

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Институт естественных и точных наук
Кафедра оптоинформатики

537(07)
Ш957

А.А. Шульгинов

**ОБЩАЯ ФИЗИКА.
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

Учебное пособие
по выполнению лабораторных работ
для студентов физических направлений

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2025

УДК 537(076.5) + 537.6(076.5)
Ш957

*Одобрено
учебно-методической комиссией
Института естественных и точных наук*

Рецензенты: к.ф.-м.н. Свирская Л.М., к.т.н. Маркина Н.В.

Шульгинов, А.А.
Ш957 Общая физика. Электричество и магнетизм: учебное пособие по выполнению лабораторных работ для студентов физических направлений / А.А. Шульгинов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2025. – 101 с.

Учебное пособие написано в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Общая физика. Электричество и магнетизм» для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению 03.03.01 «Прикладные математика и физика». Оно предназначено для подготовки к выполнению, проведения лабораторных работ и обработке результатов физических экспериментов. Пособие содержит описание тринадцати лабораторных работ. В каждой работе приводятся сведения по теории, необходимые для экспериментальных исследований. Особое внимание уделяется обработке и оформлению полученных результатов.

УДК 537(076.5) + 537.6(076.5)

ISBN

© Издательский центр ЮУрГУ, 2025

ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ»

Комплекс представляет собой закрепленную на стойках вертикальную панель, на которой размещаются: блок генераторов напряжений, наборное поле, два мультиметра, блок моделирования электростатических полей с набором слабопроводящих пластин с электродами.

Основные правила работы с лабораторным комплексом

1. Перед началом работы ознакомьтесь с описанием лабораторного комплекса.
2. Перед сборкой цепи проверьте, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены.
3. При сборке цепи используйте только провода с исправной изоляцией. Подключая приборы, проверяйте соблюдение норм нагрузки (рабочее напряжение конденсатора, максимальный ток для катушек индуктивности и т.п.).
4. Сборку электрической цепи ведите *по контурам*, начиная с основного (содержащего источник питания).
5. Перед подключением приборов чётко уясните, какую электрическую величину и в каком диапазоне значений необходимо измерить.
6. ***Обязательно проверяйте собранную схему вместе с преподавателем.***
7. Для проведения любых переключений в цепи необходимо отключить источник питания, чтобы избежать короткого замыкания участка цепи. Если в процессе работы на каком-либо миниблоке включится красный светодиод, иногда сопровождаемый звуковым сигналом перегрузки, немедленно отключите электропитание цепи и выясните причину с преподавателем.
8. В подключенной к источнику напряжения цепи не касайтесь незаизолированных металлических контактов.
9. Перед разборкой цепи проверьте, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены.
10. При разборке цепи, а также при любых её изменениях вынимайте соединительные провода из гнезд, держась только за штекеры на их концах.

Блок генераторов

Общий вид блока генераторов напряжений показан на рис. В.1. Блок состоит из генератора сигналов специальной формы (ГССФ) и трех источников постоянного напряжения.

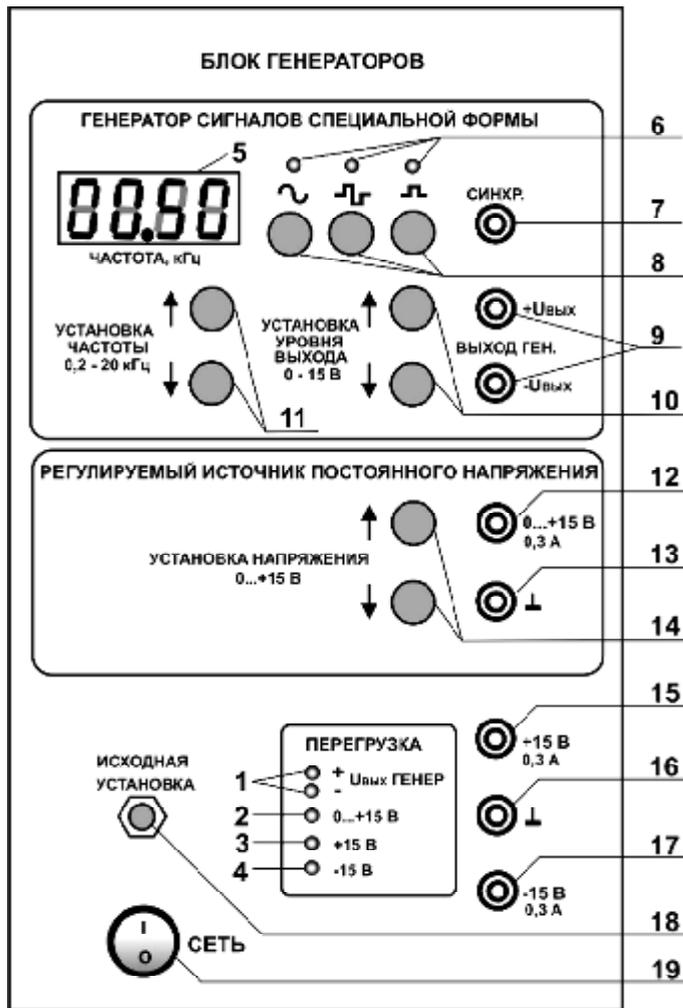


Рис. В.1. Блок генераторов

- 1 – индикатор перегрузки ГССФ;
- 2, 3, 4 – индикаторы перегрузки источников напряжения;
- 5 – индикатор частоты ГССФ;
- 6 – индикаторы формы импульсов генератора ГССФ (синусоидальная, биполярная, униполярная);
- 7 – выход импульса синхронизации для осциллографа;
- 8 – кнопки для выбора формы импульса генератора;
- 9 – выходное напряжение ГССФ;
- 10 – кнопки регулировки выходного напряжения ГССФ;
- 11 – кнопки регулировки частоты импульсов ГССФ;
- 12, 13 – выходы источника постоянного регулируемого напряжения от 0 до 15 В;
- 14 – кнопки установки величины постоянного напряжения;
- 15, 16 – выходы стабилизированного постоянного напряжения +15 В;
- 16, 17 – выходы стабилизированного постоянного напряжение –15 В;
- 18 – кнопка установки блока в исходное положение: амплитуда напряжения – 0 В, форма сигнала ГССФ – синусоидальная, частота – 0,5 кГц;
- 19 – выключатель питания («сети»)

Генератор сигналов специальной формы (ГССФ)

Генератор (рис. В.1) предназначен для получения импульсов напряжений различной формы и амплитуды частотой от 0,05 до 20 кГц. Генератор может выдавать три вида напряжений: синусоидальное (амплитуда –15...+15 В), биполярные импульсы (амплитуда –15...+15 В, длительность импульса равна половине периода), униполярные импульсы (амплитуда 0...+15 В, длительность импульса равна половине периода). Установку формы сигнала осуществляют кнопками 8. Амплитуду выходного напряжения (выход 9) регулируют кнопками 10, а частоту – кнопками 11. Значение частоты отображается на индикаторе 5. Для получения изображения формы выходного напряжения на осциллографе в генераторе предусмотрены импульсы синхронизации (прямоугольные, заданной частоты, амплитудой +5 В, длительность равна половине периода), которые можно снимать с выхода 7. Генератор

При использовании мультиметра необходимо соблюдать следующие правила:

1. Перед вращением переключателя режимов для выбора измеряемой величины отсоедините провода от схемы.

2. Если значение измеряемой величины не известно заранее, установите переключатель режимов в положение, соответствующее наибольшему значению.

3. Появление на дисплее цифры «1» является индикатором перегрузки прибора и указывает на то, что следует увеличить диапазон измерений.

Внимание! Если положение переключателя режимов не изменяют в течение 40 минут, мультиметр автоматически выключается. Для продолжения работы необходимо дважды нажать кнопку 2 (рис. В.2).

Измерение напряжения

Подсоедините один провод к входу **СОМ** (рис. В.3), второй к входу **VΩ**. Установите переключатель режимов (рис. В.4) в положение **V_—** (область I) для измерения постоянного напряжения или в положение **V_~** (область II) для измерения переменного напряжения с учётом требуемого диапазона измерений. Подсоедините провода к точкам электрической цепи, между которыми измеряется напряжение. Диапазоны измерения переменного и постоянного напряжения 200 мВ; 2; 20; 200; 600 В.

Измерение тока

Подсоедините один провод к входу **СОМ**, второй к входу **mA** или **10 A** (для измерения больших токов). Установите переключатель режимов в положение **A_—** (область V) для измерения постоянного тока или в положение **A_~** (область IV) для измерения переменного тока с учётом требуемого диапазона измерений. Подсоедините провода к точкам электрической цепи, между которыми измеряется ток. Диапазоны измерения переменного тока 2; 20; 200 мА; 10 А, постоянного тока 2; 20; 200 мА; 10 А.

Измерение сопротивления

Подсоедините один провод к входу **СОМ** второй к входу **VΩ**. Установите переключатель режимов в положение **Ω** (область VI) с учётом требуемого диапазона измерений. Подсоедините провода к измеряемому сопротивлению. Диапазоны измерения сопротивлений 200 Ом; 2 кОм; 20 кОм; 200 кОм; 2 Мом; 20 Мом; 200 МОм.

Измерение ёмкости

Подсоедините провода к разъёму 6 (рис. В.2). Установите переключатель режимов в положение **C_x** (область III) с учётом требуемого диапазона измерений. Диапазон измерения ёмкости 2; 20; 200 нФ; 2; 20 мкФ.

Измерение температуры

Установите переключатель режимов в положение °С, при этом на дисплее будет показана температура окружающей среды. Вставьте провода от термопары в разъём 5 (рис. В.2), при этом следует соблюдать полярность подсоединения.

Наборное поле

Предназначено для сборки электрических схем (рис. В.5). Линии на поле показывают электрически соединенные гнезда, в которые помещаются миниблоки.

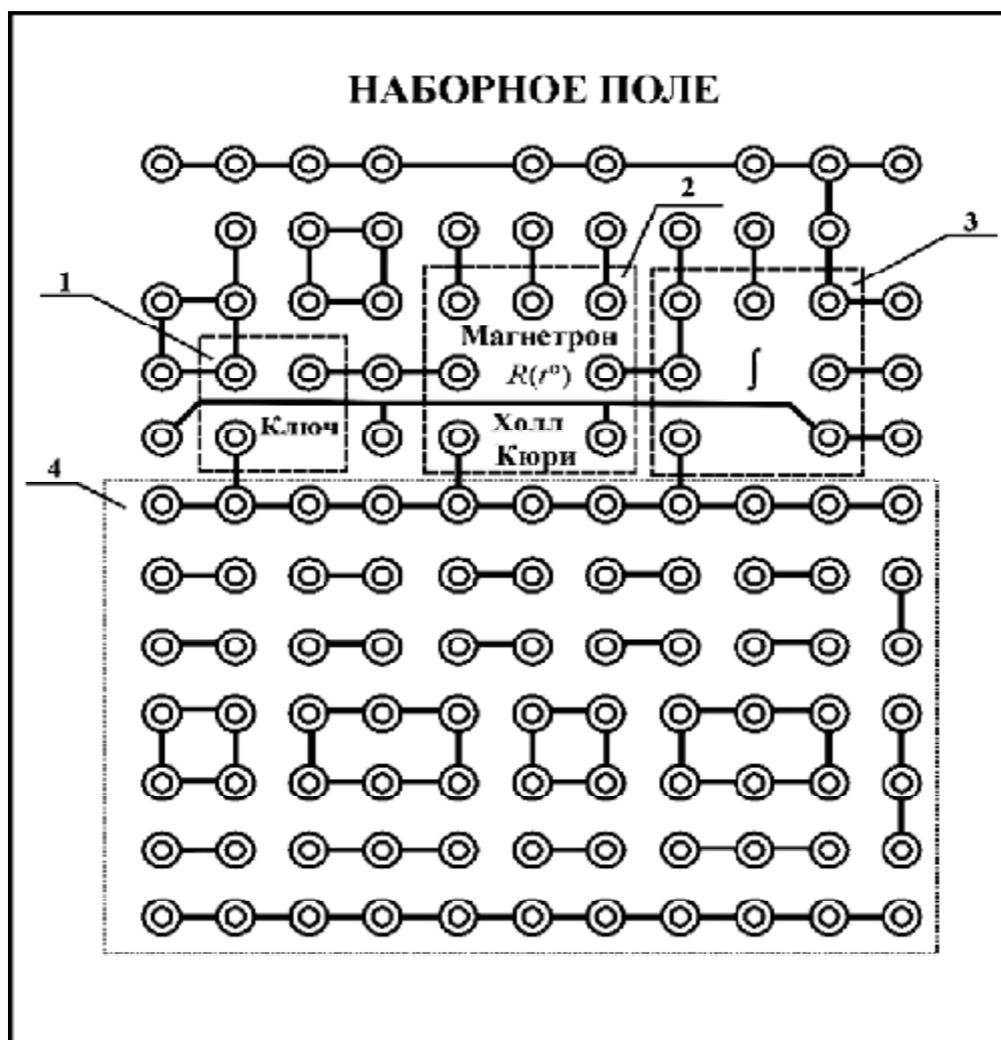


Рис. В.5. Наборное поле: 1, 2, 3, 4 – места для подключения миниблоков

Лабораторная работа Э-1

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ МЕТОДОМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цель работы: ознакомление с одним из методов моделирования электростатических полей, построение эквипотенциальных и силовых линий поля, расчёт его напряжённости и оценка погрешности расчёта.

Электростатическое поле представляет собой особый вид материи: оно возникает в пространстве, окружающем неподвижные электрические заряды и осуществляет взаимодействие между заряженными телами и частицами. Электростатическое поле в каждой своей точке характеризуется силовой (**напряжённость**) и энергетической (**потенциал**) величинами. Напряжённость электростатического поля – векторная величина, равная силе, с которой поле действует на положительный единичный точечный неподвижный заряд, помещённый в данную точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_{\text{проб}}} . \quad (1.1)$$

Направление вектора напряжённости совпадает с вектором силы, действующей на положительный заряд. Потенциал электростатического поля – скалярная величина, численно равная потенциальной энергии единичного положительного точечного неподвижного заряда, помещённого в данную точку поля

$$\varphi = \frac{W_p}{Q_{\text{проб}}} . \quad (1.2)$$

Физический смысл имеет не сам потенциал, а разность потенциалов $\Delta\varphi$ между различными точками поля. Поэтому, когда говорят о потенциале в данной точке поля, то имеют в виду разность потенциалов между этой точкой и точкой, потенциал которой условились считать нулевым.

Для наглядного представления электростатических полей их принято изображать графически с помощью *линий вектора напряжённости (силовых линий)* и *эквипотенциальных линий или поверхностей*. Каждая линия вектора напряжённости проводится так, чтобы касательная к ней в каждой точке совпадала с направлением вектора напряжённости в этой точке. Тот факт, что касательная, как и любая прямая, имеет два взаимно противоположных направления, не вносит двусмысленности, поскольку силовой линии назначается вполне определённое направление (от положительного заряда к отрицательному), отмечаемое на чертеже стрелкой. Таким образом, каждой точке электрического поля соответствует свой вектор напряжённости. Поэтому силовые линии нигде не пересекаются между собой. (Если бы они

пересеклись, то в точке пересечения имелось бы два разнонаправленных вектора \vec{E} !). Объединяя в электростатическом поле точки с одинаковым потенциалом, получают поверхности равного потенциала, или *эквипотенциальные поверхности*. Пересекаясь с плоскостью чертежа, эквипотенциальные поверхности образуют *эквипотенциальные линии*. Прочерчивая такие линии для разных значений потенциала, получают наглядное представление о том, как изменяется потенциал в данном поле. *Силовые линии всегда перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям в точках их пересечения* (рис. 1.1). На рис. 1.2 изображено электростатическое поле двух разноимённо заряженных шаров. Силовые линии проведены здесь сплошными линиями, а эквипотенциальные линии – пунктирными.

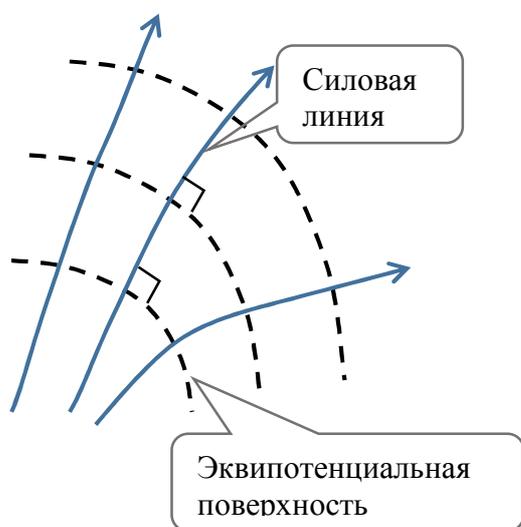


Рис. 1.1. Эквипотенциальные и силовые линии электрического поля

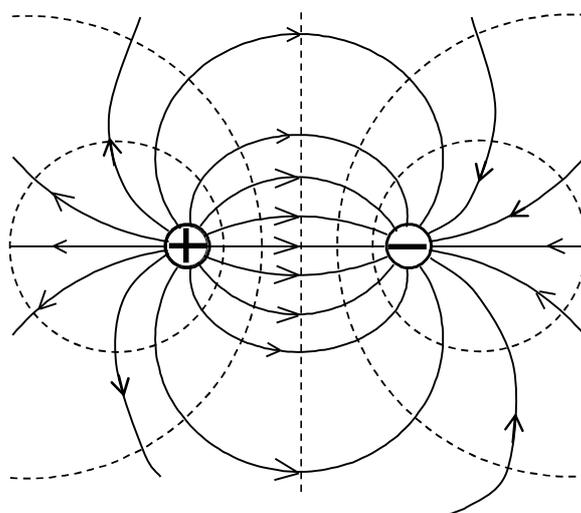


Рис. 1.2. Пример построения силовых линий

Однородным называется поле, если вектор \vec{E} всюду одинаков по модулю и направлению. Силовые линии однородного поля представляют собой ряд параллельных прямых, а эквипотенциальные поверхности – перпендикулярные к ним плоскости. Примером устройства для получения однородного электростатического поля служит плоский конденсатор. На рис. 1.2 поле, в общем, неоднородно, однако можно выделить такой участок, на котором его можно приближенно считать однородным. Между напряжённостью и потенциалом в каждой точке поля существует связь:

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi, \quad (1.3)$$

Если $\Delta\varphi$ – разность потенциалов двух соседних эквипотенциальных линий, Δl – расстояние между ними, измеренное по силовой линии, то, пользуясь приближённым соотношением

$$|\text{grad } \varphi| \approx \frac{\Delta \varphi}{\Delta n}, \quad (1.4)$$

можно найти модуль вектора напряжённости на участке поля Δn по формуле

$$E \approx \frac{\Delta \varphi}{\Delta n}. \quad (1.5)$$

Описание метода исследования

При исследовании сложных физических процессов широкое применение нашли модельные эксперименты. Различают *физическое* и *математическое моделирование*. В первом случае модель и натура имеют одинаковую физическую природу, характер самого явления сохраняется, но геометрические размеры модели отличаются от натуры. Во втором случае физические явления разные, но их закономерности описываются одинаковыми дифференциальными уравнениями и граничными условиями. Такая тождественность математического описания позволяет заменить сложное исследование одного явления более простым исследованием другого. Известно, что электрическое поле стационарного тока в слабопроводящей однородной среде является потенциальным. Поэтому его можно использовать для моделирования электростатического поля заряженных тел в вакууме [1]. При таком моделировании силовым линиям электростатического поля будут соответствовать линии тока, а поверхностям равного потенциала – поверхности равных напряжений. Потенциалы различных точек модели могут быть измерены непосредственно вольтметром. Для исследования потенциала в электрических полях стационарного тока используются зонды, вводимые внутрь поля. Зондом является тонкий металлический стержень, хорошо изолированный по всей длине, кроме конца. Эксперимент значительно упрощается, если проводить исследование плоского стационарного поля тока. В этом случае потенциалы измеряются при помощи зонда на поверхности слабопроводящей однородной среды. Стационарное электрическое поле связано с наличием электрического тока, а это упрощает измерение разности потенциалов между любыми двумя точками поля. Для этого достаточно прикоснуться к этим точкам зондом, который подключен к вольтметру. Таким образом, на поверхности слабопроводящей среды могут быть получены линии равного потенциала. Силовые линии моделируемого поля строят так, чтобы касательные к ним были ортогональны к экспериментально полученным линиям равного потенциала (рис. 1.2).

