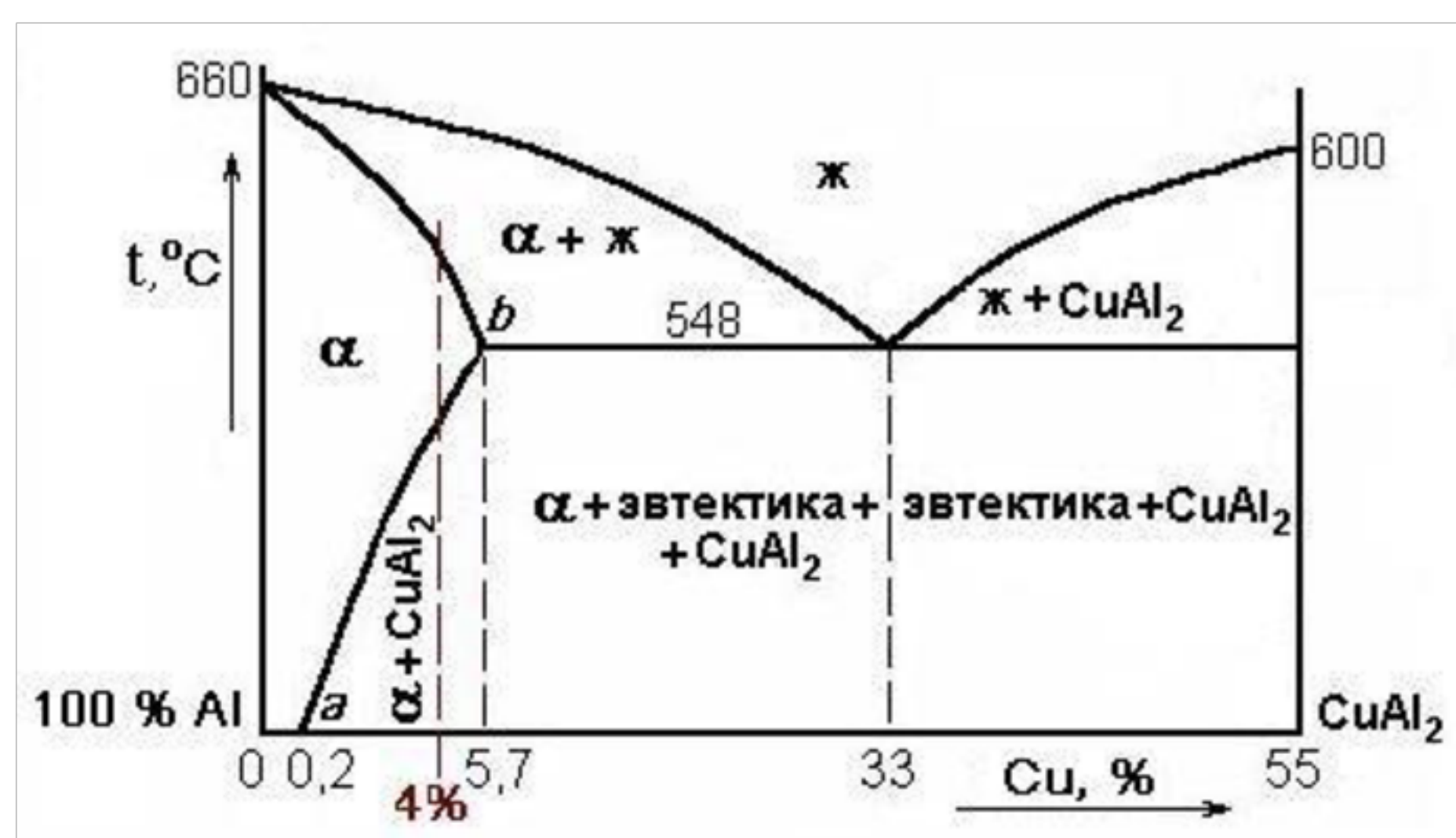


Рисунок 4.1 – Диаграмма состояния алюминий медь

На диаграмме видно, что алюминий в твёрдом состоянии способен растворять определённое количество меди, причем её растворимость максимальна при 548 С. Твёрдый раствор при этой температуре содержит 5,7 % Cu. С понижением температуры растворимость меди быстро уменьшается: при комнатной температуре она составляет 0,2 %. Структура алюминиевого сплава с 4 % Cu в равновесных условиях состоит из кристаллов твёрдого раствора, содержащего очень мало меди, и кристаллов интерметаллида CuAl<sub>2</sub>. Прочность такого сплава

невелика (140 МПа).

Термическое упрочнение осуществляется в два этапа.

На первом этапе сплав нагревают под закалку до такой температуры, при которой

достигается максимальное растворение меди: выше линии предельной растворимости  $ab$ , но ниже солидуса. При этом химическое соединение растворяется, и образуется однородный твёрдый раствор с концентрацией меди 4 %. Быстрое охлаждение, чаще всего в воде, предотвращает выделение  $CuAl_2$ , т. е. в результате закалки фиксируется структурное состояние сплава, достигнутое при высокой температуре. Атомы меди остаются в пересыщенном (переохлаждённом) твёрдом растворе. Этот пересыщенный твёрдый раствор при комнатной температуре является неустойчивой фазой, с повышенным запасом свободной энергии, связанной с искажениями кристаллической решётки алюминия атомами меди. Вся медь сверх равновесной концентрации 0,2 % будет стремиться выделиться из твёрдого раствора.

Второй этап термического упрочнения заключается в том, что из полученного при закалке твёрдого раствора постепенно, с течением времени, выделяется медь, образуя дисперсные частицы химического соединения  $CuAl_2$ . В этом и состоит старение сплава.

Старением сплавов называют процессы распада твёрдого раствора, происходящие самопроизвольно в предварительно закалённом сплаве и приводящие к изменению структуры и свойств с течением времени.

Естественное старение происходит при комнатной температуре в течение нескольких суток (от 4 до 7). Искусственное старение (при повышенных температурах) происходит гораздо быстрее, в течение нескольких часов или минут, и дает наивысшие результаты.

Дисперсные частицы, возникающие в твёрдом растворе в процессе выдержки после закалки, препятствуют скольжению дислокаций при деформировании, поэтому прочность и твёрдость сплава возрастают. Прочность дуралюмина после естественного старения составляет около 400 МПа, т. е. почти вдвое больше, чем у отожжённого. Искусственное старение проводится при температурах 150–170 °С.

Все остальные алюминиевые сплавы, представленные в табл. 4.1, упрочняются такой же термической обработкой – закалкой и старением. Отличие только в выборе режима. Механические характеристики упрочнённых алюминиевых сплавов представлены в табл. 4.2.

Литейные алюминиевые сплавы должны обладать узким температурным интервалом кристаллизации для получения плотной отливки, т. е. это сплавы, близкие по составу к эвтектике или эвтектические. Широко применяются литейные сплавы  $Al-Cu$ ,  $Al-Zn$ ,  $Al-Si$ . Наилучшими литейными свойствами обладают сплавы алюминий – кремний, по составу близкие к эвтектическому. Эти сплавы называют силуминами. Маркируются литейные алюминиевые сплавы буквами  $AL$  (алюминиевый литейный) и кодирующей цифрой, определяющей химический состав сплава, например:  $AL2$ ,  $AL4$ .

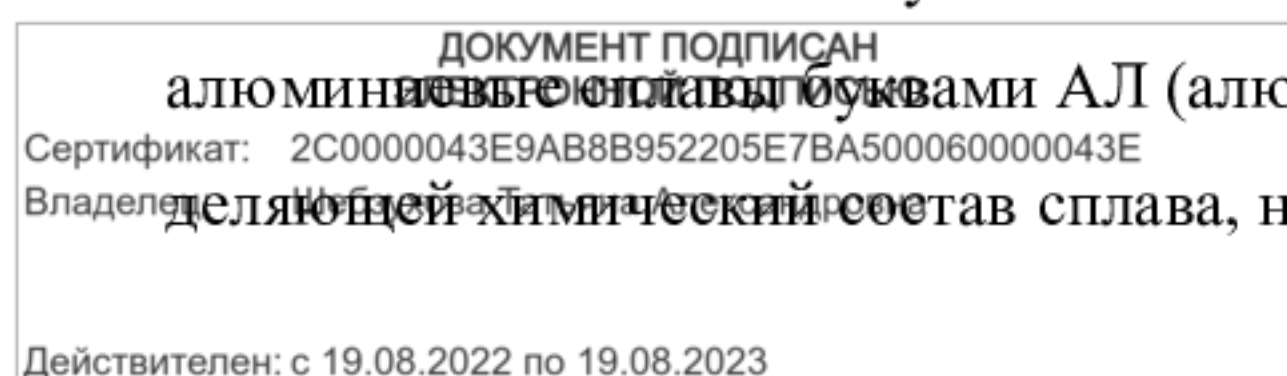
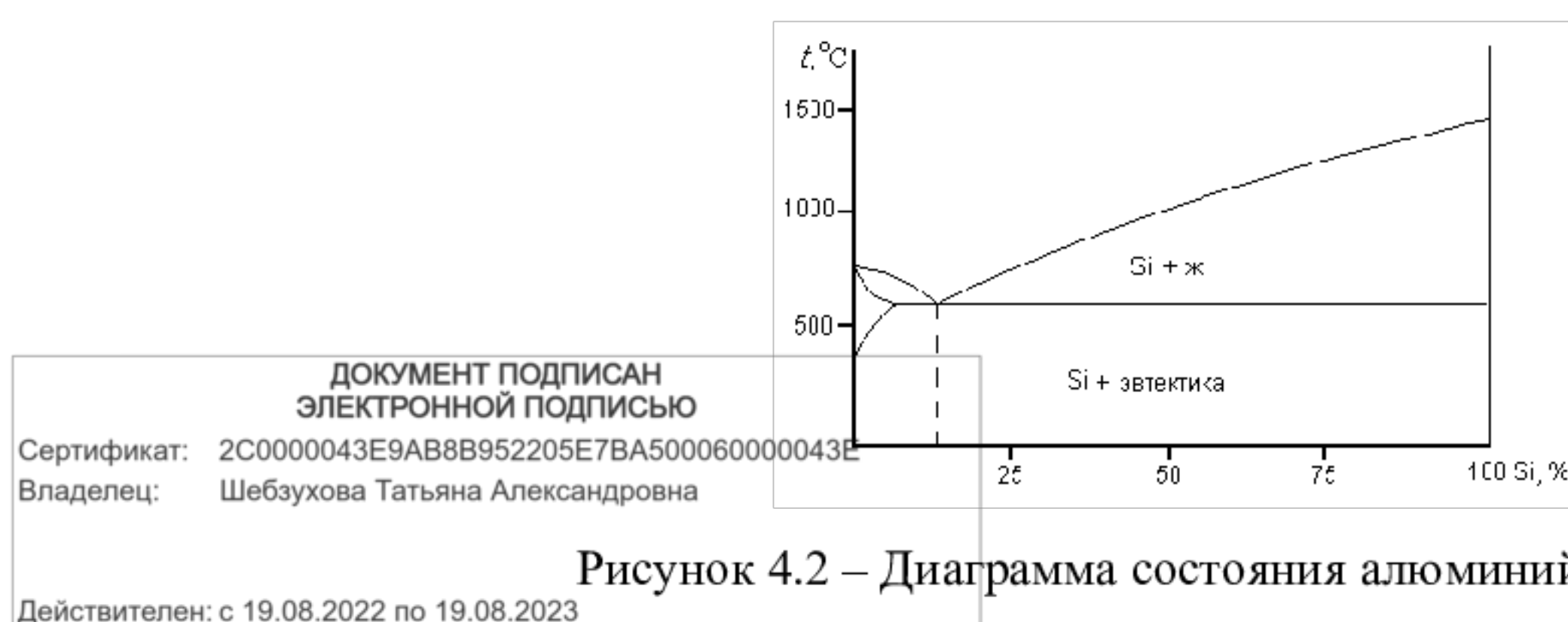