Описание установки

Оборудование: регулируемый источник постоянного напряжения, блок моделирования поля, зонд (щуп), мультиметр.

В настоящей работе в качестве слабопроводящей среды используется тонкий графитовый слой, нанесённый на стеклотекстолитовую пластину (рис. 1.3). Металлические электроды, между которыми протекают стационарные электрические токи, имитируют заряженные тела различной формы. Для исследования электростатического поля собирают электрическую цепь по схеме, представленной на рис. 1.4. Если зонд 3 поместить в произвольную точку пластины 5, то вольтметр 1 покажет значение потенциала поля в этой точке, измеренное относительно электрода 2, потенциал которого принимается равным нулю. Совокупность точек исследуемого поля с таким же значением потенциала образует эквипотенциальную поверхность.

Выполнение работы

1. На лист миллиметровой бумаги или тетрадный лист формата А5 перенести с пластины в масштабе 1:1 координатные оси и контуры электродов.
2. Выбрать в качестве вольтметра для измерения постоянного напряжения мультиметр. Рекомендуемый диапазон «**20 В**», постоянное напряжение.

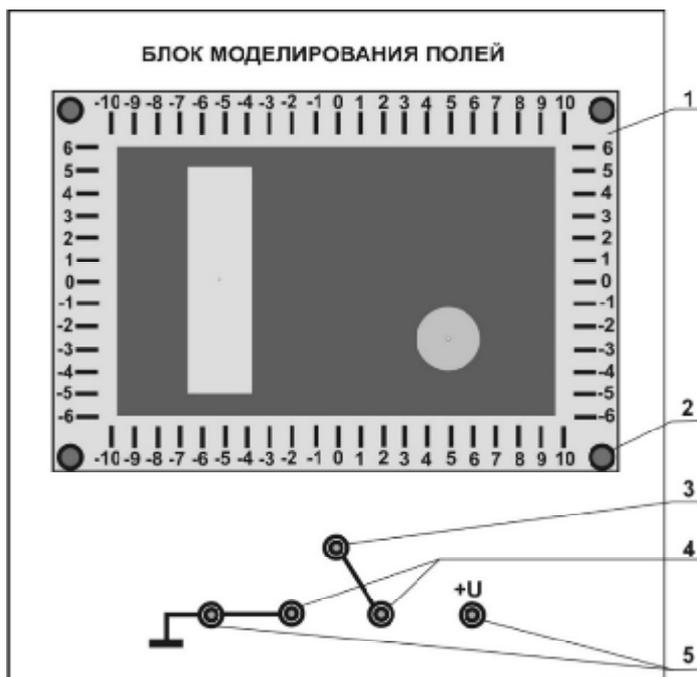


Рис. 1.3. Блок моделирования полей:
 1 – пластина с графитовым покрытием, координатной сеткой и электродами;
 2 – крепление пластины;
 3 – вход для подключения зонда (щупа);
 4 – входы для подключения вольтметра;
 5 – входы для подключения регулируемого источника постоянного напряжения

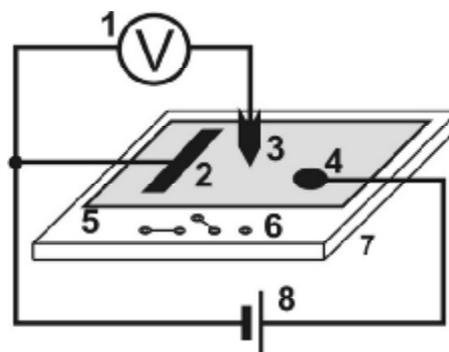


Рис. 1.4. Электрическая схема:
 1 – вольтметр;
 2, 4 – электроды;
 3 – зонд;
 5 – слабопроводящая пластина;
 6 – входы для подключения блока (рис. 1.3);
 7 – блок моделирования поля;

3. Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 1.4 (см. также рис. 1.5). Для этого выбрать два длинных провода и соединить ими выходы регулируемого источника постоянного напряжения « \perp » и « $0 \dots +15 \text{ В}$ » с соответствующими контактами 5 (рис. 1.3). Затем проводами соединить мультиметр с соответствующими контактами 4 (рис. 1.3). Один провод соединить с контактом 3. Это будет зонд (щуп) для исследования поля.

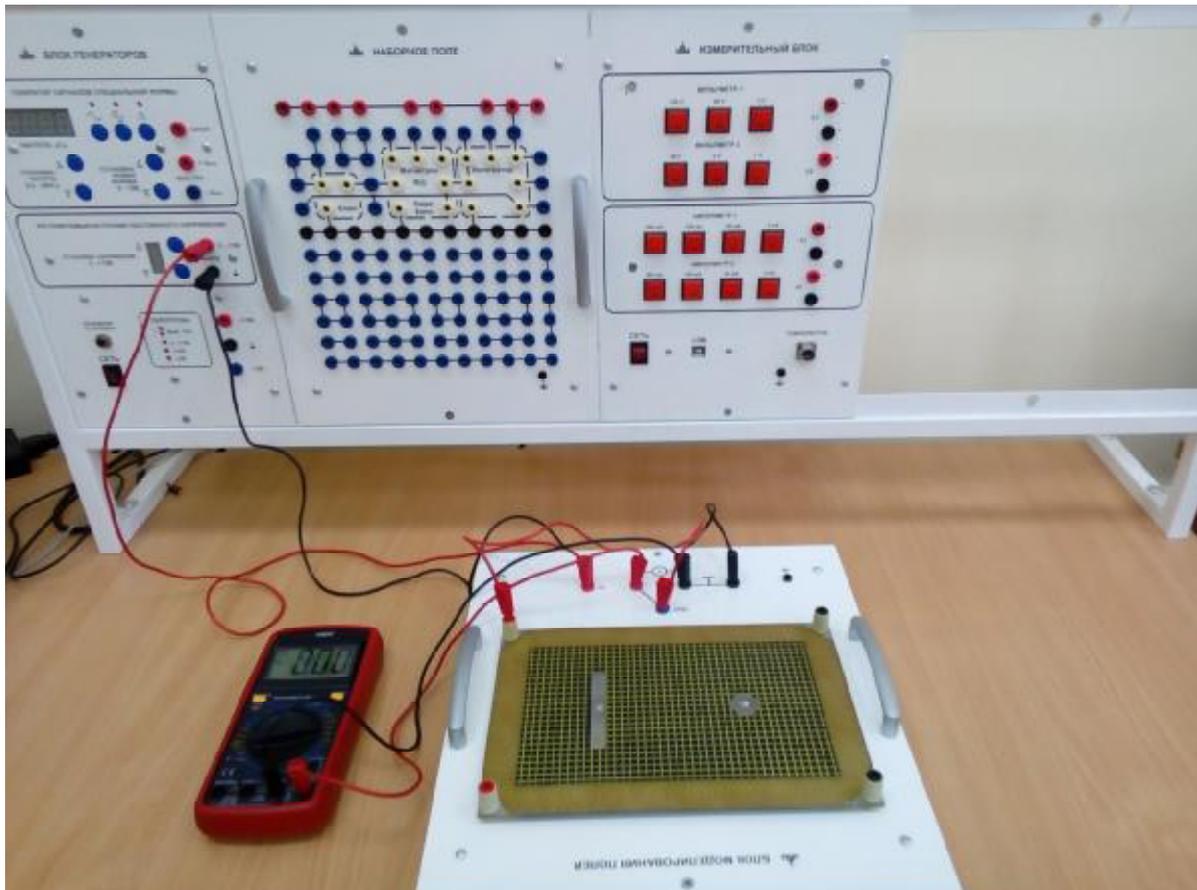


Рис. 1.5. Сборка схемы для измерения

4. Кнопками «СЕТЬ» включить блок генераторов напряжения и измерительный блок. Нажать кнопку «Исходная установка». Включить мультиметр

5. Кнопкой Δ «Установка напряжения $0 \dots +15 \text{ В}$ » увеличить напряжение на одно деление светового индикатора. Касаясь электродов зондом, по вольтметру определить какой из них имеет нулевой потенциал. Обозначить на чертеже этот электрод \mathcal{E}_1 « $-$ », а второй электрод – \mathcal{E}_2 « $+$ ».

6. Касаясь зондом электрода \mathcal{E}_2 , кнопками «Установка напряжения $0 \dots +15 \text{ В}$ » установить по вольтметру *заданную* преподавателем разность потенциалов U между электродами. Написать потенциалы электродов на листе.

7. Выбрать шаг изменения потенциала зонда $\Delta\varphi$, чтобы можно было построить на картине поля $N = 5-8$ (по заданию преподавателя) эквипотенциальных линий: например, если выбрано $U = 5$ В и $\Delta\varphi = 0,8$ В, то необходимо будет построить эквипотенциальные линии с потенциалами: $\varphi_1 = 0,8$ В, $\varphi_2 = 1,6$ В, $\varphi_3 = 2,4$ В, $\varphi_4 = 3,2$ В, $\varphi_5 = 4,0$ В, $\varphi_6 = 4,8$ В, т.е. $N = 6$ линий.

8. Около электрода с нулевым потенциалом найти точку поля с потенциалом $\varphi_1 = \Delta\varphi$. Отметить эту точку на листе. Перемещая зонд по всему полю, определить координаты и отметить на листе не менее девяти точек, имеющих то же значение потенциала. Расстояние между точками выбирается таким образом, чтобы они располагались по картине моделируемого поля *равномерно*. Соединить отмеченные точки плавной кривой. На полученной таким образом эквипотенциальной линии указать значение её потенциала.

9. Повторить п. 8 для других потенциалов: $\varphi_i = i \cdot \Delta\varphi$ где $i = 2, 3, 4, \dots, N$.

10. Выключить блок питания генераторов и мультиметр.

Обработка результатов измерений

1. Выбрать точку на листе для оценки напряжённости поля в этой области. Отметить её на листе и провести через неё силовую линию, используя свойство ортогональности эквипотенциальных поверхностей и силовых линий электростатического поля. Её нужно проводить плавной кривой без резких перегибов и обязательно указать направление. В поверхность электродов силовые линии также должны входить и выходить под прямым углом. Внутри электродов силовых линий нет.

2. Провести ещё не менее пяти силовых линий, чтобы равномерно покрыть ими всё поле.

3. Измерить расстояние Δl между соседними эквипотенциальными линиями по силовой линии, на которой находится точка, и записать в отчёт.

4. Определить разность потенциалов $\Delta\varphi$ между соседними эквипотенциальными линиями и записать в отчёт.

5. Рассчитать по формуле (1.8) модуль вектора напряжённости и указать его направление на листе.

6. Оценить относительную погрешность γ напряжённости поля E . Систематическая относительная погрешность косвенного однократного измерения физической величины, описываемой формулой (1.8), рассчитывается так (см. Приложение):

$$\gamma = \frac{\theta E}{E} = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\theta(\Delta\varphi)}{\Delta\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\theta(\Delta n)}{\Delta n}\right)^2}, \% \quad (1.9)$$

где $\frac{\theta(\Delta\varphi)}{\Delta\varphi}$, $\frac{\theta(\Delta n)}{\Delta n}$ – систематические относительные погрешности прямого однократного измерения разности потенциалов $\Delta\varphi$ и расстояния Δn .

7. Определить систематическую абсолютную погрешность по формуле:

$$\theta E = \frac{\gamma}{100\%} \cdot E. \quad (1.10)$$

Контрольные вопросы

1. Какими величинами характеризуется электростатическое поле?
2. Что такое силовая линия? Каковы её свойства?
3. Как графически можно представить электростатическое поле?
4. Дайте определение эквипотенциальной линии?
5. Почему силовые линии всегда перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям в точках их пересечения?
6. Какое электростатическое поле будет являться однородным?
7. Какая связь существует между напряжённостью и разностью потенциалов в каждой точке электростатического поля?
8. В чём смысл физического моделирования электростатического поля?

Лабораторная работа Э-2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЁМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА

Цель работы: ознакомление с одним из методов измерения электрической ёмкости, определение электроёмкости отдельного конденсатора, соединений конденсаторов, оценка погрешности измерений.

Система проводников (обкладок), разделенных диэлектриком, обладающая большой электроёмкостью при относительно небольших размерах, называется *конденсатором*. Электроёмкость конденсатора определяется по формуле:

$$C = \frac{Q}{(\varphi_2 - \varphi_1)} = \frac{Q}{U}, \quad (2.1)$$

где Q – заряд одной из его обкладок, $\varphi_2 - \varphi_1 = U$ – разность потенциалов, которая в данном случае совпадает с напряжением между обкладками. Электроёмкость конденсатора не зависит напряжения на нём и заряда обкладок. Это характеристика системы зависит от геометрии обкладок и окружающих веществ. Заряд конденсатора зависит от электроёмкости конденсатора и напряжения на нём:

$$Q = C \cdot U. \quad (2.2)$$

Конденсаторы широко применяются в электро- и радиотехнических цепях. Для расширения диапазона электроёмкости и рабочего напряжения применяют соединения конденсаторов в батареи. Электроёмкость (ёмкость) параллельного соединения находят как сумму электроёмкостей всех конденсаторов:

$$C^{\text{парал}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (2.3)$$

Ёмкость последовательного соединения конденсаторов находится по формуле:

$$\frac{1}{C^{\text{посл}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (2.4)$$

Описание метода измерения

Из формулы (2.1) видно, что для определения ёмкости конденсатора необходимо знать его заряд и напряжение, которое можно измерить вольтметром. Заряд же измеряют косвенным методом. Для этого предварительно заряженный конденсатор разряжают через особое устройство – интегратор тока, который преобразует общий заряд, протекший во входной цепи,

в напряжение на его выходе. Функция, выполняемая данным устройством, состоит в интегрировании тока $I(t) = \frac{dQ}{dt}$ по времени: $Q = \int_0^t I(t)dt$. Значение заряда, прошедшего через интегратор, пропорционально его выходному напряжению $U^{\text{инт}}$:

$$Q = b \cdot U^{\text{инт}}, \quad (2.5)$$

где b – градуировочная постоянная. Из равенств (2.1) и (2.5) следует расчётная формула для измеряемой ёмкости:

$$C = b \frac{U^{\text{инт}}}{U}. \quad (2.6)$$

Значение градуировочной постоянной установки b можно определить на основе формулы (2.6), разряжая через интегратор конденсатор с известной ёмкостью C_0 (образцовый конденсатор):

$$b = C_0 \frac{U_0}{U_0^{\text{инт}}}. \quad (2.7)$$

Для проверки правильности градуировки интегратора тока можно с его помощью провести измерение какой-либо другой известной ёмкости. Для этого используют ёмкость батареи из двух конденсаторов: образцового C_0 и неизвестного C_x .

Описание установки

Оборудование: регулируемый источник постоянного напряжения, мультиметр для измерения электроёмкости (фарадометр), миниблоки «Интегратор тока», «Ключ», «Конденсатор известной ёмкости» (образцовый конденсатор), «Конденсатор неизвестной ёмкости», мультиметры.

Схема электрической цепи представлена на рис. 2.1. Миниблок «Интегратор тока» (рис. 2.2) предназначен для измерения заряда, протекающего в цепи (входы А, В – интегрирование по току), и преобразования его в напряжение $U^{\text{инт}}$, измеряемое

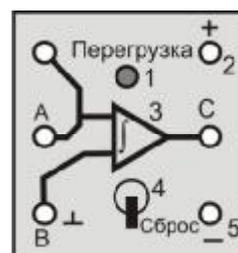


Рис. 2.2. Миниблок «Интегратор тока»: А, В – вход; С – выход на измерительный прибор; 1 – индикатор перегрузки; 2 – питание интегратора «+15 В»; 3 – интегратор; 4 – демпферный ключ; 5 – питание интегратора «-15 В»

вольтметром 8. В случае, если накопленный заряд превышает допустимый уровень, загорается индикатор 1 «Перегрузка». Для сброса заряда, накопленного интегратором, тумблер 4 надо перевести в положение «Сброс». Питание интегратора осуществляется от источника стабилизированных постоянных напряжений «+15 В» и «-15 В».

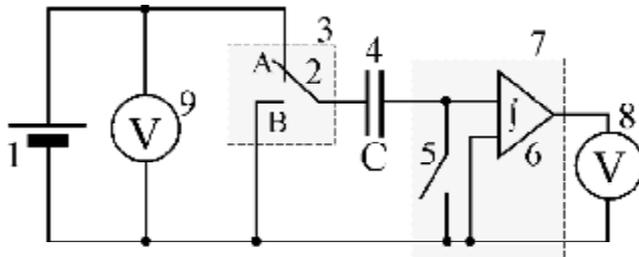


Рис. 2.1. Электрическая схема:

- 1 – регулируемый источник постоянного напряжения «0 ... +15 В»;
- 2 – переключатель;
- 3 – миниблок «Ключ»;
- 4 – исследуемый конденсатор;
- 5 – демпфирующий ключ;
- 6 – интегратор тока;
- 7 – миниблок «Интегратор тока»;
- 8, 9 – вольтметры

Для зарядки конденсатора переключатель 2 на рис. 2.1 устанавливаются в положение А (вверх), а демпфирующий ключ 5 замыкают (положение «Сброс»). Заряжают конденсатор до напряжения U , контролируемого вольтметром 9. Перед измерением ключ 5 размыкают (положение вверх), а переключатель 2 переводят в положение В (вниз). При этом заряд, имеющийся на обкладках конденсатора, пройдет через интегратор тока и пропорциональное ему напряжение будет показано вольтметром 8.

Выполнение работы

1. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 2.3.

2. Кнопками «СЕТЬ» включить блок питания генераторов напряжения и измерительный блок. Рекомендуемые пределы измерения мультиметров – 20 В.

ЭТАП 1. Определение градуировочной постоянной b

1. Зарядить конденсатор C_0 , для этого:

1.1. тумблер миниблока «Интегратор» установить в положение «Сброс»;

1.2. тумблер миниблока «Ключ» установить вверх;

1.3. кнопкой Δ «Установка напряжения 0 ... +15 В», установить по вольтметру 9 напряжение зарядки конденсатора U_0 .

Рекомендация: если $C_0 = 1$ мкФ, то рекомендуется установить напряжение $U_0 = 1-2$ В. Если $C_0 = 0,22$ мкФ, то $U_0 = 2-6$ В. Если $C_0 = 0,1$ мкФ, то $U_0 = 5-10$ В. Записать U_0 .

2. *Разрядить* заряженный конденсатор через интегратор тока, для этого:

2.1. Тумблер миниблока «Интегратор» перевести в верхнее положение;

2.2. Тумблер миниблока «Ключ» перевести вниз. Выждав не *более одной секунды*, по вольтметру 8 записать напряжение $U_0^{\text{инт}}$.

Внимание! Если при работе загорается индикатор перегрузки у интегратора тока, необходимо немедленно перевести тумблер на «Сброс». Напряжение зарядки U_0 уменьшить и повторить п. 1.

2.3. Тумблер миниблока «Интегратор» перевести в положение «Сброс»;

2.4. Тумблер миниблока «Ключ» перевести верхнее.

3. Провести измерения напряжения $U_0^{\text{инт}}$ не менее 5 раз при одном и том же напряжении конденсатора U_0 и записать значения.

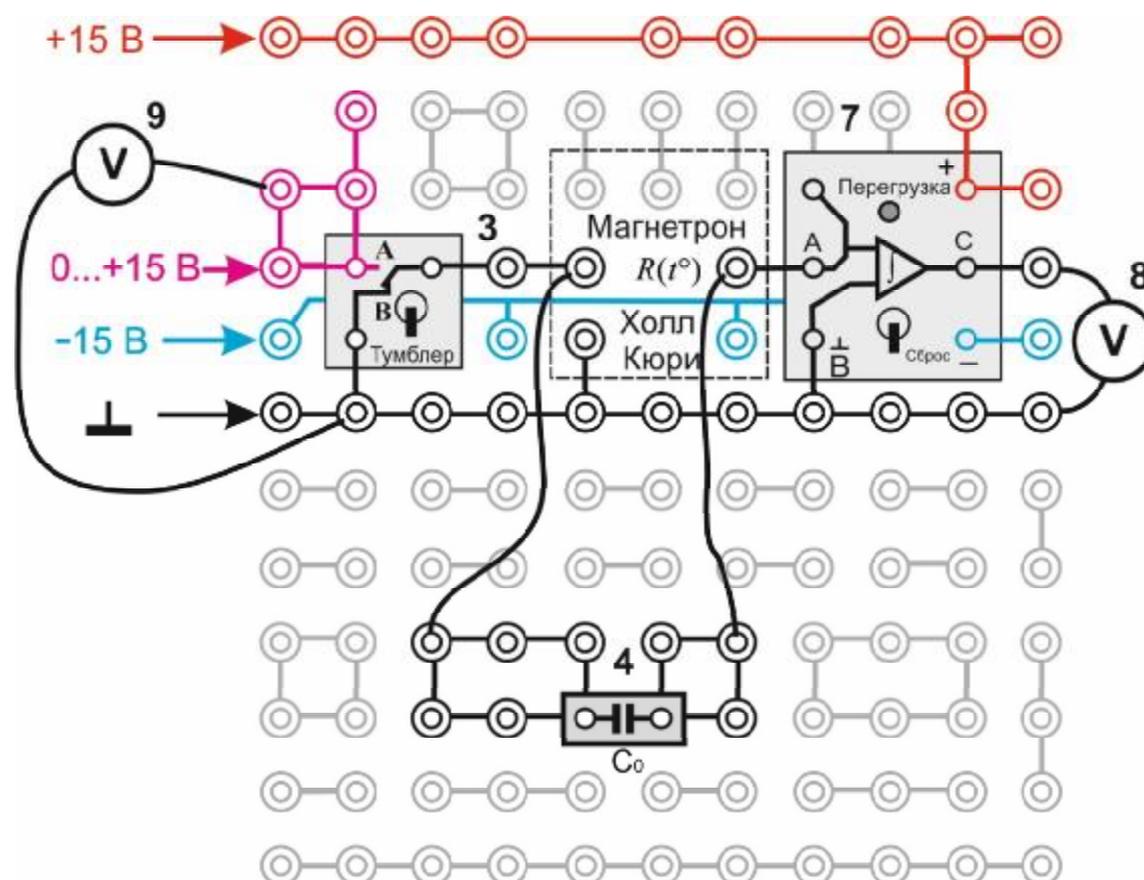


Рис. 2.3. Монтажная схема

ЭТАП 2. Определение неизвестной электроёмкости конденсатора C_x

1. Заменить конденсатор C_0 конденсатором с неизвестной ёмкостью C_x . Выбрать напряжение для его зарядки $U_x = 1$ В.

2. Провести измерения и записать напряжения $U_x^{\text{инт}}$ не менее 10 раз, постепенно увеличивая напряжение конденсатора U_x . Важно, чтобы напряжение $U_x^{\text{инт}}$ не превысило 14 В. В противном случае, на микроблоке «Интегратор» загорится красная лампочка, сигнализирующая о том, что произошла его перегрузка. Чтобы не вывести из строя микроблок, необходимо сразу переключить тумблер на нём в состояние «Сброс».

ЭТАП 3. Определение электроёмкости батареи параллельно соединённых конденсаторов C_x и C_0

1. Соединить конденсаторы C_0 и C_x параллельно (рис. 2.4). Выбрать такое напряжение заряда конденсатора $U_{\text{парал}}$, при котором напряжение разряда $U_{\text{парал}}^{\text{инт}}$ не превышало 8 – 10 В. Рекомендуется установить напряжение $U_{\text{парал}}$ меньше чем максимальное значение U_x .

2. Провести измерения и записать напряжения $U_{\text{парал}}^{\text{инт}}$ не менее 5 раз при одном и том же $U_{\text{парал}}$.

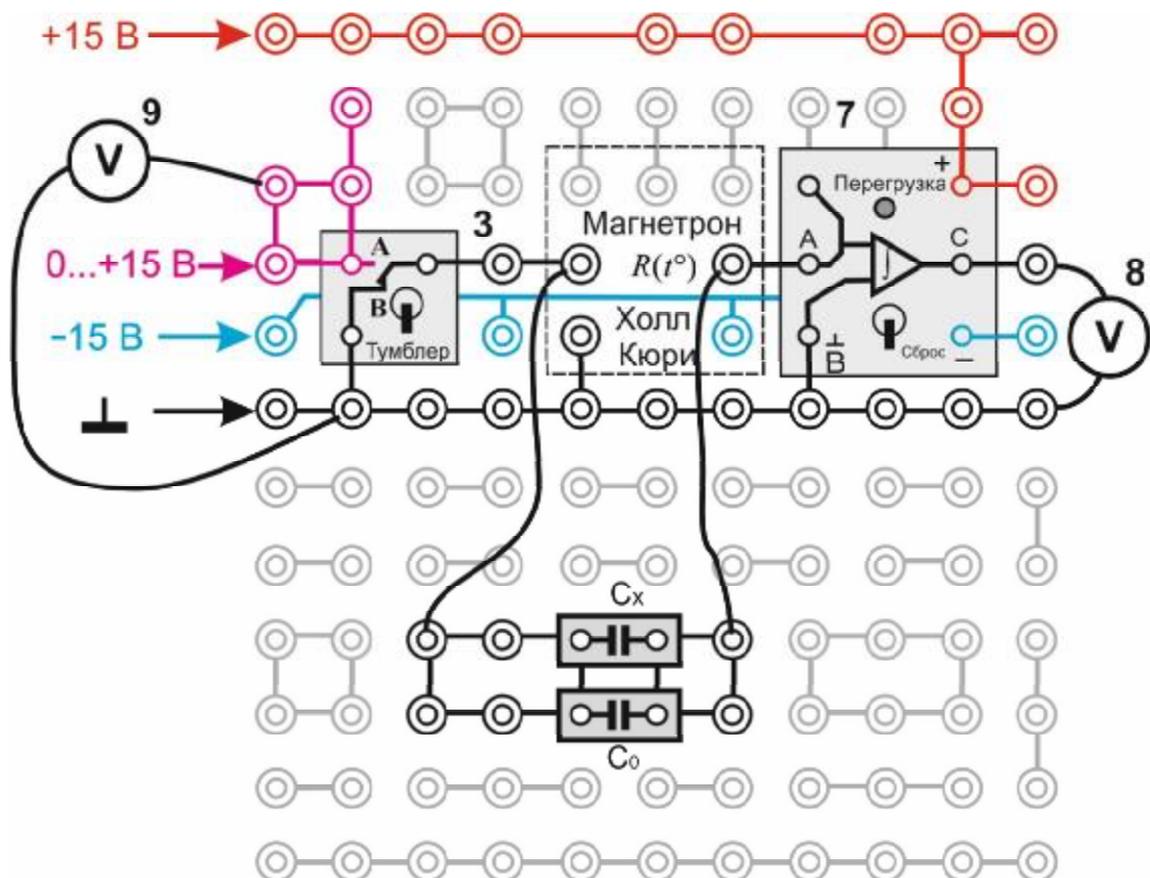


Рис. 2.4. Параллельное соединение конденсаторов

ЭТАП 4. Определение электроёмкости батареи последовательно соединённых конденсаторов C_x и C_0

1. Соединить конденсаторы C_0 и C_x *последовательно* (рис. 2.5). Выбрать для батареи напряжение зарядки $U_{\text{посл}}$. Рекомендуется установить напряжение $U_{\text{посл}}$ больше чем максимальное значение U_x , но напряжение разряда $U_{\text{посл}}^{\text{инт}}$ не должно превышать 8 – 10 В.
2. Провести измерения и записать напряжения $U_{\text{посл}}^{\text{инт}}$ не менее 5 раз.
3. Нажать кнопку «Исходная установка», закрыть программу и выключить питание стенда.

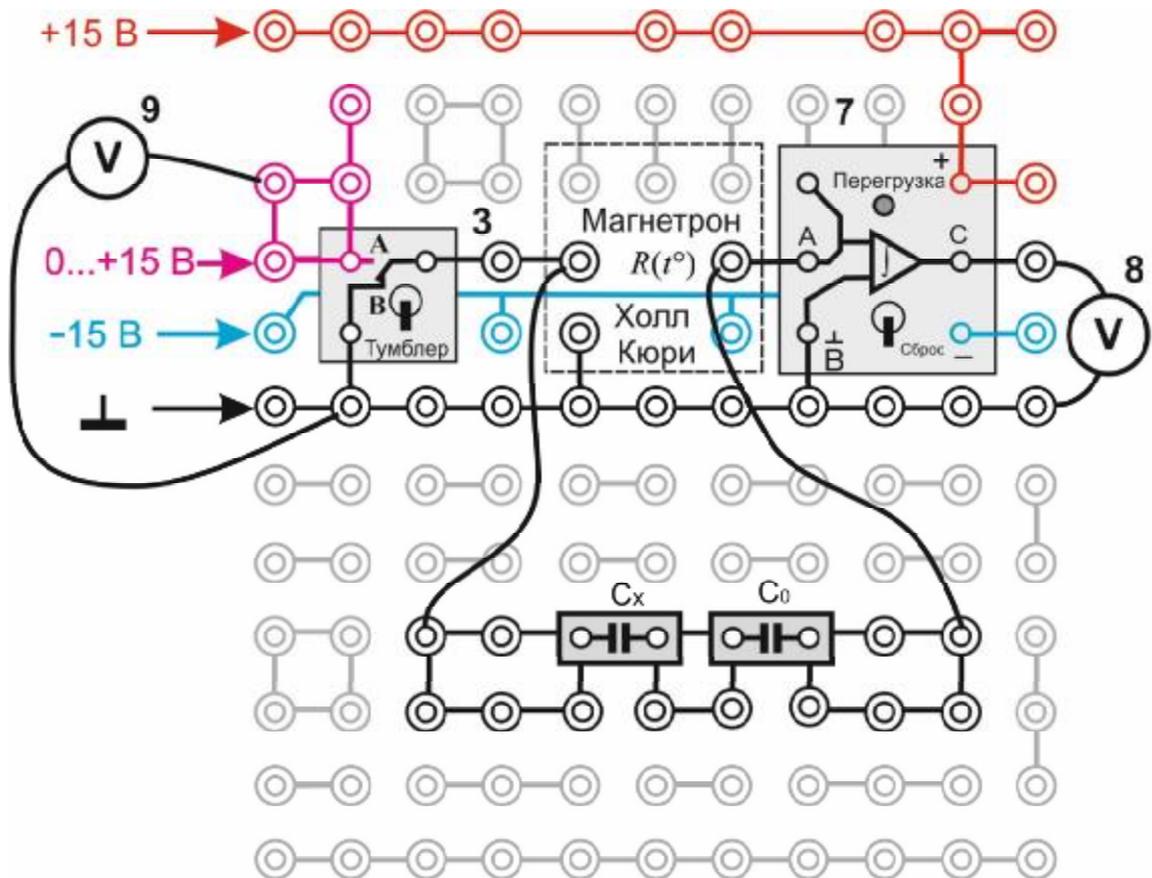


Рис. 2.5. Последовательное соединение конденсаторов

ЭТАП 5. Определение неизвестной электроёмкости конденсатора C_x с помощью фарадометра

Измерить мультиметром в режиме фарадометра неизвестную ёмкость C_x . Для этого переключатель рода работ перевести в положение «F» и установить предел измерения «2μ», что означает предел измерения 2 мкФ. Конденсатор с неизвестной ёмкостью C_x подключить к разъемам (рис. 2.6). Записать результат измерения $C_x^{\text{изм}}$. Также необходимо проверить электроёмкость известного конденсатора C_0 и использовать в дальнейшем её значение в расчётах.

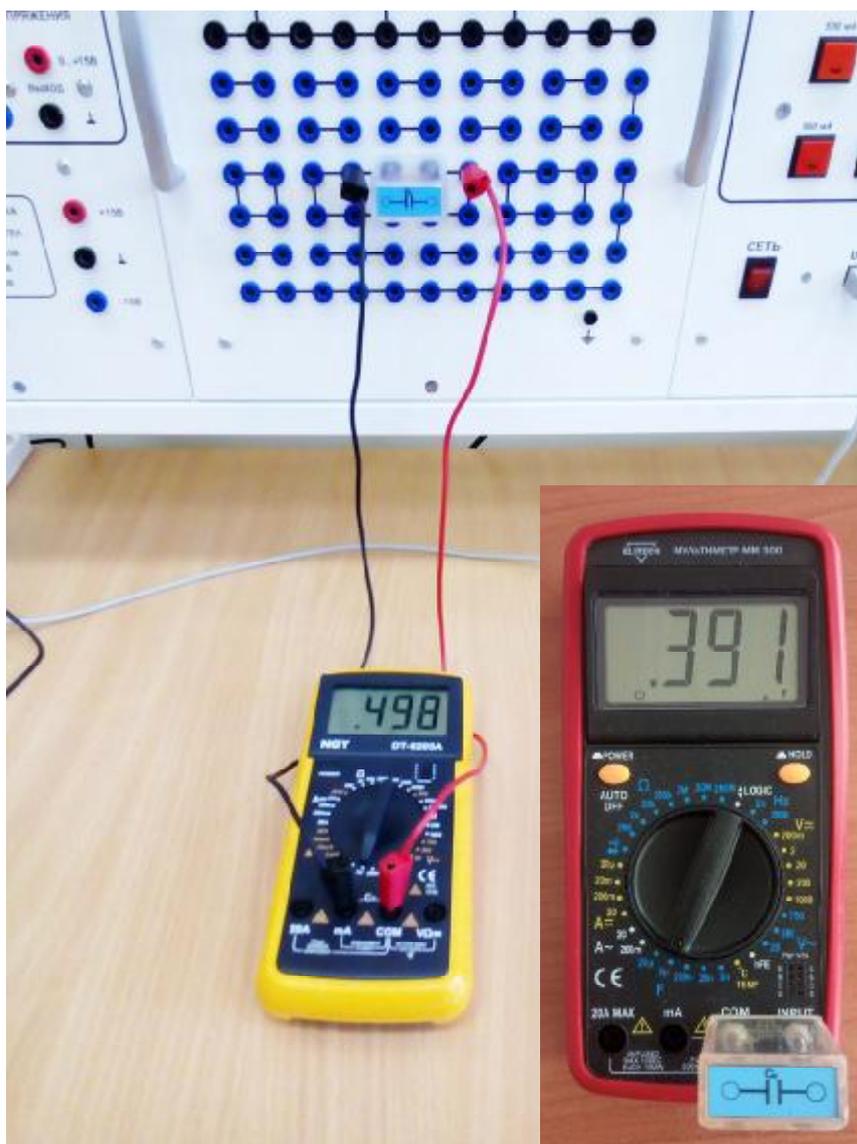


Рис. 2.6. Подключение фарадометра (два варианта)

Обработка результатов измерений

ЭТАП 1. Определение градуировочной постоянной b .

По формуле (2.7) рассчитать значение b , при этом значение напряжения на выходе интегратора взять среднее арифметическое $\langle U_0^{\text{инт}} \rangle$. Оценить случайную δb , систематическую θb и полную погрешность Δb градуировочной постоянной (см. Приложение).

ЭТАП 2. Определение неизвестной ёмкости C_x .

1. Определить заряд Q , прошедший через интегратор при различных напряжениях U_x по формуле (2.5).

2. Построить график зависимости Q от U_x . Провести наилучшую прямую.
3. Найти угловой коэффициент C наилучшей прямой $Q = C \cdot U_x$. Найденный угловой коэффициент равен C_x .
4. Графически оценить случайную погрешность δC_x .
5. Оценить систематическую погрешность θC_x .
6. Оценить полную погрешность ΔC_x (см. Приложение).

ЭТАП 3. Определение ёмкости батареи параллельно соединённых конденсаторов.

1. По формуле (2.6) рассчитать ёмкости батарей конденсаторов $C_{\text{эксп}}^{\text{парал}}$.
2. Используя значения ёмкостей C_0 и $C_x^{\text{изм}}$, по формуле (2.3) вычислить величину $C_{\text{теор}}^{\text{парал}}$.
3. Найти относительное отклонение $\gamma^{\text{парал}}$ экспериментальных значений ёмкости батареи конденсаторов от теоретического значения

$$\gamma^{\text{парал}} = \frac{|C_{\text{эксп}}^{\text{парал}} - C_{\text{теор}}^{\text{парал}}|}{C_{\text{теор}}^{\text{парал}}} 100\% .$$

ЭТАП 4. Определение ёмкости батареи последовательно соединённых конденсаторов.

1. По формуле (2.6) рассчитать ёмкости батарей конденсаторов $C_{\text{эксп}}^{\text{посл}}$.
2. Используя значения ёмкостей C_0 и $C_x^{\text{изм}}$, по формуле (2.4) вычислить величину $C_{\text{теор}}^{\text{посл}}$.
3. Найти относительное отклонение $\gamma^{\text{посл}}$ экспериментальных значений ёмкости батареи конденсаторов от теоретического значения

$$\gamma^{\text{посл}} = \frac{|C_{\text{эксп}}^{\text{посл}} - C_{\text{теор}}^{\text{посл}}|}{C_{\text{теор}}^{\text{посл}}} 100\% .$$

ЭТАП 5. Сравнение полученное значение C_x и измеренное фарадометром $C_x^{\text{изм}}$. Определить:

$$\gamma^x = \frac{|C_x - C_x^{\text{изм}}|}{C_x^{\text{изм}}} 100\%$$

Контрольные вопросы

1. Дайте определения электроёмкости проводника и конденсатора.
2. От каких величин зависит электроёмкость проводника и конденсатора?
3. Как изменится электроёмкость конденсатора при изменении проницаемости диэлектрика или расстояния между обкладками?
4. Запишите формулы для расчета электроёмкости при последовательном и параллельном соединениях конденсаторов. Как изменяется электроёмкость в соединениях по сравнению с электроёмкостью одного конденсатора?
5. Сравните заряд и напряжение на одном конденсаторе и батареи конденсаторов соединенных:
 - а) последовательно,
 - б) параллельно.
6. Какую величину измеряют интегратором тока?
7. Какой смысл имеет постоянная измерительной установки b ?
8. Какие формулы используют для определения величин: b , $\langle C_x \rangle$, $\langle C_{\text{парал}}^{\text{эксп}} \rangle$, $\langle C_{\text{парал}}^{\text{теор}} \rangle$, $\langle C_{\text{посл}}^{\text{эксп}} \rangle$, $\langle C_{\text{посл}}^{\text{теор}} \rangle$?

Лабораторная работа Э-3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКА

Цель работы: освоить приборы и методы измерения сопротивления проводников, определить удельное сопротивление проводника.

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

$$I = \frac{U}{R}, \text{ или } R = \frac{U}{I}. \quad (3.1)$$

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

$$R = \rho \frac{l}{S}, \text{ или } \rho = R \frac{S}{l}. \quad (3.2)$$

где ρ – коэффициент пропорциональности, характеризующий материал проводника. Называется этот коэффициент *удельным электрическим сопротивлением* и численно равен сопротивлению однородного цилиндрического проводника, изготовленного из данного материала, имеющего единичную длину и единичную площадь поперечного сечения. Из формулы (3.2) следует, чтобы определить удельное сопротивление однородного проводника, имеющего постоянную площадь поперечного сечения, необходимо измерить его сопротивление и геометрические параметры.

Методы измерений сопротивления проводника

В работе реализуют три метода измерения сопротивления проводника:

- 1) Технический метод;
- 2) Мостовой метод;
- 3) Метод омметра.

1. *Технический метод* осуществляют по схеме, приведённой на рис. 3.1. При этом измеряют ток I через резистор и падение напряжения на нём U . Это позволяет рассчитать неизвестное сопротивление резистора R .