Таблица 4.2 – Механические свойства деформируемых алюминиевых сплавов

| Сплав | Вид полуфабриката   | Механические свойства |               |                                                |              |      |
|-------|---------------------|-----------------------|---------------|------------------------------------------------|--------------|------|
|       |                     | $\sigma_B$            | $\sigma_{02}$ | $\sigma_{-1}$<br>( $5 \cdot 10^6$ цик-<br>лов) | $\delta$ , % | $HB$ |
|       |                     | МПа                   |               |                                                |              |      |
| Д1*   | Листы               | 400                   | 240           | 105                                            |              |      |
|       | Прессованные прутки | 480                   | 320           | 125                                            | 20           | 95   |
| Д16*  | Листы               | 440                   | 330           | 115                                            | 14           | –    |
|       | Прессованные прутки | 530                   | 400           | 140                                            | 18           | 105  |
| Д18*  | Проволока           | 300                   | 170           | 95                                             | 11           | –    |
| В95** | Листы               | 540                   | 470           | 150                                            | 24           | 70   |
|       | Прессованные прутки | 600                   | 560           | 150                                            | 10           | 150  |
| АК6** | Поковки             | 400                   | 299           | 125                                            | 8            | 150  |
| АК8** | Поковки             | 480                   | 380           | 130                                            | 12           | 100  |
|       |                     |                       |               |                                                | 9            | 135  |

Обычный силумин АЛ2 является заэвтектическим сплавом, содержащим 12–13 % Si (рис. 7.2). После кристаллизации структура этого сплава представляет собой крупные светлые включения избыточного кремния и грубоигольчатую эвтектику. Сплав с такой структурой обладает низкими механическими свойствами: прочность составляет 100–120 МПа, а относительное удлинение при разрыве – 3–5 %. Только путем модифицирования расплава натрием или смесью NaF и NaCl удаётся получить мелкозернистую эвтектику со значительно более мелкими кристалликами кремния. Это приводит к значительному повышению механических свойств:  $\sigma_B = 180\text{--}200$  МПа и  $\delta = 6\text{--}8$  %.

Двойные алюминий-кремнистые сплавы обладают очень хорошей жидкотекучестью, поэтому из них изготавливают фасонные отливки сложной формы, для которых не требуется высоких механических свойств. Для повышения эксплуатационных и механических свойств (отливки для нагруженных деталей авиационных двигателей, литые детали, предназначенные для работы при температурах 250–300 °С и т. д.) сплавы легируют магнием, медью, марганцем, никелем или подвергают термической обработке – закалке в воду и искусственному старению. При этом предел прочности может достигать 240–260 МПа при относительном удлинении 20–18 %.