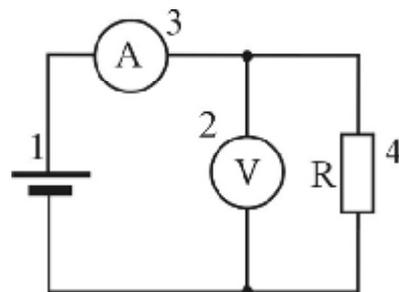


Рис. 3.1. Электрическая схема:
1 – регулируемый источник постоянного напряжения (0...+15 В);
2 – вольтметр;
3 – амперметр;
4 – резистор R

2. Метод измерений с помощью моста постоянного тока. Измерительные мосты – это *высокоточные* приборы, предназначенные для измерения электрических сопротивлений, ёмкостей, индуктивностей и других параметров методом уравновешенных мостовых цепей. На рис. 3.2 приведена схема простейшего моста (мост Уитстона), который используется для измерения сопротивлений.

Подбирая значение сопротивления реостата R_p , добиваются равенства потенциалов точек a и b , при этом ток I_A , текущий через амперметр, обращается в нуль. В таком уравновешенном состоянии моста выполняются равенства:

$$\begin{aligned} I_p R_p &= I_1 R_1; & IR &= I_2 R_2; \\ I_p &= I; & I_1 &= I_2. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Из этих соотношений следует расчётная формула:

$$R = R_p \frac{R_2}{R_1}. \quad (3.4)$$

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

3. *Использование омметра* является наиболее простым методом: достаточно подключить измеряемый резистор к входам омметра и считать показания прибора. В основе работы омметров обычно лежит приближённый технический метод: прибор градуируют с использованием формулы (3.4) при фиксированном напряжении U батареи питания.

Описание установки

Оборудование: миниблоки «Сопротивление проводника» (рис. 3.3), «Резистор (10, 100 и 470 Ом)», «Реостат», источник постоянного напряжения, мультиметры.

Миниблок «Сопротивление проводника» предназначен для определения удельного сопротивления проводника (выводы АВ). На блоке указаны длина L и диаметр проводника d .

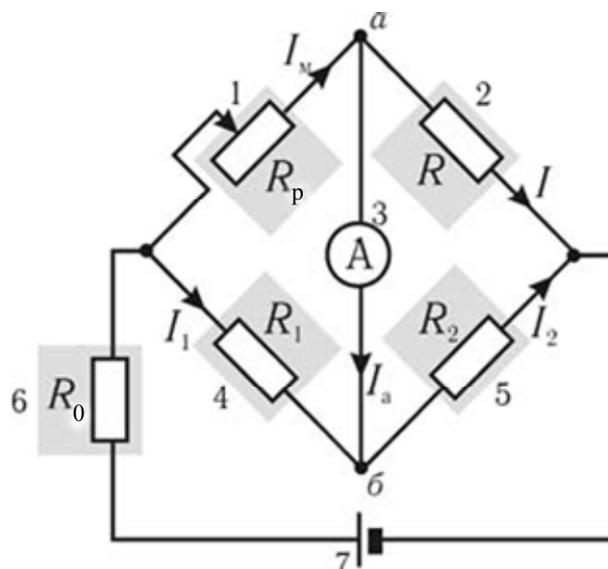


Рис. 3.2. Электрическая схема простейшего моста Уитстона:
1 – реостат R_p ,
2 – измеряемое сопротивление R ,
3 – амперметр,
4 – сопротивление $R_1 = 100$ Ом,
5 – сопротивление $R_2 = 10$ Ом,
6 – сопротивление $R_0 = 470$ Ом,
7 – источник постоянного напряжения «+15 В»



Рис. 3.3. Миниблок «Сопротивление проводника»

В нём размещается проволочный проводник в виде спирали, намотанной в один слой на тороидальный изолятор.

Выполнение работы

1. Технический метод измерения сопротивления

1.1. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 3.4. Записать геометрические параметры проводника L и d .

1.2. Включить блок генераторов и измерительный блок.

1.3. Кнопкой Δ «Установка напряжения 0 ... +15 В» на регулируемом источнике постоянного напряжения установить ток I в цепи примерно 10 мА. Определить напряжение U . Значения величин записать в таблицу.

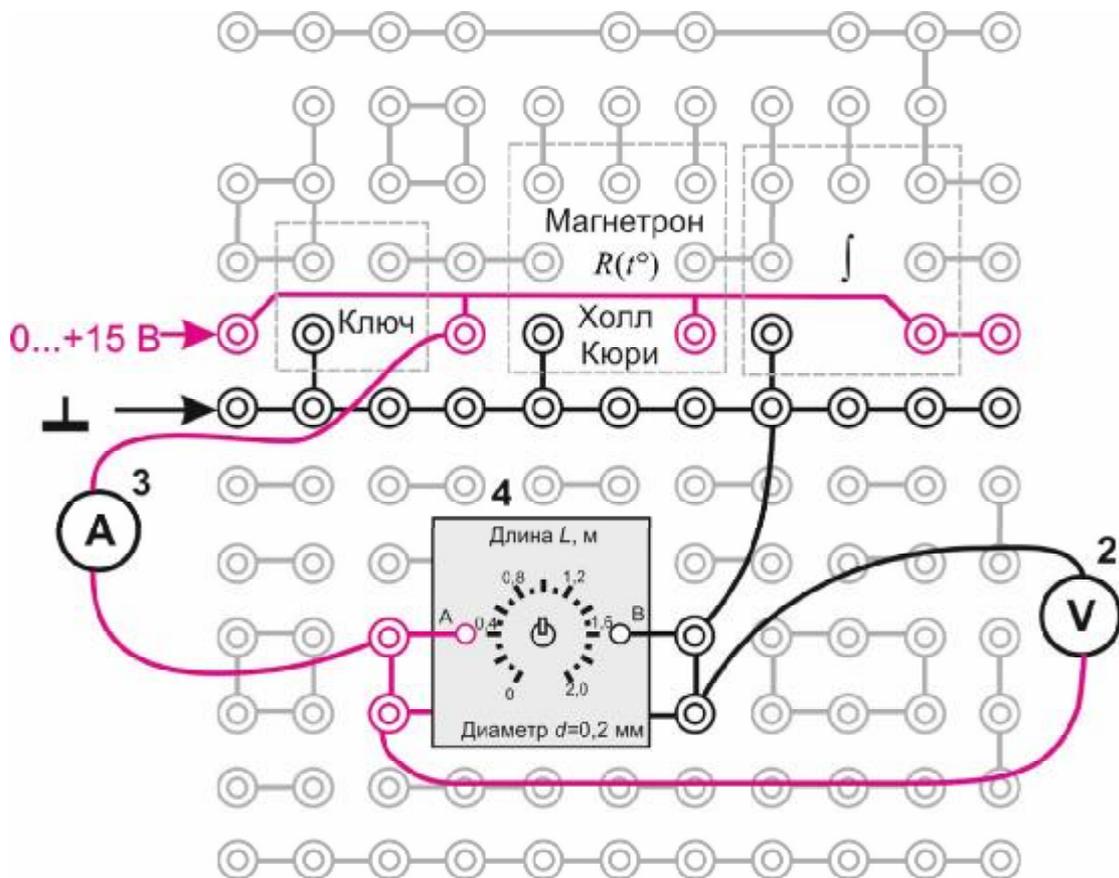


Рис. 3.4. Монтажная схема измерения сопротивления техническим методом: обозначения 2, 3, 4 – см. на рис. 3.1

1.4. Увеличивая последовательно ток примерно на 5-7 мА, провести измерения. Максимальный ток – 50 мА.

1.5. Нажать кнопку «Исходная установка» и левой кнопкой «СЕТЬ» выключить питание генераторов.

2. Измерение с помощью моста Уитстона

2.1. Собрать монтажную схему (рис. 3.5).

2.2. Включить блок генераторов.

2.3. Подобрать такое сопротивление реостата R_p , чтобы показание амперметра было близко к нулю. Если ток меньше 2 мА, то необходимо переключить диапазон измерений на 2 мА. Затем, поворачивая ручку реостата, добиться нулевого значения тока.

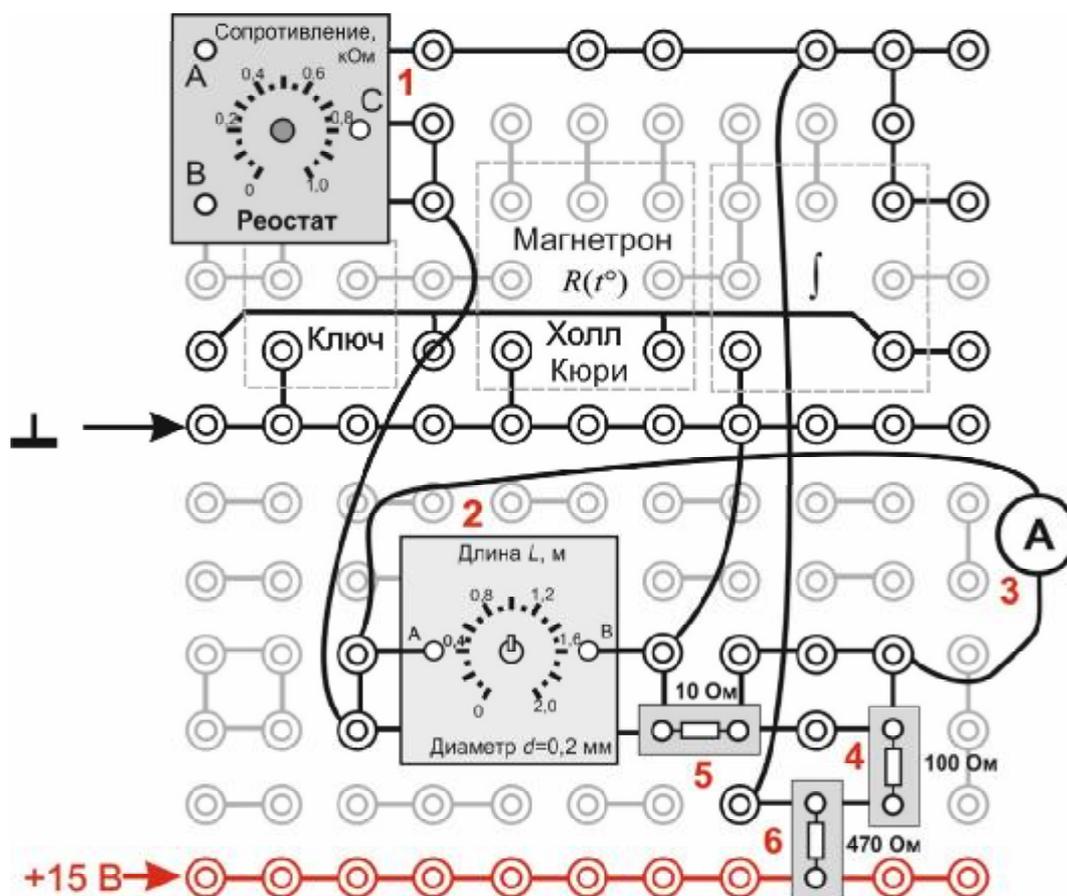


Рис. 3.5. Монтажная схема измерения сопротивлений методом моста Уитстона: обозначения 1, 2, 3, 4, 5, 6 – см. рис. 3.2

2.4. Выключить питание стенда. Разобрать электрическую цепь. Мини-блоки «Сопротивление проводника» и «Реостат» оставить на наборном поле в прежнем положении. Ручку реостата не поворачивать!

2.5. Измерить сопротивление реостата мультиметром и записать R_p (рис. 3.6). Также сопротивления R_1 и R_2 необходимо измерить мультиметром.

3. Метод омметра

Аналогичные измерения провести для искомого сопротивления R (рис. 3.6). Диапазон измерений подобрать самостоятельно.

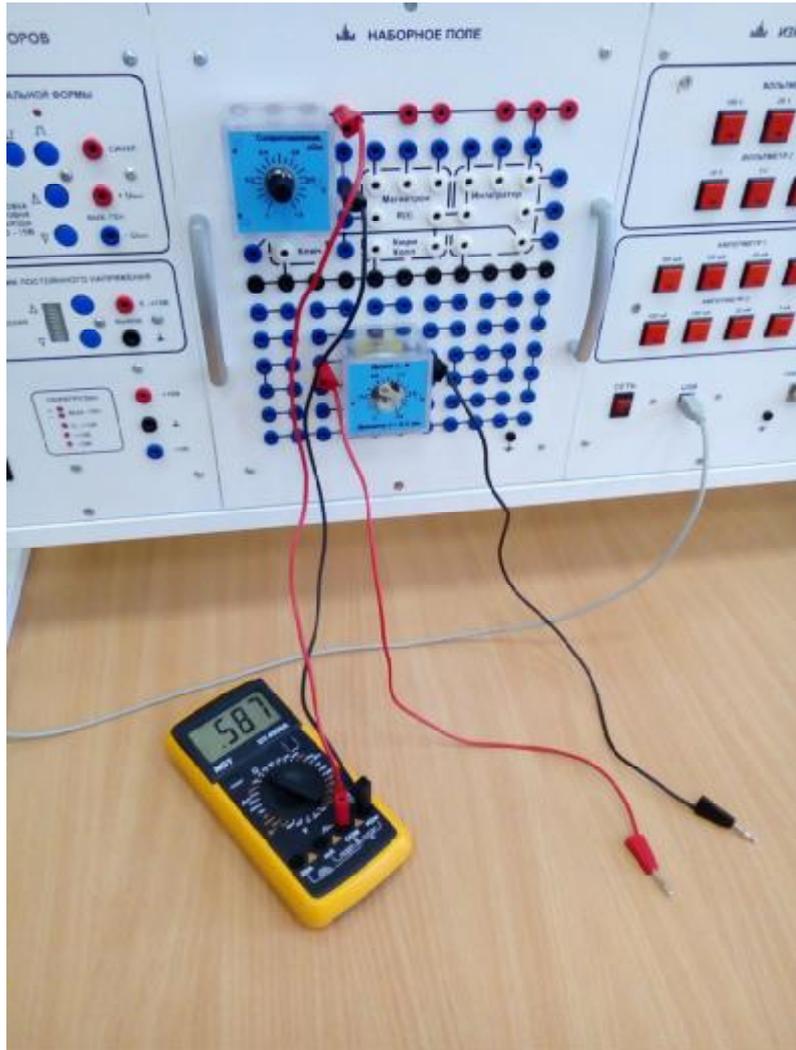


Рис. 3.6. Измерение сопротивления мультиметром

Обработка результатов измерений

1. По формуле (3.1) рассчитать сопротивление проводника R , измеренное техническим методом.
2. Вычислить по формуле (3.4) сопротивление проводника R , измеренное с помощью моста.
3. Оценить погрешности измерения сопротивления проводника по каждому из перечисленных методов измерения.
4. Используя наиболее точное значение сопротивления R , рассчитать по формуле (3.2) удельное сопротивление проводника. Определить материал проводника, сравнив полученное значение ρ с табличными значениями.

Таблица 3.1

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

Оценка погрешностей измерений

1. Технический метод

По способу получения результатов измерения сопротивлений данным методом являются косвенными: измеряемая величина R связана с величинами U и I , получаемыми путём прямых измерений, простой зависимостью (3.1) (см. Приложение).

1.1. *Систематическая относительная* погрешность косвенных измерений сопротивления находится как

$$\gamma_R = \frac{\theta R}{R} = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\theta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\theta I}{I}\right)^2}, \quad (3.5)$$

где $\frac{\theta U}{U}$, $\frac{\theta I}{I}$ – систематические относительные погрешности прямых измерений напряжения и тока.

1.2. *Систематическая абсолютная* погрешность находится из её связи с относительной

$$\theta R = \frac{\gamma_R \cdot R}{100\%}. \quad (3.6)$$

1.3. Доверительная граница *случайной абсолютной* погрешности прямых многократных измерений

$$\delta R = t_{P,N} \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (R_i - \langle R \rangle)^2}, \quad (3.7)$$

где $t_{P,N}$ – коэффициент Стьюдента, P – доверительная вероятность, N – число измерений. В этой формуле величины R_i и $\langle R \rangle$.

1.4. После определения систематической погрешности и доверительной границы случайной погрешности необходимо оценить границы *полной* погрешности результата измерений. Для этого сравнивают их между собой.

Если эти погрешности близки по значению, то доверительную границу суммарной погрешности рассчитывают по формуле:

- *абсолютная*

$$\Delta R = \sqrt{\delta R^2 + \theta R^2}, \quad (3.8)$$

- *относительная*

$$E_R = \frac{\Delta R}{\langle R \rangle} \cdot 100\%. \quad (3.9)$$

Если же одна из погрешностей в три и более раз превышает другую, то в качестве меры погрешности принимается большая из них.

2. Измерение мостом Уитстона

По способу получения результатов измерения сопротивлений данным методом тоже являются косвенными. Исходной функцией для измерения сопротивления в этом случае является выражение (3.4). Поэтому относительная погрешность определяется по формуле:

$$\gamma_R = \frac{\theta R}{R} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{\theta R_p}{R_p}, \quad (3.10)$$

где $\frac{\theta R_p}{R_p}$ – *систематическая относительная* погрешность измерения сопротивления реостата (определяется систематической погрешностью мультиметра).

3. Измерение омметром

В этом случае измерения сопротивления R являются прямыми и их погрешность определяется систематической относительной погрешностью мультиметра.

Контрольные вопросы

1. От каких величин зависит электрическое сопротивление проводника?
2. Укажите формулу для расчета сопротивления по размерам проводника.
3. Назовите методы измерений сопротивления проводника.
4. Запишите формулы для определения сопротивления проводника в техническом методе. Какие величины измеряют в этом методе?
5. Что лежит в основе работы цифрового мультиметра (омметра)?
6. Запишите условия равновесия для моста Уитстона.
7. По какой формуле определяют сопротивление при измерении мостом?

Лабораторная работа Э-4

ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА И ПОЛУПРОВОДНИКА

Цель работы: экспериментально определить температурный коэффициент сопротивления металла и ширину запрещённой зоны полупроводника.

По электрическим свойствам вещества разделяют на три класса: проводники, диэлектрики и полупроводники. Типичными проводниками являются **металлы**, у которых удельное электрическое сопротивление $\rho < 10^{-6}$ Ом·м. Удельное электрическое сопротивление **полупроводников** обычно лежит в пределах от 10^{-6} до 10^{14} Ом·м. Материалы, у которых величина $\rho > 10^{14}$ Ом·м, относятся к **диэлектрикам**. Полупроводниками являются ряд элементов III–VI групп периодической таблицы элементов Д.И. Менделеева (В, Ge, Si, As, Te и т.д.), а также большое число химических соединений (GaAs, GaP, ZnS, SiC и др.). В зависимости от внешних условий (температура, давление) одно и то же вещество может относиться к разным классам. Например, германий при температуре жидкого азота 77 К – диэлектрик, при комнатной температуре – полупроводник, а в жидком состоянии является проводником.

Квантовая теория твёрдого тела даёт более обоснованную классификацию веществ. Согласно этой теории, электроны в атоме могут иметь только определённые значения энергии, которые называют **энергетическими уровнями**. Именно эти уровни при объединении отдельных атомов в кристалл образуют **разрешённые энергетические зоны**. Промежуток, разделяющий такие зоны, называют **запрещённой зоной** (рис. 4.1). Энергетическая зона считается заполненной, если все уровни зоны заняты электронами. При этом, согласно принципу Паули, на одном энергетическом

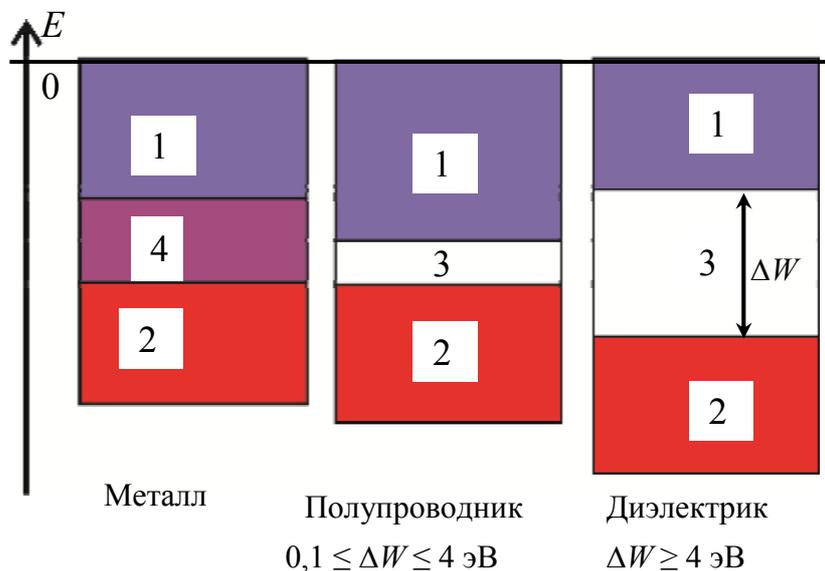


Рис. 4.1. Энергетические зоны:
1 – зона проводимости;
2 – валентная зона;
3 – запрещённая зона;
4 – зона перекрытия.
 ΔW – ширина запрещённой зоны

уровне может находиться не более двух электронов, имеющих противоположно направленные спины. Зона считается свободной, если уровни этой зоны не заняты.