Легированные силумины могут применяться для изготовления корпусов компрессоров, картеров, головок цилиндров (АЛ9), деталей, работающих в условиях высокой влажности, в судостроении и самолетостроении (АЛ8, АЛ27).

#### Медь и её сплавы

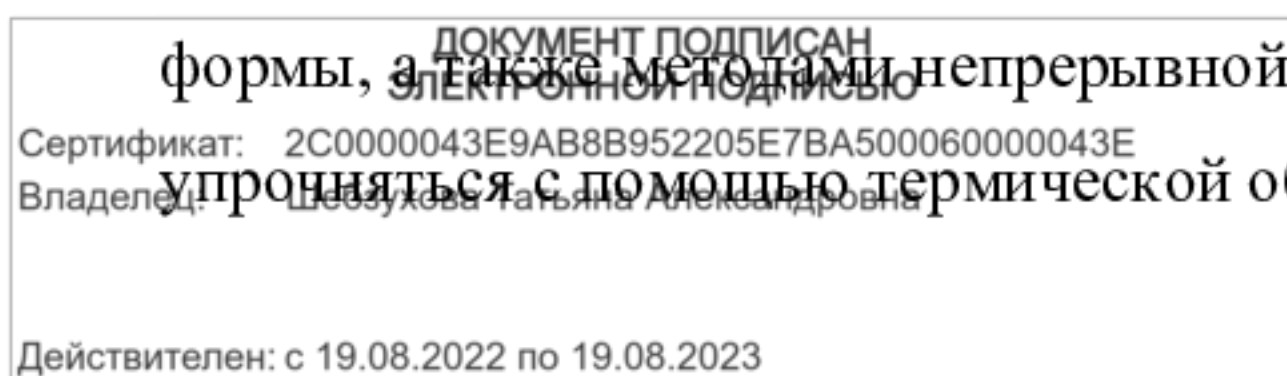
Медь – действительно «цветной» металл: её цвет может варьироваться от светлорозового до красного. Медь имеет гранецентрированную кубическую решётку с параметром  $a = 0,361$  нм. Полиморфных превращений у меди нет; температура плавления  $1083 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Медь обладает высокой технологичностью: хорошо паяется, сваривается, легко обрабатывается давлением. В отожжённом состоянии предел прочности меди невелик, он составляет 200–250 МПа при относительном удлинении около 40–50 %.

Главными отличительными характеристиками меди являются высокая теплопроводность и электропроводимость, пластичность и коррозионная стойкость. Но так же, как и у алюминия, примеси отрицательно влияют на свойства меди. В зависимости от содержания примесей различают следующие марки меди (ГОСТ 859–78): М00 (99,99 % Cu), М0 (99,97 % Cu), М2 (99,7 % Cu). Благодаря высокой электропроводимости медь нашла широкое применение в электротехнике. Из меди изготавливают шины, ленты, кабели, рубильники, обмотки электродвигателей и т. д. Примеси понижают электропроводимость, особенно те, что образуют с медью твердые растворы: фосфор, мышьяк, алюминий, олово. Другое основное свойство меди – высокая теплопроводность. Поэтому медь используют в металлургии и литейном производстве для водоохлаждаемых тиглей, кристаллизаторов, поддонов и изложниц.

Вредными примесями меди также являются висмут и свинец. Они практически не растворяются в меди, а образуют легкоплавкие эвтектики (с температурой плавления  $326 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $270 \text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно) и создают красноточность при горячей прокатке меди.

На механические свойства меди примеси влияют незначительно; в большей мере свойства зависят от состояния (литое, деформированное и т. д.). Для повышения прочности медь легируют цинком, алюминием, оловом, никелем, железом или подвергают холодной пластической деформации. При этом её прочность может возрасти до 380–450 МПа при уменьшении электропроводимости на 3–5 %.

Медные сплавы, как и сплавы большинства других цветных металлов, по технологическим свойствам подразделяются на деформируемые (которые используются в производстве полуфабрикатов: листов, полос, проволоки и других профилей) и литейные (применяемые для изделий, которые получают путем литья в песчаные или металлические формы, а также методами непрерывной разливки и центробежного литья). По способности упрочняться с помощью термической обработки медные сплавы делятся на упрочняемые и



не упрочняемые термической обработкой. По химическому составу медные сплавы подразделяются на две основные группы: латуни и бронзы.

Сплавы меди с цинком носят название латуней. Специальные (многокомпонентные) латуни содержат и другие легирующие элементы, такие как алюминий, никель, марганец. Маркируются двойные латуни следующим образом: вначале ставится буква Л («латунь»), а затем цифра, показывающая содержание меди в процентах. В специальных латунях после буквы Л следуют буквы русского алфавита, обозначающие легирующий элемент: А – Al, Н – Ni, К – Si, С – Pb, О – Sn, Ж – Fe, Мц – Mn, Ф – P, Б – Be. После букв ставятся цифры, показывающие среднее содержание меди и легирующих элементов в процентах (см. табл. 4.3).