Если в веществе валентные электроны образуют полностью заполненную зону (её называют *валентной зоной*) так, что последующая разрешённая зона свободна (её называют *зоной проводимости*), то электропроводность такого вещества равна нулю, и оно является диэлектриком. Действительно, движение электронов под действием внешнего электрического поля (электрический ток), предполагает увеличение энергии электронов, то есть переход их на более высокий незанятый энергетический уровень. В случае же полностью заполненной валентной зоны таких уровней нет, значит, в веществе с такой зонной структурой электрон не может ускоряться внешним электрическим полем. Для того чтобы перевести электроны из валентной зоны в зону проводимости, им следует сообщить энергию, не меньшую, чем ширина запрещённой зоны ΔW . Часть электронов приобретает эту энергию при облучении вещества светом или за счёт теплового движения атомов. Поэтому при обычных температурах ($T \approx 300$ К) в зоне проводимости есть некоторое количество электронов. В зависимости от их концентрации вещество может быть либо диэлектриком, либо полупроводником, причём различие между этими классами определяется значениями ΔW и температуры T . Для полупроводников при комнатной температуре ширина запрещённой зоны ΔW составляет менее 4 эВ, а для диэлектриков – больше 4 эВ.

Температурная зависимость проводимости полупроводников определяется изменением концентрации носителей тока – электронов, перешедших в зону проводимости. При увеличении температуры их количество экспоненциально возрастает, поэтому сопротивление R чистых полупроводников уменьшается с ростом температуры T по закону

$$R = A \cdot \exp\left(\frac{\Delta W}{2kT}\right), \quad (4.1)$$

где A – величина, слабо зависящая от температуры; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Проводники имеют другую зонную структуру. Валентные электроны частично заполняют зону (рис. 4.1), при этом электроны могут свободно перемещаться под действием внешнего электрического поля. Валентная зона и зона проводимости в данном случае перекрываются. В проводнике концентрация свободных электронов не зависит от температуры – в этом основное отличие проводника от полупроводника и диэлектрика. Для проводников зависимость сопротивления от температуры значительно слабее, чем для диэлектриков. Она определяется рассеянием энергии электронов при взаимодействии с дефектами и фононами (квантами упругих волн) кристаллической решетки. С ростом температуры увеличивается число фононов, что

ведёт к снижению длины свободного пробега электронов проводимости в металле. При этом электрическое сопротивление R проводников увеличивается по линейному закону

$$R = R_0(1 + \alpha_t \cdot t), \quad (4.2)$$

где R_0 – сопротивление проводника при 0°C , α_t – температурный коэффициент сопротивления (ТКС), t – температура в градусах Цельсия.

Согласно теоретическим предсказаниям, у чистых металлов ТКС должен быть равен $1/273 \text{ град}^{-1} = 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$.

Описание метода исследования

Зависимость сопротивления проводника от температуры (4.2) в координатах $R \leftrightarrow t$ изображается прямой линией, угловым коэффициент которой

$$k_1 = \alpha_t R_0. \quad (4.3)$$

По величине k_1 можно определить значение температурного коэффициента сопротивления исследуемого проводника:

$$\alpha_t = \frac{k_1}{R_0}. \quad (4.4)$$

Значение сопротивления проводника R_0 находится путем экстраполяции полученной линейной зависимости до температуры 0°C .

Для полупроводника зависимость сопротивления от температуры нелинейная, поэтому для её нахождения используют координаты $\ln R \leftrightarrow \frac{1}{T}$, где T – температура по шкале Кельвина. Действительно, логарифмируя уравнение (4.1), получаем

$$\ln R = \ln A + \frac{\Delta W}{2k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (4.5)$$

График функции $\ln R$ от $\frac{1}{T}$ является линейным с угловым коэффициентом:

$$k_2 = \frac{\Delta W}{2k}. \quad (4.6)$$

Это позволяет найти ширину запрещённой зоны полупроводника по формуле:

$$\Delta W = 2k \cdot k_2. \quad (4.7)$$

Таким образом, если экспериментально найти зависимость сопротивления проводника и полупроводника от температуры, то можно рассчитать для первого – ТКС α_t , для второго – ширину запрещённой зоны ΔW .

Описание установки

Оборудование: источники постоянного напряжения, миниблоки «Исследование температурной зависимости сопротивления проводника и полупроводника», мультиметры.

Электронагреватель 2 подключен к регулируемому источнику постоянного напряжения 1 («0...+15 В») (рис. 4.2). При включении источника начинается нагрев исследуемых образцов. Для измерения сопротивления проводника и полупроводника используют омметры. Температуру образцов измеряют с помощью термопары 1, напряжение с которой подаётся на клеммы мультиметра, настроенного на измерение температуры.

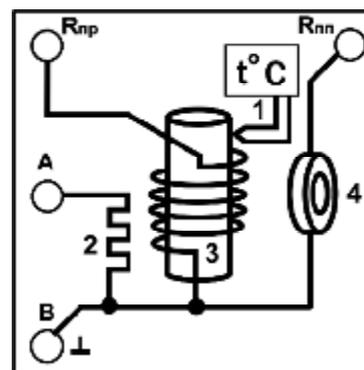


Рис. 4.2. Миниблок

- 1 – клеммы термопары;
- 2 – нагреватель;
- 3 – проводник;
- 4 – полупроводник;
- $R_{пр}$ – вывод проводника;
- $R_{пп}$ – вывод полупроводника
- A, B – клеммы нагревателя

Выполнение работы

1. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 4.3. К соответствующим клеммам подключить мультиметр, настроенный на измерение температуры. Клемма, отмеченная синим цветом на миниблоке, подключается к разъёму «СОМ».

2. Подключить мультиметры в режиме измерения сопротивления. Установить диапазоны омметров 1 и 2 самостоятельно.

3. Записать показания омметров при комнатной температуре.

4. Включить питание блока генераторов.

5. Кнопками «Установка напряжения 0 ... +15 В» установить по индикатору 2–3 деления. Записывать показания приборов через каждые 5 °С до 70 °С. Нагрев должен происходить медленно, чтобы термодинамическое равновесие внутри миниблока успевало устанавливаться. Если нагрев происходит слишком медленно, то необходимо поднять напряжение на нагревателе на 2–3 деления.

6. По окончании измерений сбросить напряжение на нагревателе с помощью кнопки «Исходная установка» и выключить питание блока генераторов.

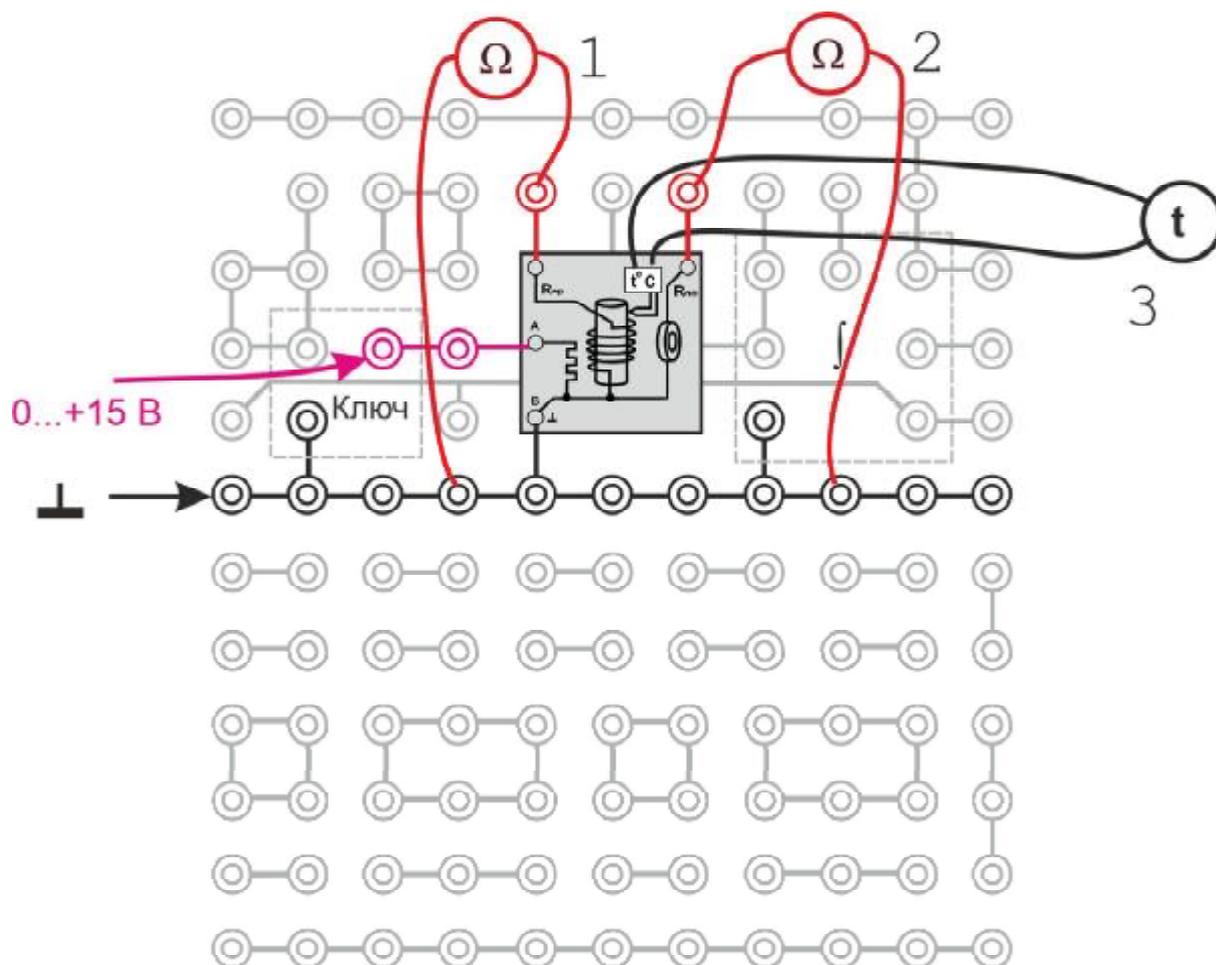


Рис. 4.3. Монтажная схема установки

Обработка результатов измерений

1. По экспериментальным данным рассчитать сопротивление проводника, учитывая при этом смещение нуля приборов и построить график зависимости сопротивления проводника от температуры в координатах $R_{\text{пр}} \leftrightarrow t$. Ось температуры следует начинать с 0°C (рис. 4.4).

2. Экстраполируя полученную линейную зависимость до пересечения с осью ординат, найти сопротивление проводника R_0 при температуре 0°C .

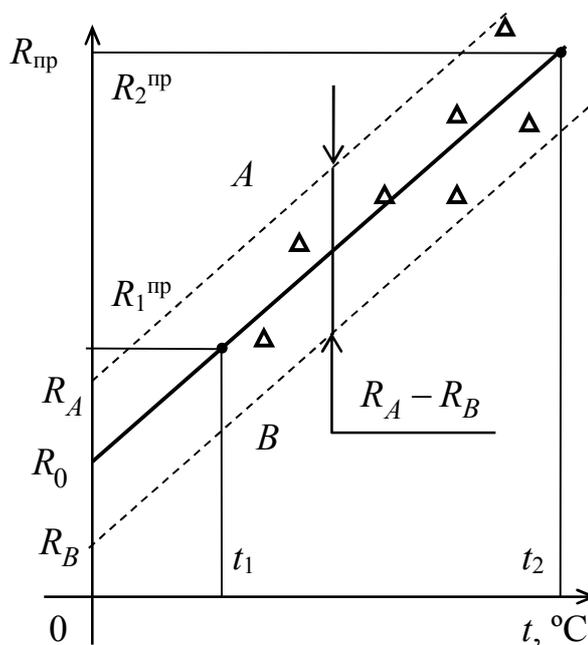


Рис. 4.4. Зависимость сопротивления проводника от температуры

3. По полученному графику рассчитать среднее значение углового коэффициента k_1 . Для этого на **концах** экспериментальной прямой выбрать две точки 1 и 2 и спроецировать их на координатные оси. Тогда

$$k_1 = \frac{R_2^{\text{пп}} - R_1^{\text{пп}}}{t_2 - t_1}. \quad (4.8)$$

4. По формуле (4.4) вычислить величину среднего температурного коэффициента сопротивления α_t исследуемого проводника.

5. По экспериментальным данным построить для полупроводника график в координатах $\ln R \leftrightarrow 1/T$. Линейный характер этого графика подтверждает экспоненциальный характер зависимости сопротивления полупроводника от температуры.

6. По этому графику определить среднее значение углового коэффициента прямой k_2 аналогично п. 3:

$$k_2 = \frac{(\ln R^{\text{пп}})_2 - (\ln R^{\text{пп}})_1}{1/T_2 - 1/T_1}. \quad (4.9)$$

7. По формуле (4.7) вычислить ширину запрещенной зоны полупроводника ΔW . Записать её значение в джоулях и электронвольтах.

Оценка погрешностей измерений

1. *Систематическая относительная* погрешность при косвенном многократном измерении температурного коэффициента сопротивления находится по известным правилам. За исходную функцию удобно взять выражение, полученное из формулы (4.2)

$$\alpha_t = \frac{R - R_0}{R_0 \cdot t} = \frac{1}{t} \left(\frac{R}{R_0} - 1 \right). \quad (4.10)$$

Тогда

$$\gamma = \theta \alpha_t / \alpha_t = 1,1 \sqrt{2 \cdot (\theta R/R)^2 + (\theta t/t)^2}; \quad (4.11)$$

здесь $\theta R/R$, $\theta t/t$ – систематическая относительная погрешность при измерении сопротивления и температуры (оценить самостоятельно).

2. *Случайная относительная* погрешность косвенных измерений величины α_t находится по тому же правилу, что и в п. 1. В качестве исходной функции удобно взять расчётную формулу (4.4). Тогда

$$\varepsilon = \delta \alpha_t / \alpha_t = \sqrt{(\delta k_1 / k_1)^2 + (\delta R_0 / R_0)^2}, \quad (4.12)$$

где δk_1 , δR_0 – доверительные границы *случайной абсолютной* погрешности среднего углового коэффициента и сопротивления проводника при температуре 0°C .

Поскольку зависимость сопротивления проводника от температуры является функцией линейной и изображается прямой, то погрешности δk_1 и δR_0 наиболее просто найти графическим способом по формулам:

$$\delta k_1 = \frac{t_{P,N}(R_A - R_B)}{2\sqrt{N}(t_2 - t_1)}, \quad \delta R_0 = \frac{t_{P,N}(R_A - R_B)}{4\sqrt{N}}, \quad (4.13)$$

где $t_{P,N}$ – коэффициент Стьюдента, P – доверительная вероятность, N – число измерений, R_A, R_B – см. на рис. 4.4. Провести параллельно экспериментальной прямой по обе стороны две прямые A и B по возможности ближе так, чтобы большинство точек, (кроме промахов) оказалось внутри.

3. Доверительная граница *полной относительной* погрешности рассчитывается по формуле

$$E = \frac{\Delta\alpha_t}{\alpha_t} = \sqrt{\varepsilon^2 + \gamma^2}. \quad (4.14)$$

4. *Полная абсолютная* погрешность находится из её связи с относительной

$$\Delta\alpha_t = \frac{E}{100\%} \cdot \alpha_t. \quad (4.15)$$

5. По аналогичной схеме рассчитываются погрешности косвенных измерений ширины запрещённой зоны полупроводника.

6. Сравнить α_t и ΔW с табличными значениями. Сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. От каких величин зависит электрическое сопротивление проводника? Запишите зависимости R от размеров проводника и температуры.

2. Чем обусловлена температурная зависимость $R(t)$ для проводника?

3. Что показывает величина ТКС проводника?

4. Запишите зависимости сопротивления полупроводника от температуры.

5. Как можно объяснить сильную зависимость сопротивления полупроводника от температуры?

6. Какие приборы используются для измерения сопротивления и температуры?

7. Как определяют ТКС проводника по угловому коэффициенту прямой?

8. Какая формула связывает угловой коэффициент экспериментальной прямой и величину ΔW полупроводника?

Лабораторная работа Э-5

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА

Цель работы: изучить временную зависимость напряжения при разряде конденсатора, определить постоянную времени цепи и её сопротивление.

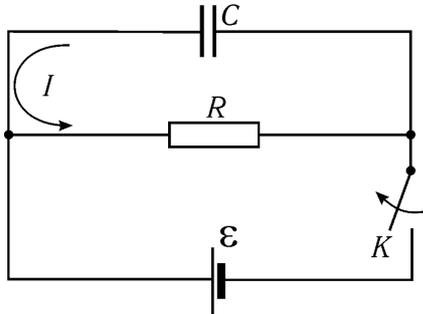


Рис. 5.1 Разряд конденсатора в цепи, содержащей конденсатор и резистор

При зарядке или разряде конденсатора в цепи (рис. 5.1) протекает изменяющийся электрический ток. Если этот ток I изменяется не слишком быстро и так, что в каждый момент времени его величина одинакова во всех точках контура, то для мгновенных значений I справедливы законы постоянного тока. Такие медленно изменяющиеся токи называют *квазистационарными*.

Ток в контуре длины l будет квазистационарным, если время его установления, равное l/c (где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость распространения электромагнитного поля в вакууме), много меньше, чем характерное для данной цепи время изменения тока τ . В случае изменения тока по экспоненциальному закону величина τ называется *постоянной времени* электрической цепи – время, за которое ток изменяется в $e \approx 2,71$ раза.

Описание метода исследования

В данной работе измерение постоянной времени RC -цепи основано на изучении процесса разряда конденсатора через резистор сопротивлением R . При этом в цепи (рис. 5.1) протекает электрический ток

$$I = -\frac{dQ}{dt}, \quad (5.1)$$

здесь Q – заряд конденсатора, пропорциональный напряжению U на его обкладках. Он определяется формулой

$$Q = CU, \quad (5.2)$$

где C – электроемкость конденсатора. Согласно закону Ома квазистационарный ток

$$I = \frac{U}{R}. \quad (5.3)$$

Используя соотношения (5.1), (5.2), (5.3), запишем дифференциальное уравнение, описывающее скорость изменения напряжения конденсатора

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{U}{RC}. \quad (5.4)$$

Разделяя в этом уравнении переменные и решая его интегрированием от начального момента $t = 0$ (напряжение U_0) до текущего t (напряжение U)

$$\int_{U_0}^U \frac{dU}{U} = -\frac{1}{RC} \int_0^t dt, \quad (5.5)$$

получаем зависимость напряжения конденсатора от времени:

$$U = U_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (5.6)$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени электрической цепи, содержащей конденсатор и резистор. Прологарифмируем полученную зависимость

$$\ln U = \ln U_0 - \frac{1}{\tau} t = \ln U_0 + k \cdot t. \quad (5.7)$$

Видно, что зависимость $\ln U = f(t)$ является линейной, причём угловой коэффициент прямой k связан с постоянной времени τ соотношением

$$k = -1/\tau \quad (5.8)$$

Таким образом, исследуя зависимость напряжения на конденсаторе от времени, можно экспериментально определить постоянную времени RC -цепи, а также при известной электроёмкости C и сопротивление цепи R .

Описание установки

Оборудование: нерегулируемый источник постоянного напряжения, секундомер, мультиметр, миниблоки «Ключ», 2 миниблока «Конденсатор».

Электрическая схема установки показана на рис. 5.2.

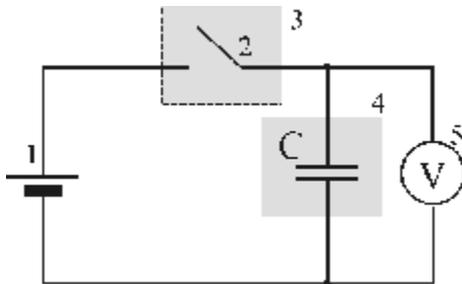


Рис. 5.2. Электрическая схема установки:

1 – источник постоянного напряжения («+15 В»), 2 – ключ, 3 – миниблок «Ключ», 4 – миниблок «Конденсатор», 5 – мультиметр

Конденсатор заряжается до напряжения U_0 от источника постоянного напряжения 1. Затем ключ 2 размыкают, и конденсатор начинает разряжаться через подключенный к нему вольтметр 5, имеющий большое входное сопротивление R_V . По вольтметру 5 можно следить за текущим значением напряжения на конденсаторе.

Выполнение работы

1. Собрать электрическую цепь с конденсатором C_1 по монтажной схеме, приведенной на рис. 5.3. Переключатель рода работ мультиметра 5 перевести в положение «V $\overline{\text{---}}$ » и установить предел измерения «20 В».
2. Включить блок питания генераторов.

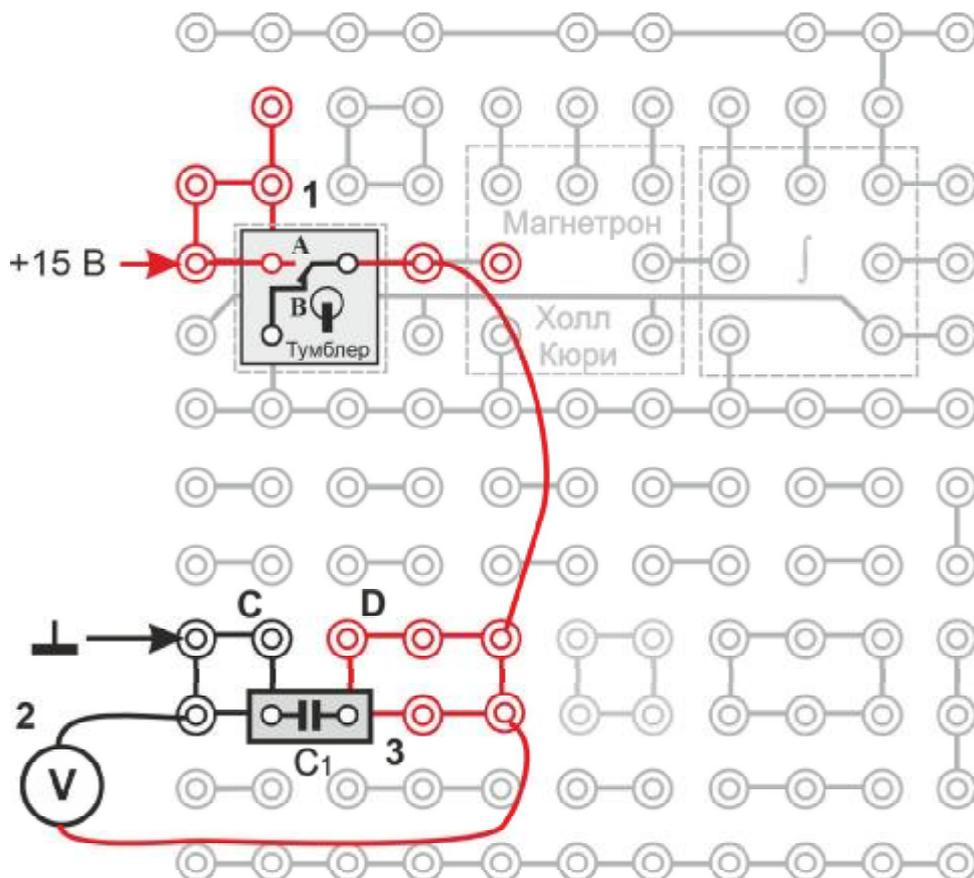


Рис. 5.3. Монтажная схема:

1 – миниблок «Ключ», 2 – мультиметр, 3 – миниблок «Конденсатор»

3. Зарядить конденсатор C_1 . Для этого тумблер миниблока «Ключ» перевести в положение А.

4. Отключить конденсатор от источника постоянного напряжения, переводя тумблер миниблока «Ключ» в положение В и по мере разряда конденсатора через каждые 5 секунд записывать показания вольтметра. Измерения повторить не менее 3 раз. Процесс разряда конденсатора можно фиксировать видеокамерой с таймером.

5. К клеммам С и D подсоединить параллельно к конденсатору C_1 второй конденсатор C_2 (рис. 5.3).

6. Провести измерения по п. 4 для батареи конденсаторов.

Обработка результатов измерений

1. По формуле для параллельного соединения конденсаторов рассчитать и записать в табл. 5.3 ёмкость батареи конденсаторов $C_{\text{парал}}^{\text{бат}}$.

2. Построить графики зависимости $\ln U = f(t)$ для конденсатора C_1 и батареи конденсаторов $C_{\text{парал}}^{\text{бат}}$ на одном поле чертежа.

3. Определить по графику $\ln U = f(t)$ угловой коэффициент k линейной зависимости (5.7) и постоянную времени цепи $\tau = -1/k$ для обоих случаев.

4. Считая, что сопротивление RC -цепи определяется в основном сопротивлением вольтметра R_V , рассчитать его для ёмкостей C_1 и $C_{\text{парал}}^{\text{бат}}$ по формуле $R_V = \tau/C$.

5. Оценить погрешность измерений сопротивления вольтметра (см. Приложение).

Контрольные вопросы

1. Какой ток называют квазистационарным? Сформулируйте условие квазистационарности электрического тока.

2. Какие физические законы и формулы используются для получения зависимости напряжения от времени при разряде конденсатора?

3. По какому закону изменяются со временем при разряде конденсатора следующие величины:

- 1) заряд обкладки,
- 2) напряжение конденсатора,
- 3) ток в RC -цепи?

4. Какую величину называют постоянной времени цепи и что она показывает?

5. Как связана постоянная времени RC -цепи с параметрами этой цепи?

6. Укажите режим работы мультиметра при проведении измерений: измеряемая величина, режим и входы для подключения прибора.

7. Какое назначение имеет источник питания в исследуемой электрической цепи?

8. Как экспериментально определяют постоянную времени цепи, содержащей резистор R и емкость C ?

9. Каким способом в данной работе измеряют сопротивление вольтметра?

10. Какие формулы используют в работе для определения следующих величин:

- а) постоянной времени цепи,
- б) сопротивления мультиметра?

11. Как оценивают в работе погрешность определения постоянной времени?

Лабораторная работа Э-6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Цель работы: ознакомиться с методом магнетрона, экспериментально определить значение удельного заряда электрона и сравнить его с табличным значением.

Если частица, обладающая массой m и зарядом Q , движется со скоростью \vec{V} в пространстве, где имеется электрическое поле напряжённостью \vec{E} и магнитное поле индукцией \vec{B} , то на неё действует сила Лоренца:

$$\vec{F} = Q\vec{E} + Q [\vec{V}, \vec{B}]. \quad (6.1)$$

Согласно второму закону Ньютона уравнение движения частицы имеет вид

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}, \quad \text{или} \quad \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{Q}{m} \vec{E} + \frac{Q}{m} [\vec{V}, \vec{B}]. \quad (6.2)$$

Из последнего уравнения видно, что характер движения и траектория заряженной частицы зависят не от её заряда и массы в отдельности, а определяются их отношением, то есть Q/m . Это отношение называется **удельным зарядом** частицы и является её важнейшей характеристикой. Экспериментально определить удельный заряд частицы можно разными способами, одним из которых является метод магнетрона.

Описание метода измерения

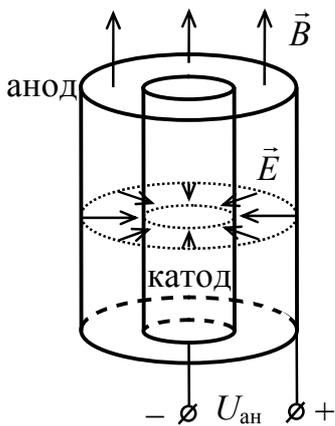


Рис. 6.1. Магнетрон

Название метода связано с тем, что в работе используется взаимная ориентация магнитного и электрического полей, подобная ориентации этих полей в **магнетронах** – генераторах электромагнитных колебаний сверхвысоких частот. Электрическое поле создают с помощью двухэлектродной лампы (диода). Её электроды – анод и катод – имеют форму соосных (коаксиальных) цилиндров, и когда к ним прикладывают разность потенциалов, вектор напряжённости электрического поля имеет радиальное направление (рис. 6.1). Магнитное поле создают соленоидом при пропускании по нему электрического тока. Лампа помещена

внутри соленоида вдоль его оси, то есть вектор индукции \vec{B} магнитного поля направлен вдоль оси электродов. Таким образом, магнитное и электрическое поле в магнетроне взаимно перпендикулярны.

Электроны в лампе испускаются нагретым катодом и под действием электрического поля начинают двигаться к аноду. Напряжённость E максимальна у катода и с увеличением расстояния от него быстро уменьшается. Поэтому основное изменение скорости электронов происходит вблизи катода, и при дальнейшем движении их скорость будет изменяться незначительно.

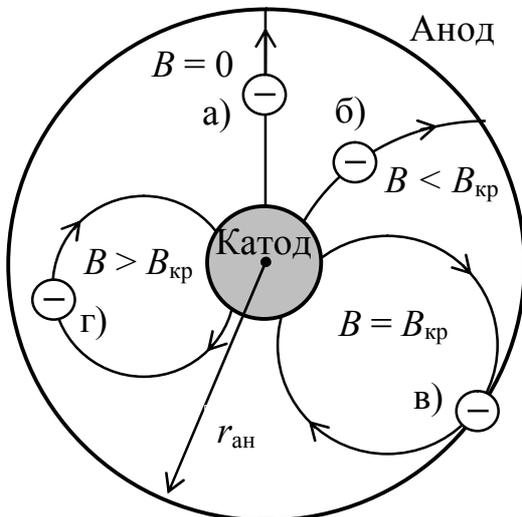


Рис. 6.2. Траектории движения электронов в магнитном поле

Так как в диоде радиус катода значительно меньше радиуса анода, то приближенно можно считать, что в кольцевом пространстве между анодом и катодом электроны движутся с постоянной скоростью. В лампе возникает анодный ток, величина которого зависит от анодного напряжения.

Если магнитное поле отсутствует, то при неизменном токе накала и стабильном анодном напряжении анодный ток имеет постоянное значение. При этом все электроны движутся по радиальным прямым от катода к аноду (рис. 6.2, а). При наличии внешнего магнитного поля на движущийся электрон будет действовать

магнитная составляющая силы Лоренца. Эта сила, будучи перпендикулярной к направлению движения электрона, выполняет роль центростремительной силы и вызывает движение по окружности. Радиус этой окружности определяется вторым законом Ньютона

$$eVB = \frac{m_e V^2}{R}, \quad (6.3)$$

где m_e – масса электрона, e – модуль его электрического заряда, то есть

$$R = \frac{m_e V}{eB}. \quad (6.4)$$

Отсюда следует:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{V}{RB}, \quad (6.5)$$

т.е. удельный заряд электрона можно определить, зная его скорость и радиус окружности, по которой он движется в магнитном поле с индукцией B .

В слабом магнитном поле этот радиус довольно велик, поэтому траектория электронов искривляется незначительно, и они все достигают анода (рис. 6.2, б). При некотором значении магнитной индукции, называемом

критическим $B_{кр}$, траектория искривляется настолько, что касается поверхности анода (рис. 6.2, в). Наконец, при $B > B_{кр}$ электроны, не достигая анода, возвращаются на катод (рис. 6.2, г).

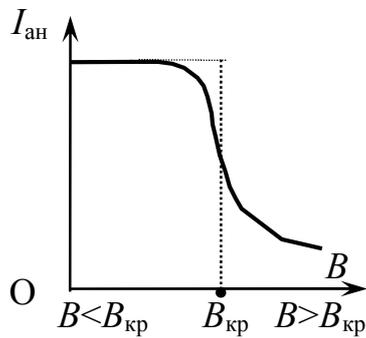


Рис. 6.3. Зависимость анодного тока от индукции магнитного поля

На рис. 6.3 показан график зависимости анодного тока от магнитной индукции. Если $B < B_{кр}$, все электроны доходят до анода, и анодный ток имеет такое же значение, как и при отсутствии магнитного поля (горизонтальная часть графика). Если $B > B_{кр}$, то электроны перестают достигать анода, и ток через лампу становится равным нулю. При $B = B_{кр}$ анодный ток должен резко уменьшаться (штриховая линия на графике), однако в реальных условиях такого явления не наблюдается. Это связано, прежде всего, с тем, что электроны, испускаемые катодом,

обладают различными начальными скоростями. Поэтому критические условия для различных электронов достигаются при разных значениях индукции магнитного поля. Зависимость величины анодного тока $I_{ан}$ от индукции магнитного поля B приобретает вследствие этого вид плавной кривой.

Дополнительными причинами плавного изменения анодного тока при переходе магнитной индукции через критическое значение служат несоосность анода и катода, неортогональность магнитного и электрического полей, нестабильность питающих напряжений и т.п. Тем не менее, участок спада анодного тока остаётся достаточно резким и может быть использован для измерения удельного заряда электрона.

Как видно из рис. 6.2, при $B = B_{кр}$ радиус кривизны траектории электрона равен половине радиуса анода $R = r_{ан}/2$. Подставив это значение в формулу (6.5), выразим удельный заряд электрона:

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2V}{B_{кр} r_{ан}}. \quad (6.6)$$

Скорость электрона определим из закона сохранения энергии:

$$\frac{m_e V^2}{2} = eU_{ан} \Rightarrow V = \sqrt{2U_{ан} \left(\frac{e}{m_e} \right)}, \quad (6.7)$$

где $U_{ан}$ – анодное напряжение, $eU_{ан}$ – работа сил электрического поля в лампе. Подставив формулу (6.7) в уравнение (6.6), получим

$$\frac{e}{m_e} = \frac{8U_{ан}}{B_{кр}^2 r_{ан}^2}. \quad (6.8)$$

Значение индукции магнитного поля внутри соленоида на его оси в том месте, где находится лампа, рассчитывают по формуле

$$B = \frac{\mu_0 N I_c}{\sqrt{L^2 + D^2}}, \quad (6.9)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, I_c – ток, текущий по соленоиду, L , D , N – его длина, диаметр и число витков. Критическому значению индукции $B_{кр}$ соответствует значение силы тока соленоида $I_{с.кр}$.

Таким образом,

$$\frac{e}{m_e} = \frac{8U_{ан}(D^2 + L^2)}{\mu_0^2 I_{с.кр}^2 N^2 r_{ан}^2}. \quad (6.10)$$

Для определения $I_{с.кр}$ можно использовать экспериментальную зависимость анодного тока от тока в соленоиде $I_{ан} = f(I_c)$ (сплошная кривая на рис. 6.4). Она по виду подобна зависимости $I_{ан} = f(B)$ (рис. 6.3). В этом случае критический ток в соленоиде будет определяться наибольшим наклоном кривой в области спада

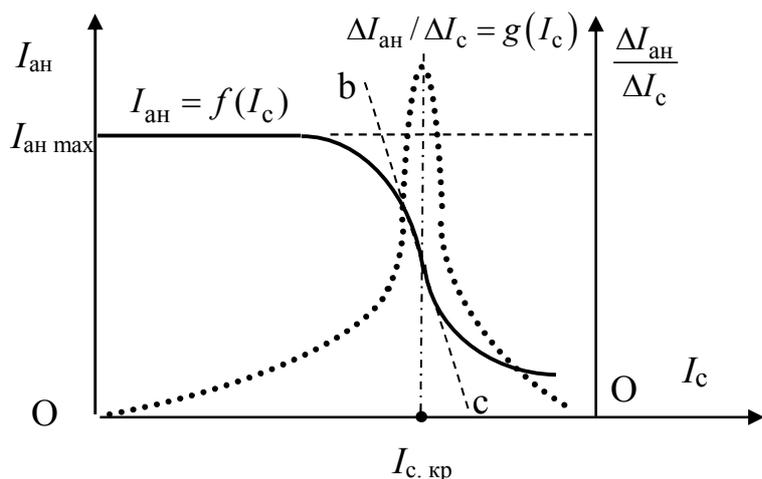


Рис. 6.4. Зависимость анодного тока магнетрона от тока соленоида

наибольшим значением модуля производной $dI_{ан}/dI_c \approx \Delta I_{ан}/\Delta I_c$. Таким образом, если построить график $\Delta I_{ан}/\Delta I_c = g(I_c)$, то максимум этой зависимости будет соответствовать значению критического тока в соленоиде (пунктирная кривая на рис. 6.4).

Описание установки

Оборудование: источник постоянного напряжения, миниблок «Магнетрон», мультиметры.

Для определения удельного заряда электрона методом магнетрона собирают электрическую цепь (см. рис. 6.5). На рис. 6.7 приведена монтажная схема установки. Основой магнетрона является вакуумная лампа (диод) 3. На нагреватель катода 5 диода от источника подаётся постоянное напряжение $U_H = -15$ В. Анод лампы 3 подключается к источнику стабилизирован-

ного постоянного напряжения +15 В. В результате нагрева катода с его поверхности испускаются электроны и под действием электрического поля анода движутся к нему. Для создания магнитного поля, влияющего на траекторию движения электронов, используется соленоид 4. Диод устанавливается внутри соленоида так, чтобы ось анода лампы совпала с осью соленоида. Соленоид подключается к регулируемому источнику постоянного напряжения. Изменение тока I_c в обмотке соленоида, а значит и индукции магнитного поля, осуществляется с помощью кнопок на панели блока генераторов.

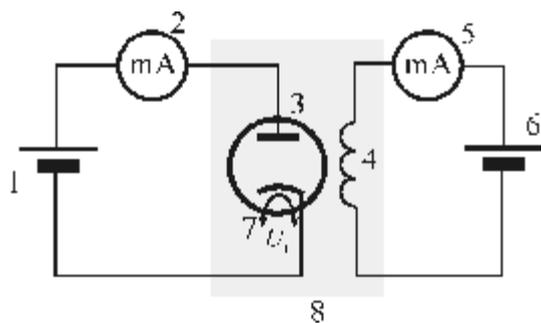


Рис. 6.5. Электрическая схема:

- 1 – источник постоянного напряжения «+15 В»;
- 2 – амперметр для измерения анодного тока;
- 3 – вакуумный диод;
- 4 – соленоид;
- 5 – амперметр для измерения тока соленоида;
- 6 – регулируемый источник постоянного напряжения «0...+15 В»;
- 7 – катод;
- 8 – миниблок «Магнетрон» (рис. 6.6)

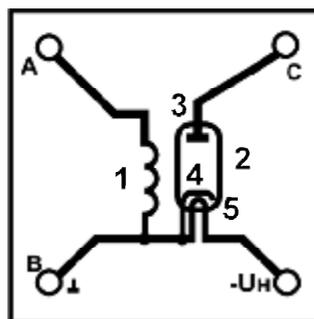


Рис. 6.6. Миниблок «Магнетрон»:

- 1 – соленоид;
- 2 – вакуумный диод;
- 3 – анод;
- 4 – катод;
- 5 – нагреватель катода;
- A, B – выводы для подключения напряжения к соленоиду;
- C, B – выводы для подключения анодного напряжения;
- U_н – вывод для подключения напряжения к нагревателю

Выполнение работы

1. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведенной на рис. 6.7. **Внимание!** Миниблок вставлять в гнезда наборного поля надписью «Магнетрон» *вверх*.

2. Включить питание блоков генераторов напряжения и измерительного блока. Настроить мультиметры на измерение постоянного тока. Рекомендуемые диапазоны: анодный ток 2 мА (2), ток соленоида 200 мА (5).