Введение тех или иных легирующих элементов повышает механические и антикоррозионные свойства латуни.

Медь с цинком образует много твёрдых растворов, что очевидно из диаграммы состояния Cu–Zn (рис. 4.3).

Практически применяются сплавы с содержанием цинка не более 42 %, которые имеют хорошие механические свойства (см. рис. 4.4).

В технике применяются однофазные или двухфазные латуни. Однофазные латуни имеют структуру  $\alpha$ -твёрдого раствора, и поскольку в этой области нет фазовых превращений, то в  $\alpha$ -латуни нельзя получить неравновесное состояние, – следовательно, её нельзя закалить.

Таблица 4.3 – Химический состав и механические свойства деформируемых латуней после отжига (ГОСТ 15527-70)

| Марка латуни | Медь     | Прочие элементы                                      | $\sigma_B$ | $\sigma_{02}$ | $\delta$ | $\psi$ | $KCU$ ,<br>МДж/м <sup>2</sup> | $HV$ |
|--------------|----------|------------------------------------------------------|------------|---------------|----------|--------|-------------------------------|------|
|              | % (мас.) |                                                      | МПа        |               | %        |        |                               |      |
| Л90          | 88-91    | —                                                    | 260        | 120           | 45       | 80     | 1,76                          | 53   |
| Л68          | 67-70    | —                                                    | 320        | 90            | 55       | 70     | 1,68                          | 55   |
| Л60          | 59-62    | —                                                    | 380        | 160           | 25       | 62     | 0,78                          | 77   |
| ЛАН59-3-2    | 57-60    | 2,5–3,5 Al<br>2–3 Ni                                 | 380        | 300           | 50       | —      | 0,5                           | 75   |
| ЛЖМц59-1-1   | 57-60    | 0,1–0,4 Al<br>0,6–1,2 Fe<br>0,5–0,8 Mn<br>0,3–0,7 Sn | 450        | 170           | 50       | 58     | 1,18                          | 88   |
| ЛО70-1       | 69-71    | 1–1,5 Sn                                             | 350        | 100           | 60       | 70     | 0,6                           | 60   |
| ЛК80-3       | 79-81    | 2,5–4 Si                                             | 310        | 200           | 58       | 55     | 0,4                           | 100  |

Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

Практически применяются сплавы с содержанием цинка не более 42 %, которые имеют хорошие механические свойства (см. рис. 4.4).

В технике применяются однофазные или двухфазные латуни. Однофазные латуни имеют структуру  $\alpha$ -твёрдого раствора, и поскольку в этой области нет фазовых превращений, то в  $\alpha$ -латуни нельзя получить неравновесное состояние, – следовательно, её нельзя закалить.