3. Выждать некоторое время для установления анодного тока в лампе. Измерить и записать смещение нуля тока в цепи соленоида (ΔI_c).

4. Снять зависимость анодного тока в лампе от тока в соленоиде. Для этого кнопкой Δ «Установка напряжения 0 ... +15 В» на блоке генераторов последовательно устанавливать по миллиамперметру 5 токи в соленоиде I_c , а по миллиамперметру 2 измерять соответствующие значения анодного тока $I_{ан}$. Первые пять-шесть значений тока соленоида I_c от нуля устанавливать через $\sim 20\text{--}25$ мА, а, начиная с того момента, как анодный ток начнёт резко падать, – через ~ 5 мА до максимально возможного тока.

5. Выключить питание установки.

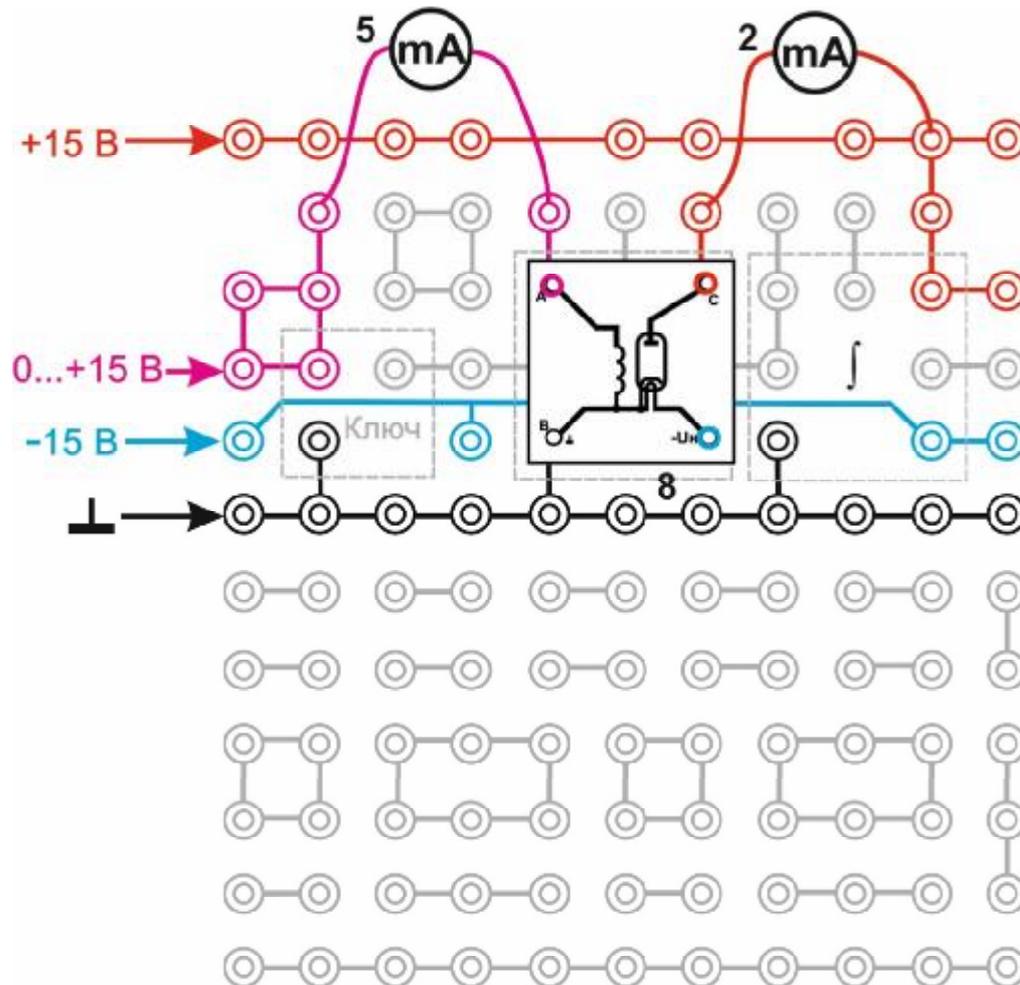


Рис. 6.7. Монтажная схема:
обозначения 2, 5, 8 – см. рис. 6.5

Обработка результатов измерений

1. Найти приращение тока в соленоиде и модуль приращения анодного тока по формулам:

$$\Delta I_{c i} = I_{c i+1} - I_{c i-1}, \quad \Delta I_{ан i} = \left| I_{ан i+1} - I_{ан i-1} \right|, \quad (6.11)$$

здесь $i = 2, 3, \dots, n-1$ – номер измерения по таблице. Вычислить величину производной функции $\Delta I_{\text{ан } i} / \Delta I_{\text{с } i}$. Результаты записать в таблицу. Для первого и последнего столбца значения производной оценивать не нужно.

2. По данным этой таблицы, соблюдая указанный масштаб, построить график зависимости $I_{\text{ан}} = f(I_{\text{с}})$. На этом же графике, изменив масштаб по оси ординат, построить зависимость $\Delta I_{\text{ан}} / \Delta I_{\text{с}} = g(I_{\text{с}})$. По положению максимума на графике производной определить значение критического тока соленоида $I_{\text{с.кр}}$ (рис. 6.4).

3. По экспериментальным данным и найденному значению $I_{\text{с.кр}}$, а также по формуле (6.10) вычислить удельный заряд электрона. Единицы измерения всех величин в этой формуле должны быть взяты в системе СИ.

4. Сравнить полученное значение с табличным $\left(\frac{e}{m_e}\right)_{\text{таб}} = 1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг.

Определить, на сколько процентов полученное значение удельного заряда отличается от табличного.

Контрольные вопросы

1. Запишите формулы для сил \vec{F}_e и \vec{F}_m , действующих на заряженную частицу в электрическом и магнитном полях.
2. Какие уравнения необходимо использовать для определения:
 - а) скорости заряженной частицы, приобретенной в электрическом поле,
 - б) радиуса кривизны траектории электрона в магнитном поле?
3. Покажите на рисунке направление сил \vec{F}_e и \vec{F}_m , действующих в магнетроне на электрон, движущийся от катода к аноду.
4. Как и почему изменяются при этом движении модули сил F_e и F_m ?
5. От чего зависят вектор и модуль скорости движения электрона в магнетроне?
6. Покажите на рисунке направление векторов \vec{E} и \vec{B} в магнетроне.
7. От чего зависят форма траектории электрона в магнетроне и значение критической индукции $B_{\text{кр}}$?
8. Покажите на рисунке форму траектории электрона в магнетроне при различных значениях магнитной индукции ($B < B_{\text{кр}}$; $B = B_{\text{кр}}$; $B > B_{\text{кр}}$).
9. От каких величин зависит значение анодного тока магнетрона?
10. Какие уравнения используют при выводе расчетной формулы для определения удельного заряда электрона?
11. Объясните форму и укажите назначение графиков $I_{\text{ан}} = f(I_{\text{с}})$ и $(\Delta I_{\text{ан}} / \Delta I_{\text{с}}) = f(I_{\text{с}})$.
12. Укажите способ определения критического тока по этим графикам.

Лабораторная работа Э-7

ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Цель работы: ознакомиться с явлением Холла, определить постоянную Холла и концентрацию носителей тока в полупроводнике.

Рассмотрим пластинку из однородного проводника (или полупроводника), к торцам которой припаяно четыре контакта (рис. 7.1). Если пластинку поместить в магнитное поле, вектор индукции \vec{B} которого перпендикулярен пластинке, то при пропускании тока I в направлении 1–2 между контактами 3–4 возникает разность потенциалов $U_{\text{холл}}$. Это явление получило название **эффекта Холла**. Он был открыт в 1879 г. американским физиком Э.Г. Холлом.

Эффект Холла можно объяснить следующим образом. Пусть ток I в пластинке обусловлен движением частиц – носителей положительных зарядов Q . Если их концентрация n , а $\langle \vec{v} \rangle$ – средняя скорость их упорядоченного движения, то сила тока

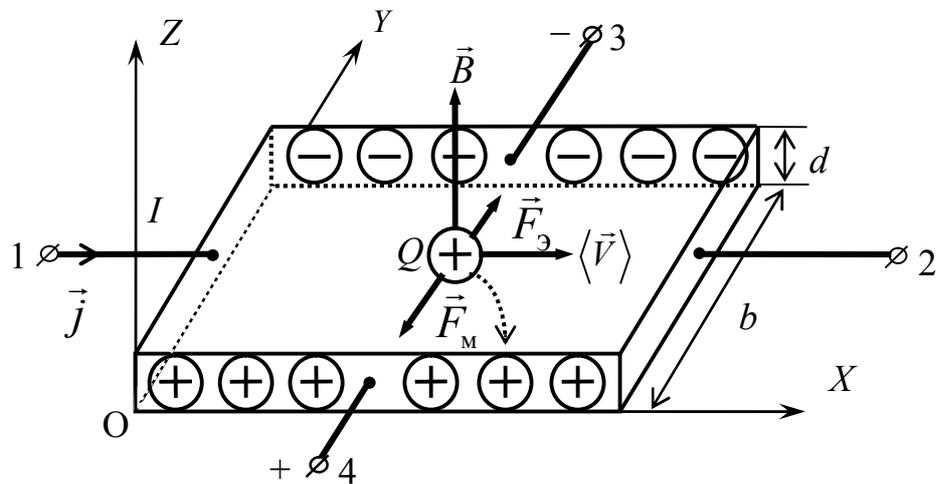


Рис. 7.1. Эффект Холла

$$I = jS = Q \langle V_x \rangle nbd, \quad (7.1)$$

где j – плотность тока, $S = bd$ – площадь поперечного сечения пластинки, $\langle V_x \rangle$ – проекция вектора $\langle \vec{v} \rangle$ на направление вектора \vec{j} (на ось OX).

На заряженную частицу Q , движущуюся со скоростью \vec{V} в магнитном поле с индукцией \vec{B} , действует магнитная составляющая силы Лоренца

$$\vec{F}_M = Q[\vec{V}, \vec{B}]. \quad (7.2)$$

Эта сила будет отклонять заряды к одному из торцов пластинки. В результате на этом торце окажется избыток зарядов, а на противоположном – недостаток. По этой причине в пластинке возникает электрическое поле, вектор напряжённости которого \vec{E} направлен по оси OY. Сила, действующая на заряд Q со стороны этого поля (электрическая составляющая силы Лоренца)

$$\vec{F}_3 = Q \cdot \vec{E} \quad (7.3)$$

будет направлена противоположно силе \vec{F}_M . Разделение зарядов прекратится, когда средняя сила Лоренца, действующая на все заряды будет равна нулю:

$$Q \cdot \vec{E} + Q \left[\langle \vec{V} \rangle, \vec{B} \right] = 0. \quad (7.4)$$

Из этого уравнения находим напряжённость установившегося электрического поля

$$\vec{E} = - \left[\langle \vec{V} \rangle, \vec{B} \right]. \quad (7.5)$$

Спроецируем вектор напряжённости \vec{E} на ось OY

$$E_y = - \langle V_x \rangle \cdot B. \quad (7.6)$$

Тогда разность потенциалов между точками 3 и 4 определится как

$$\varphi_3 - \varphi_4 = - \int_0^b E_y dy = \langle v_x \rangle B b. \quad (7.7)$$

Подставляя вместо $\langle v_x \rangle$ её значение из (7.1) и, обозначая $\varphi_3 - \varphi_4 = U_{\text{холл}}$, получим

$$U_{\text{холл}} = \frac{I}{Qnd} \cdot B = R_{\text{холл}} \cdot \frac{I}{d} \cdot B, \quad (7.8)$$

где $\frac{1}{Qn} = R_{\text{холл}}$ – величина, которая называется *постоянной Холла*.

Более строгая теория, учитывающая взаимодействие носителей тока с кристаллической решеткой, дает следующее значение постоянной Холла

$$R_{\text{холл}} = \frac{r}{Qn}, \quad n = \frac{r}{QR_{\text{холл}}}, \quad (7.9)$$

где r – параметр, называемый Холл-фактором. Он зависит от магнитного поля, температуры, свойств материала образца и всегда больше единицы. Например, для германия при комнатной температуре $r = 3\pi/8$, $Q = e$ – элементарный заряд.

Из последней формулы следует, что знак постоянной Холла определяется знаком носителей заряда. Для металлов и полупроводников с электронной проводимостью (n -типа) $R_{\text{холл}} < 0$, а для полупроводников с дырочной проводимостью (p -типа) $R_{\text{холл}} > 0$.

Описание метода исследования

Холловское напряжение $U_{\text{холл}}$, согласно формуле (7.8), линейно зависит от магнитной индукции B и от протекающего в образце тока I . Если опытным путём получить эти зависимости, то по угловому коэффициенту экспериментальной прямой k можно определить постоянную Холла $R_{\text{холл}}$. Действительно, так как

$$U_{\text{холл}} = R_{\text{холл}} \cdot \frac{I}{d} \cdot B = k \cdot B, \quad (7.10)$$

то величина углового коэффициента

$$k = R_{\text{холл}} \cdot \frac{I}{d}. \quad (7.11)$$

Отсюда, для постоянной Холла получаем

$$R_{\text{холл}} = k \cdot \frac{d}{I}. \quad (7.12)$$

В качестве источника постоянного магнитного поля используют электромагнит. Величина индукции магнитного поля B в зазоре сердечника электромагнита нелинейно зависит от намагничивающего тока $I_{\text{эм}}$ в его обмотке. Однако на кривой намагничивания сердечника можно выделить практически линейный участок, для которого будет справедлива формула

$$B = \mu_0 I_{\text{эм}} \frac{N}{h}, \quad (7.13)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; N – число витков электромагнита; h – величина воздушного зазора сердечника электромагнита.

При проведении эксперимента задача измерения $U_{\text{холл}}$ осложняется тем, что контакты 3–4 на образце (рис. 7.1) могут быть установлены с некоторым смещением относительно друг друга. В этом случае напряжение между ними будет обусловлено не только эффектом Холла, но и омическим падением напряжения $U_{\text{ом}}$, вследствие протекания основного тока через образец. Поэтому измерения $U_{\text{холл}}$ при каждом значении тока следует проводить для двух противоположных направлений вектора индукции магнитного поля. Тогда холловское напряжение будет менять знак, а омическое напряжение будет оставаться постоянным. При одном направлении магнитного поля измеряемая разность потенциалов

$$U \uparrow = U_{\text{ом}} - U_{\text{холл}}, \quad (7.14)$$

а при другом его направлении

$$U \downarrow = U_{\text{ом}} + U_{\text{холл}}, \quad (7.15)$$

Исключая из этих двух уравнений неизвестную величину $U_{\text{ом}}$, получаем

$$U_{\text{холл}} = \left| \frac{U \uparrow - U \downarrow}{2} \right|. \quad (7.16)$$

Описание установки

Оборудование: генератор постоянного напряжения, миниблок «Эффект Холла», мультиметры.

Электрическая схема установки приведена на рис. 7.2, монтажная – на рис. 7.4. Исследуемый образец (Д) представляет собой пластинку из германия – полупроводник с дырочной проводимостью. Он подсоединён к источнику постоянного напряжения 4 и помещён в зазор сердечника электромагнита 6. Обмотка электромагнита через переключатель 8 соединена с регулируемым источником постоянного напряжения 10. С помощью переключателя можно изменять направление тока в обмотке электромагнита, а значит и направление вектора индукции магнитного поля в зазоре сердечника. Напряжение Холла измеряют цифровым вольтметром 5.

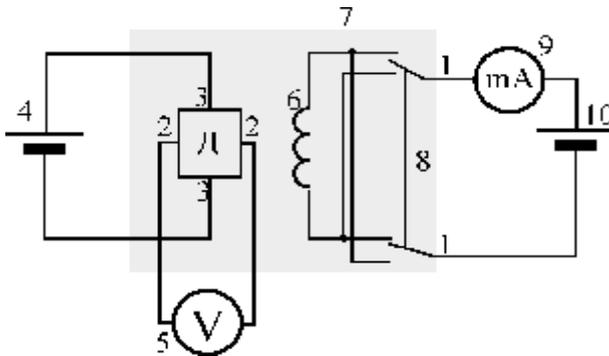


Рис. 7.2. Электрическая схема:
 (1–1) цепь питания электромагнита 6:
 регулируемый источник постоянного напряжения 10, переключатель 8, мультиметр 9;
 (2–2) – цепь измерения напряжения Холла мультиметром 5;
 (3–3) – цепь питания образца Д:
 4 – источник постоянного напряжения «+15 В»;
 7 – миниблок «Эффект Холла» (рис. 7.3)

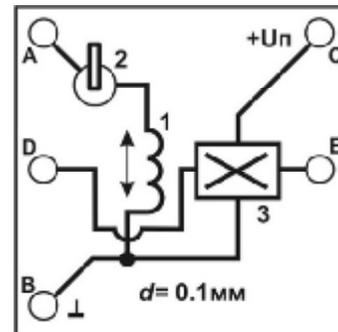


Рис. 7.3. Миниблок «Эффект Холла»:
 1 – электромагнит,
 2 – переключатель направления тока в обмотке электромагнита,
 3 – датчик Холла

Выполнение работы

1. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведенной на рис. 7.4. Диапазоны измерений установить самостоятельно.

2. Включить питание блока генераторов напряжения и измерительного блока. Определить рабочий ток датчика Холла.

3. Кнопкой Δ «Установка напряжения 0 ... 15 В» установить ток $I_{ЭМ}$ примерно 5 мА. Тумблер на миниблоке установить вверх. Измерить напряжение $U \uparrow$. Изменить направление тока (тумблер установить вниз) и измерить напряжение $U \downarrow$. Результаты записать в таблицу.

4. Увеличивая ток $I_{ЭМ}$ примерно на 3–5 мА, провести ещё не менее 9 измерений напряжений $U \uparrow$ и $U \downarrow$. Максимальный ток $I_{ЭМ}$ не должен превышать 50 мА. Результаты записать в таблицу. Отмечать в процессе увеличения магнитного поля, как изменяется рабочий ток датчика Холла (магнито-резистивный эффект).

5. Нажать кнопку «Исходная установка» и выключить питание установки.

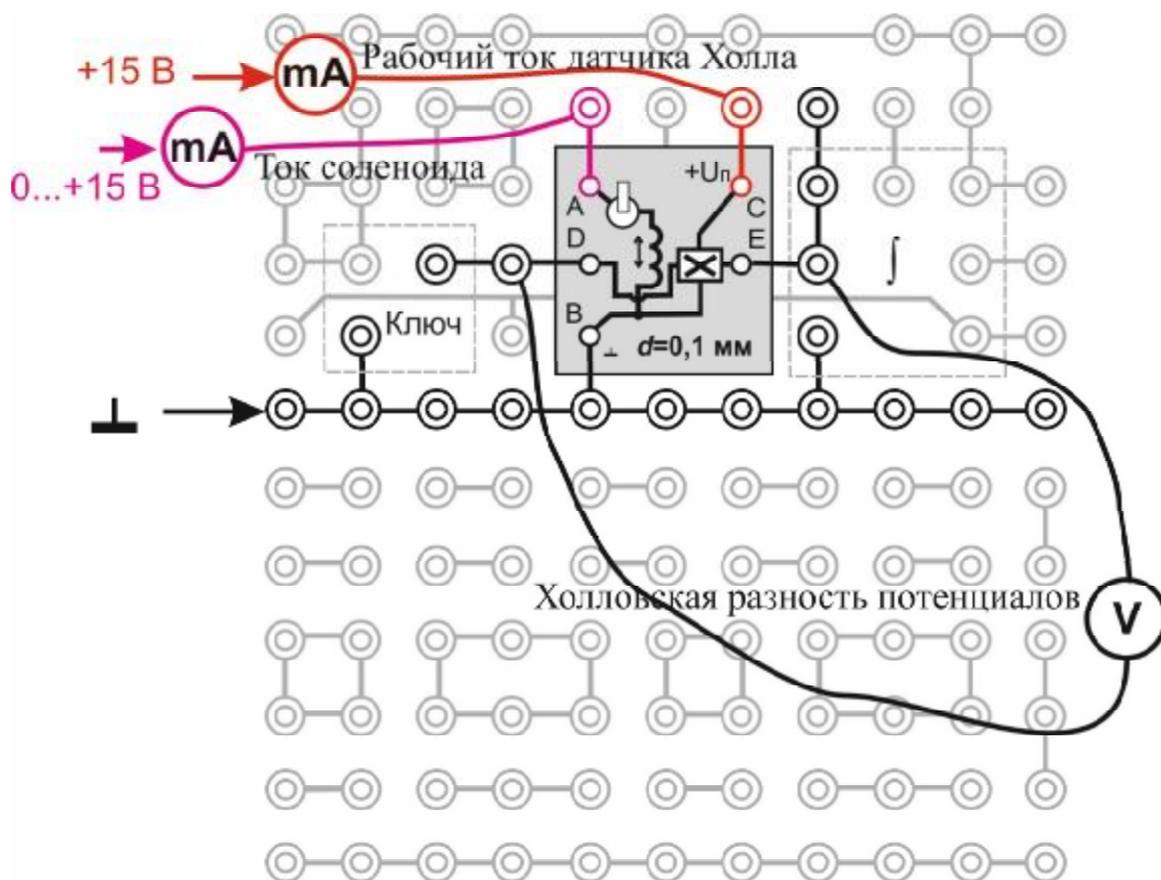


Рис. 7.4. Монтажная схема

Обработка результатов измерений

1. По формуле (7.13) рассчитать значения магнитной индукции B для каждого значения $I_{\text{эм}}$.
2. По формуле (7.16) для каждого значения B вычислить холловское напряжение $U_{\text{холл}}$.
3. Построить график зависимости $U_{\text{холл}} = f(B)$. Для этого на графике отложить экспериментальные точки и провести по ним наилучшую прямую.
4. Рассчитать угловой коэффициент k этой прямой и графически оценить его погрешность.
5. По формуле (7.12) рассчитать среднее значение постоянной Холла для исследуемого полупроводника.
6. Вычислить концентрацию носителей тока n в исследуемом полупроводнике по формуле (7.9).