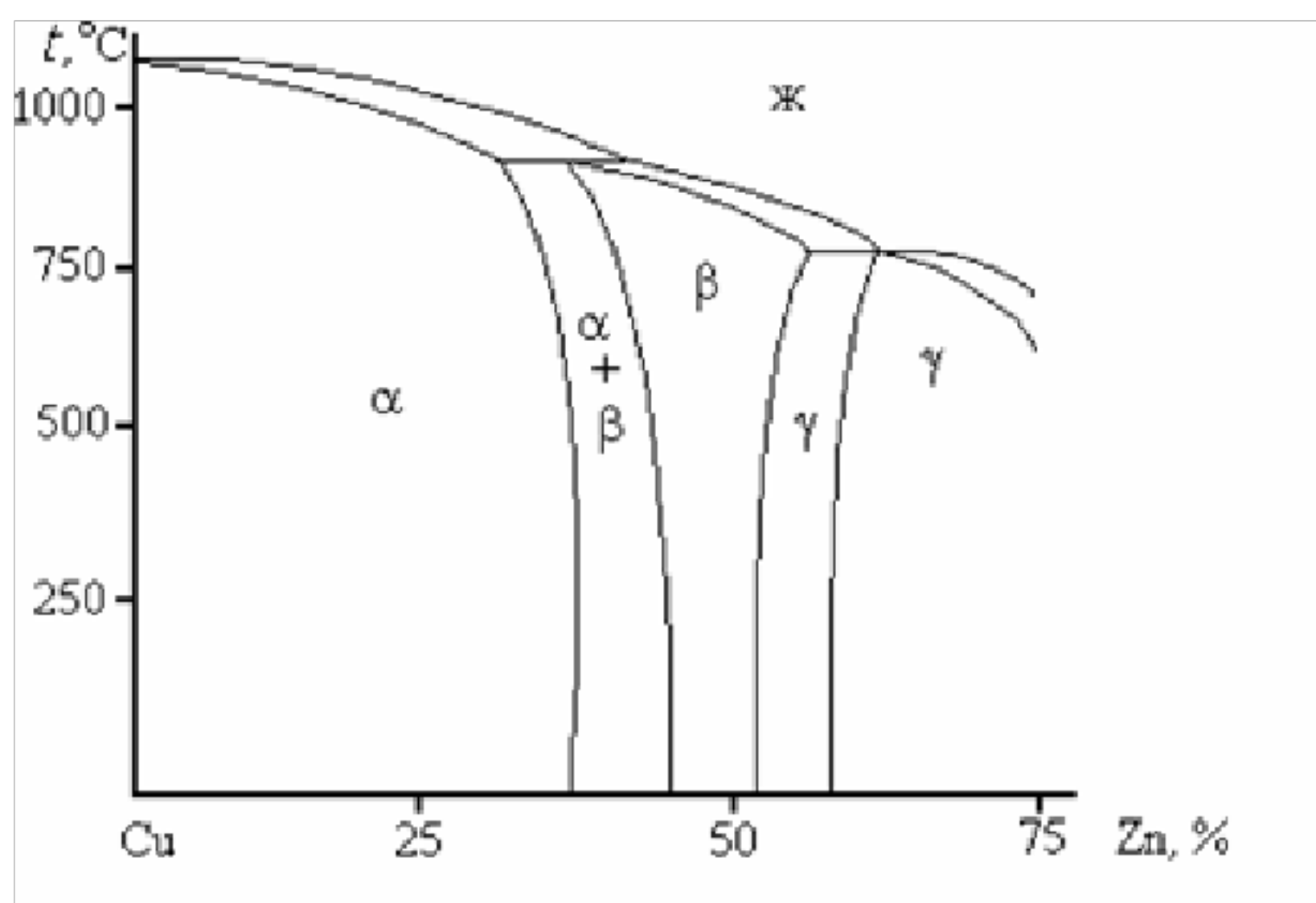


Рисунок 4.3 – Диаграмма состояния медь-цинк

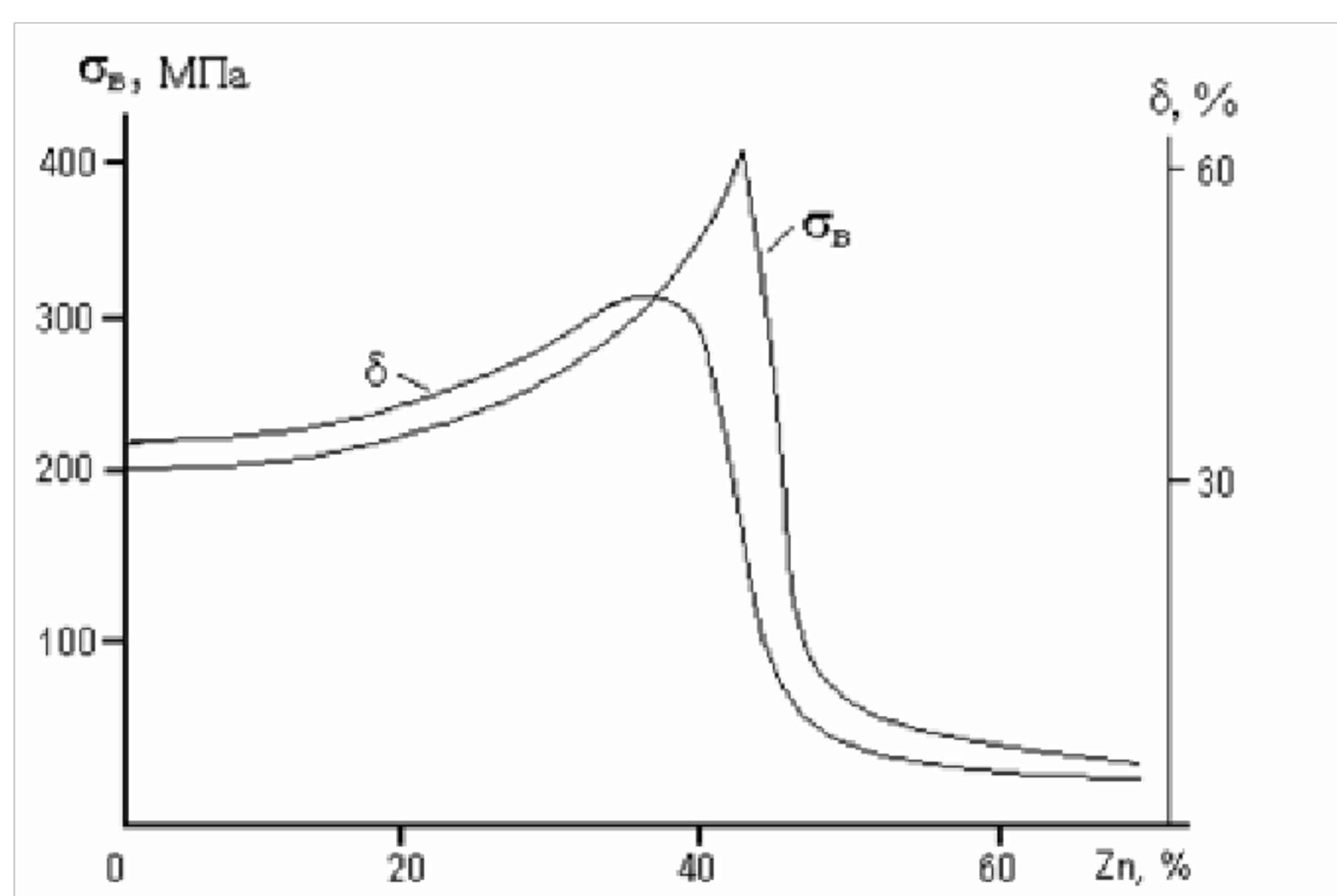


Рисунок 4.4 – Влияние цинка на механические свойства меди

Однофазная латунь представляет собой материал относительно невысокой твёрдости и прочности, обладающий значительной пластичностью. При переходе за предел насыщения (39% Zn) появляется вторая фаза  $\beta$  – электронное соединение  $CuZn$ , что сопровождается резким снижением пластичности и повышением прочности и твёрдости. Это объясняется тем, что  $\beta$ -фаза является твёрдой и хрупкой, поэтому при увеличении ее количества

Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна  
 Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

наблюдается повышение твёрдости и хрупкости сплава. Применение находят или однофазные латуни, или двухфазные, в которых нет преобладания хрупкой фазы (т. е. содержащие 41–42 % Zn).

Однофазные латуни благодаря высокой пластичности хорошо деформируются в холодном состоянии, при этом увеличивается и прочность, и твёрдость латуни. Двухфазные латуни подвергают прокатке и прессованию в горячем состоянии. Латунь очень хорошо поддается обработке резанием, особенно если она легирована свинцом. При резании свинцовистых латуней образуется короткая ломкая стружка, что облегчает обработку изделий. Для повышения прочности и твёрдости латунь легируют алюминием (4 %).

Латунь используется как конструкционный материал там, где требуются высокая прочность и коррозионная стойкость: в трубопроводной арматуре, в химическом машиностроении и особенно в судостроении. Изготавливают из латуней листы, ленты, проволоку, а затем из этого проката – радиаторные трубки, снарядные гильзы, трубопроводы, шайбы, гайки, втулки, уплотнительные кольца, токопроводящие детали электрооборудования.

Бронзы – это сплавы меди со всеми другими элементами, кроме цинка. В их названии используют прилагательные, указывающие на второй компонент. В зависимости от состава и структурного состояния после обработки прочность бронз может быть повышена с 200 до 750 МПа. Бронзы подразделяются на алюминиевые, оловянистые, кремнистые, бериллиевые и т. д. Бронзы маркируют буквами «Бр» (бронза), за которыми следуют буквы и цифры, указывающие на название и содержание в % легирующих элементов. Например, БрОФ10-1: 10 % Sn, 1 % P, остальное медь.

Оловянистые бронзы известны с глубокой древности; именно этот замечательный материал дал название бронзовому веку. Они, как и другие сплавы, делятся на деформируемые (10 % Sn) и литейные (10 % Sn). Когда-то бронзы получали название в зависимости от их назначения: монетная (4–10 % Sn), пушечная (8–18 % Sn), колокольная (20–30 % Sn), зеркальная (30–35 % Sn). Оловянистые бронзы отличаются хорошими литейными свойствами, например, малой усадкой при кристаллизации, поэтому можно отливать сложные по конфигурации изделия. С целью экономии дорогого олова в бронзы добавляют цинк в таком количестве, чтобы он полностью растворялся в меди, образуя твёрдый раствор, тем самым повышая механические свойства. Для повышения антифрикционных свойств и лучшей обрабатываемости резанием в оловянистые бронзы добавляют свинец. Литейные оловянистые бронзы применяются для пароводяной арматуры, так как обладают высокой коррозионной стойкостью в воде и на воздухе.

Деформируемые бронзы имеют однофазную структуру твёрдого раствора. После холодной обработки давлением бронзы подвергают отжигу при 600–700 °С. Они пластичнее

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН  
ЭЛЕКТРОННЫМ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 2C0000043E9AB8B952205E7BA500060000043E  
Владелец: Шебеко Александр Александрович

Действителен: с 19.08.2022 по 19.08.2023

и прочнее, чем литейные. Кроме того, деформируемые оловянистые бронзы обладают высокими упругими свойствами, поэтому их используют для получения пружин и мембран в электротехнике и других областях.

Алюминиевые бронзы обычно содержат от 5 до 10 % алюминия. Механические и коррозионные свойства этих бронз выше, чем оловянистых. По мере изменения состава, аналогично латуням и оловянистым бронзам, меняются и свойства: твёрдость НВ, прочность и пластичность быстро растут, затем пластичность и прочность понижаются из-за образования второй хрупкой фазы. Поэтому в практике применяют двухфазные бронзы, содержащие не более 11 % Al. Двухфазные бронзы, отличаются высокой прочностью – до 600 МПа и твёрдостью свыше 100 НВ. Так как алюминиевые бронзы испытывают эвтектоидное превращение, то их можно подвергать закалке и старению. Однофазные алюминиевые бронзы (БрА7) более пластичны, чем двухфазные, и относятся к деформируемым. Они обладают высокой прочностью и пластичностью ( $\sigma_B = 400\text{--}450$  МПа,  $\delta = 60\%$ ).

Легируют алюминиевые бронзы железом, никелем, марганцем для устранения литейных недостатков и увеличения механических свойств после упрочняющей термической обработки (закалки и последующего старения). Например, у бронзы БрАЖН 10-4-4 твердость увеличивается от 140–160 НВ до 400 НВ. Поэтому из алюминий-железоникелевых бронз изготавливают детали, работающие в условиях износа: седла клапанов, направляющие втулки, части насосов и турбин, шестерни и др.

Кремнистые бронзы содержат до 3 % Si и являются заменителями оловянистых бронз. Они пластичны, коррозионностойки в некоторых агрессивных средах, хорошо свариваются и паяются. Для повышения твёрдости и прочности кремнистых бронз их легируют марганцем и никелем с последующей термической обработкой. Эти бронзы используют вместо более дорогих оловянистых при изготовлении антифрикционных деталей, а также для замены бериллиевых бронз при производстве пружин.

Свинцовистые бронзы (БрС30) обладают высокими антифрикционными свойствами, высокой теплопроводностью (до 300 °С). Прочность таких бронз небольшая, но они очень пластичны, хорошо сопротивляются ударам. Поэтому из этих бронз изготавливают вкладыши подшипников, работающих при больших давлениях и скоростях.

Бериллиевые бронзы (БрБ2) содержат не более 2–2,5 % бериллия. Так как бериллий образует с медью твёрдый раствор переменной растворимости, то эту бронзу применяют только после упрочняющей термической обработки (закалки от 780 °С и старения при 320 °С). При этом повышается как прочностные, так и упругие свойства:  $\sigma_B = 1300\text{--}1500$  МПа,

$\sigma_{\text{упр}} = 600\text{--}740$  МПа. Кроме того, бериллиевые бронзы обладают высокой электропроводностью, поэтому их применяют в виде пружин в электроаппаратуре, в качестве упругих контактов

и т. д. Но высокая стоимость не позволяет широко применять эту бронзу. Заменяют её более дешёвой – титановой или титановохромистой бронзой. После термической обработки она имеет почти такие же прочностные свойства, но более пластична и имеет высокую релаксационную стойкость при температуре до 400 °С. Поэтому упругие элементы из такой бронзы могут работать при более высокой температуре, чем из бериллиевой.

Состав и механические характеристики некоторых литейных и деформируемых бронз приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4 – Химический состав и механические свойства бронз

| Бронза               | Содержание элементов, % |         |     |                          | $\sigma_B$ | $\sigma_{02}$ | $\delta$ , % |
|----------------------|-------------------------|---------|-----|--------------------------|------------|---------------|--------------|
|                      | Sn                      | Pb      | Zn  | Прочие                   | МПа        |               |              |
| Деформируемые бронзы |                         |         |     |                          |            |               |              |
| БрОЦС4-4-2,5         | 3–5                     | 1,5–3,5 | 3–5 | –                        | 350        | 130           | 40           |
| БрОФ6,5-0,4          | 6–7                     | –       | –   | 0,26–0,4 Р               | 400        | 250           | 60–70        |
| БрАЖН10-4-4          | –                       | –       | –   | 0,1–0,2 Ni;<br>9,5–11 Al | 750–       | –             | 9–15         |
| (закалка и старе-    |                         |         |     | 3,5–5,5 Fe               | 830        |               |              |
| БрБНТ1,9             | –                       | –       | –   | 1,85–2,1 Be              | 1200       | –             | 4            |
| (закалка и старе-    |                         |         |     | 0,2–0,4 Ni               |            |               |              |
| Литейные бронзы      |                         |         |     |                          |            |               |              |
| БрО5Ц5С5             | 4–6                     | 4–6     | 4–6 | –                        | 180        | 100           | 4            |
| БрС30                | –                       | 27–31   | –   | –                        | 60         | –             | 4            |

#### Антифрикционные сплавы

Антифрикционные материалы предназначены для изготовления подшипников (опор) скольжения, которые широко применяют в современных машинах и приборах из-за их устойчивости к вибрациям, бесшумности работы, небольших габаритов. Антифрикционность – это способность материала обеспечивать низкий коэффициент трения скольжения и тем самым низкие потери на трение и малую скорость изнашивания сопряжённой детали – стального или чугунного вала.

Хороший антифрикционный материал должен иметь высокую теплопроводность, хорошо смачиваться смазкой, образовывать на поверхности защитные плёнки мягкого металла, хорошо прирабатываться, иметь высокое сопротивление усталости.

Подшипниковый материал оценивают по коэффициенту трения и по допустимым значениям давления на опору  $p$  и скорости скольжения  $v$ . Параметр  $pv$  определяет удельную

мощность трения.

Металлические подшипниковые материалы предназначены для работы в режиме