Контрольные вопросы

1. В чем заключается эффект Холла?
2. Укажите причину появления напряжения Холла.
3. Как направлена сила Лоренца, действующая на движущийся электрон?
4. Покажите на рисунке направление векторов \vec{E} и \vec{B} для электрического и магнитного полей в пластинке полупроводника при наблюдении эффекта Холла.
5. Между какими гранями пластинки появляется напряжение Холла? Укажите положение граней по отношению к току I и магнитному полю \vec{B} .
6. Для измерения каких величин используют в данной работе:
 - а) миллиамперметр, б) цифровой вольтметр?
7. Какие величины и параметры явления Холла изменятся, если изменить:
 - а) величину и направление рабочего тока датчика,
 - б) величину и направление тока в обмотке электромагнита?

Лабораторная работа Э-8

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНЕТИКА С ПОМОЩЬЮ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА

Цель работы: определение основных характеристик ферромагнетика по предельной петле гистерезиса, снятие основной кривой намагничивания, оценка погрешностей измерений.

По отношению к воздействию магнитного поля все вещества делятся на диамагнетики (вода, стекло, кварц), парамагнетики (воздух, алюминий, вольфрам, платина) и ферромагнетики (железо, никель и их многочисленные сплавы, а также соединения). Диамагнетики ослабляют внешнее магнитное поле, а парамагнетики незначительно усиливают его. Ферромагнетики многократно усиливают внешнее магнитное поле, т.е. имеют большую магнитную проницаемость μ . Ферромагнетики – это кристаллические вещества, в которых магнитные моменты атомов и ионов находятся в состоянии самопроизвольного магнитного упорядочения, причём результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля [2].

Магнитный гистерезис

Ферромагнетики обладают особыми магнитными свойствами благодаря обменному взаимодействию между атомами, в результате которого возникают области, имеющие пространственно однородное упорядочение магнитных моментов – домены. В пределах каждого домена ферромагнетик намагничен до насыщения. Направления магнитных моментов для различных доменов различны, так что в отсутствии намагничивающего поля суммарный момент всего ферромагнетика равен нулю, а значит и средняя индукция B также равна нулю (рис. 8.1, а). При включении намагничивающего поля энергия доменов оказывается неодинаковой. Она меньше для тех доменов, у которых вектор магнитного момента образует с направлением намагничивающего поля острый угол, и больше в том случае, когда этот угол тупой. Поэтому возникают смещения границ доменов, в результате чего за счёт энергетически невыгодных доменов происходит увеличение объёма доменов с благоприятной ориентацией магнитных моментов.

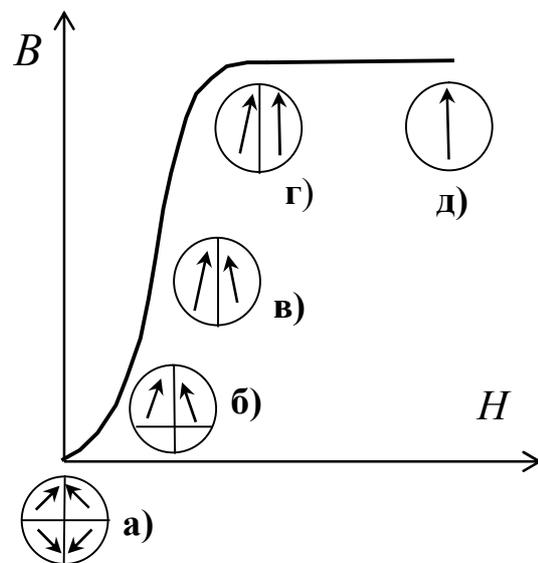


Рис. 8.1. Кривая намагничивания

Пока намагничивающее поле невелико, смещение границ доменов обратимо и точно следует за изменением поля (рис. 8.1, б). При увеличении поля смещение границ доменов становится необратимым, и энергетически невыгодны домены исчезают (рис. 8.1, в). Если поле увеличивать ещё, то происходит поворот магнитных моментов доменов (рис. 8.1, г). Наконец, в очень сильных полях магнитные моменты всех доменов устанавливаются параллельно намагничивающему полю, ферромагнетик намагничивается до насыщения (рис. 8.1, д).

Если размагниченный образец намагнитить до насыщения (т. 1 на рис. 8.2), а затем уменьшать напряжённость H намагничивающего поля, то уменьшение индукции B в ферромагнетике будет происходить не по первоначальной кривой 0–1, а по кривой 1–2. В результате, когда H станет равной нулю, ферромагнетик сохраняет свою намагниченность, и индукция в нём равна $B_{\text{ост}}$ (*остаточная индукция*). Для дальнейшего размагничивания надо изменить направление \vec{H} на противоположное. Уменьшение B пойдёт по кривой 2–3, и при некотором значении $H_{\text{коэр}}$ намагниченность ферромагнетика станет равной нулю. Величину $H_{\text{коэр}}$ называют *коэрцитивной силой*.

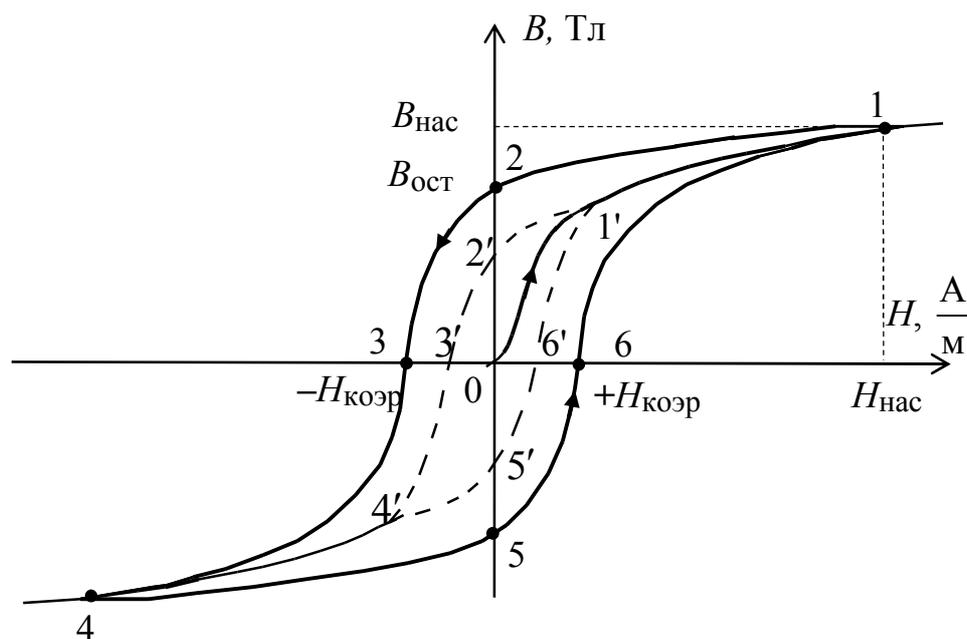


Рис. 8.2. Магнитный гистерезис

Увеличение H в том же направлении вновь приведёт к насыщению образца (т. 4 на рис. 8.2). При последующем изменении H в обратном направлении индукция B будет изменяться в соответствии с кривой 4–5–6–1. В результате получится петлеобразная кривая 1–2–3–4–5–6–1.

Таким образом, значение индукции B в ферромагнетике определяется не только полем H , но ещё и зависит от предыдущих состояний намагничивания, причём происходит отставание изменений индукции от изменения напряжённости. Это явление называется *магнитным гистерезисом*, а петлеобразная кривая – *петлей гистерезиса*. Она будет предельной, если намагниченность ферромагнетика достигает насыщения (кривая 1–2–3–4–5–6–1), и будет называться частным циклом, если насыщение не наступило (кривая 1'–2'–3'–4'–5'–6'–1'). Частных циклов существует бесконечное множество, все они лежат внутри предельной петли гистерезиса. Верхняя точка каждого частного цикла всегда находится на технической кривой намагничивания.

Если образец предварительно был размагничен, то при его намагничивании зависимость B от H изображается кривой 0–1 и называется *основной кривой намагничивания*. При уменьшении напряжённости поля H (кривая 1–2) изменение магнитной индукции B в ферромагнетике будет отставать от изменения H (магнитный гистерезис). Нелинейная зависимость B от H приводит к тому, что магнитная проницаемость ферромагнетиков также зависит от напряжённости магнитного поля H (рис. 8.3).

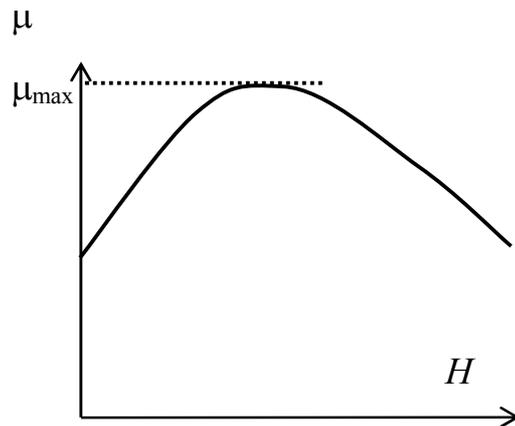


Рис. 8.3. Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от напряжённости поля

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \quad (8.1)$$

С увеличением H она сначала быстро возрастает, достигая максимума μ_{\max} , затем уменьшается. Следует заметить, что максимальное значение проницаемости достигается несколько раньше, чем насыщение ферромагнетика.

Описание метода исследования

Исследовать основные свойства ферромагнетика можно с помощью предельной петли магнитного гистерезиса. Получить и наблюдать на экране осциллографа петлю гистерезиса можно с помощью электрической схемы, которая приведена на рис. 8.4.

На ферромагнитный образец, выполненный в виде тороида, равномерно намотаны две обмотки с числом витков N_1 и N_2 . Через сопротивление R_1 на первичную обмотку подается от блока питания (БП) переменное напряжение. Напряжённость намагничивающего поля в тороиде будет определяться током I_1 , протекающим через обмотку:

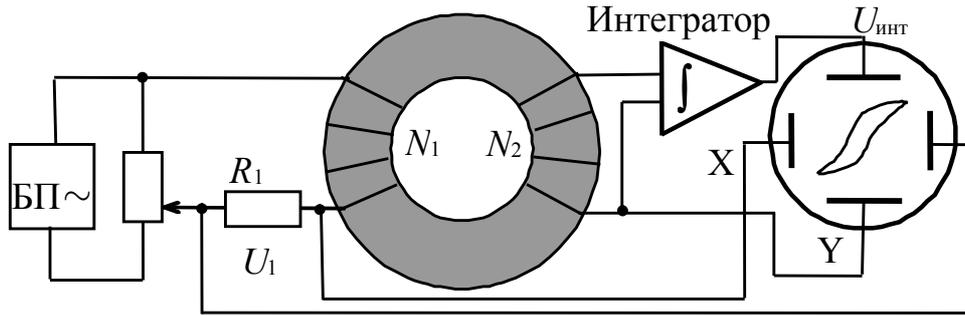


Рис. 8.4. Схема установки

$$H = \frac{I_1 N_1}{l} = n_1 I_1, \quad n_1 = \frac{N_1}{l}, \quad (8.2)$$

где l – длина осевой линии тороида, n_1 – число витков на единицу длины осевой линии. Величину тока в первичной обмотке можно найти из формулы, определяющей падение напряжения на резисторе R_1

$$I_1 = U_1 / R_1. \quad (8.3)$$

Тогда напряжённость магнитного поля будет равна

$$H = \frac{N_1}{l R_1} U_1 = n_1 \frac{U_1}{R_1}. \quad (8.4)$$

При изменении магнитного поля, созданного первичной обмоткой, во вторичной возникает ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi}{dt} N_2, \quad (8.5)$$

и индукционный ток

$$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R_2} = \frac{d\Phi}{R_2 dt} N_2 = \frac{dB}{dt} \cdot \frac{N_2 S}{R_2}, \quad (8.6)$$

где R_2 – сопротивление цепи вторичной обмотки, $\Phi = BS$ – магнитный поток через один виток тороида; B – индукция магнитного поля в тороиде; N_2 – число витков вторичной обмотки; S – площадь поперечного сечения сердечника.

В результате протекания индукционного тока в цепи вторичной обмотки на интеграторе накапливается заряд

$$Q = \int_0^t I_i dt = \frac{N_2 S}{R_2} \int_0^B dB = \frac{N_2 S}{R_2} B. \quad (8.7)$$

Напряжение $U_2 = U_{\text{инт}}$ на выходе интегратора пропорционально прошедшему через него заряду, а значит и индукции магнитного поля

$U_{\text{инт}} = \frac{Q}{b} = \frac{N_2 S}{b R_2} B$, откуда следует:

$$B = \frac{b R_2}{N_2 S} \cdot U_{\text{инт}} = k \cdot U_{\text{инт}}, \quad k = \frac{b R_2}{N_2 S}, \quad (8.8)$$

где b – градуировочная постоянная интегратора, k – постоянная установки.

Из уравнений (8.4) и (8.8) видно, что если напряжение U_1 подать на вход горизонтальной развертки осциллографа, а напряжение $U_{\text{инт}}$ – на вход вертикальной развёртки, то электронный луч в горизонтальном направлении будет отклоняться пропорционально напряжённости H , а в вертикальном – пропорционально индукции B . За один период синусоидального изменения тока след электронного луча на экране опишет полную петлю гистерезиса, а за каждый последующий период в точности повторит её. Поэтому на экране будет наблюдаться неподвижная петля гистерезиса.

Описание установки

Оборудование: генератор сигналов специальной формы (ГССФ), мини-блоки «Интегратор тока», «Ферромагнетик», мультиметры, осциллограф.

Миниблок «Интегратор» (рис. 8.5) предназначен для преобразования электрического заряда, протекающего в электрической цепи, в напряжение $U_{\text{инт}}$. В случае если накопленный заряд превышает допустимый уровень, загорается индикатор 1 «Перегрузка». Для сброса заряда, накопленного интегратором, тумблер 4 надо перевести в положение «Сброс». Питание интегратора осуществляется от нерегулируемого источника стабилизированных постоянных напряжений «+15 В» и «-15 В».

Миниблок «Ферромагнетик» (рис. 8.6) предназначен для изучения магнитных свойств ферромагнетика. На рис. 8.7 приведена электрическая схема установки. В миниблоке «Ферромагнетик» 5 первичная N_1 и вторичная N_2 обмотки намотаны на кольцевой ферромагнитный сердечник 4. Для намагничивания феррита первичную обмотку N_1 подключают к выходу генератора сигналов специальной формы 1, в котором выбран режим синусоидального напряжения. Напряжение U_x , снимаемое с сопротивления R_1 (пропорциональное напряжённости магнитного поля H), подается на вход горизонтальной развертки осциллографа. Вторичная обмотка подключается к входу интегратора тока 7. Напряжение с выхода интегратора U_y (пропорциональное индукции магнитного поля B), подаётся на вход вертикальной развёртки осциллографа. Одновременно это же напряжение измеряется вольтметром 9. Амплитудные значения напряжённости намагничивающего поля и магнитной индукции в ферромагнетике рассчитываются по формулам:

$$H = n_1 I_1 \sqrt{2}, \quad (8.9)$$

$$B = k U_{\text{инт}} \sqrt{2}, \quad (8.10)$$

где I_1 и $U_{\text{инт}}$ – действующие значения тока и напряжения, регистрируемые амперметром и вольтметром.

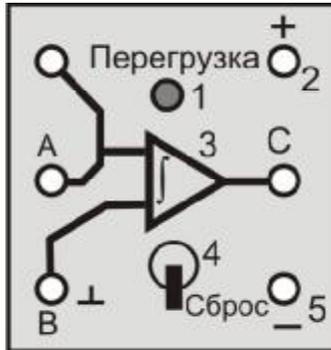


Рис. 8.5. Миниблок «Интегратор тока».
1 – индикатор перегрузки;
2 – питание интегратора «+15 В»;
3 – интегратор;
4 – демпферный ключ;
5 – питание интегратора «-15 В»;
А – вход интегратора;
С – выход на вольтметр

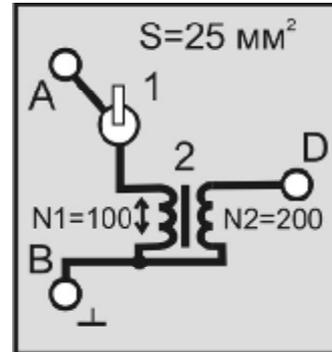


Рис. 8.6. Миниблок «Ферромагнетик»:
1 – переключатель направления тока в первичной обмотке;
2 – кольцевой ферромагнитный сердечник с первичной обмоткой N_1 (выводы АВ) и вторичной обмоткой N_2 (выводы ВД)

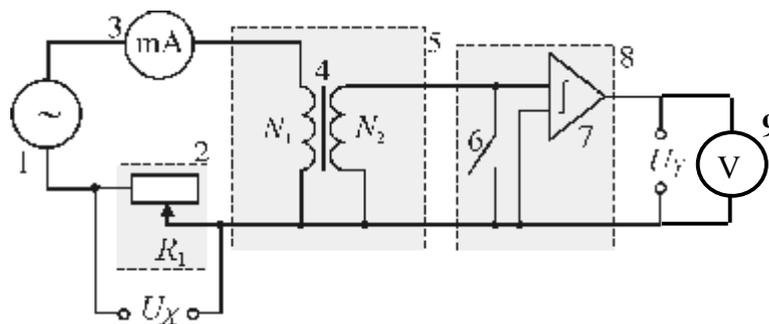


Рис. 8.7. Электрическая схема установки
1 – ГССФ, 2 – миниблок «Сопротивление» 100 Ом,
3 – миллиамперметр, 5 – миниблок «Ферромагнетик»,
8 – миниблок «Интегратор тока», U_X , U_Y – напряжения, подаваемые на входы X и Y осциллографа; 9 – вольтметр

Выполнение работы

1. Собрать цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 8.8. Записать параметры миниблока. Контакты осциллографа подключить к контактам вольтметров V1 (U_X) – горизонтальная ось и V2 (U_Y) – вертикальная ось.

2. Установить в положение «Сброс» демпферный ключ миниблока «Интегратор тока». Включить питание установки. Установить режим синусоидального напряжения. Частота около 0,5 кГц (подобрать самостоятельно).

3. Включить осциллограф в режиме X-Y. Луч на экране должен быть в центре.

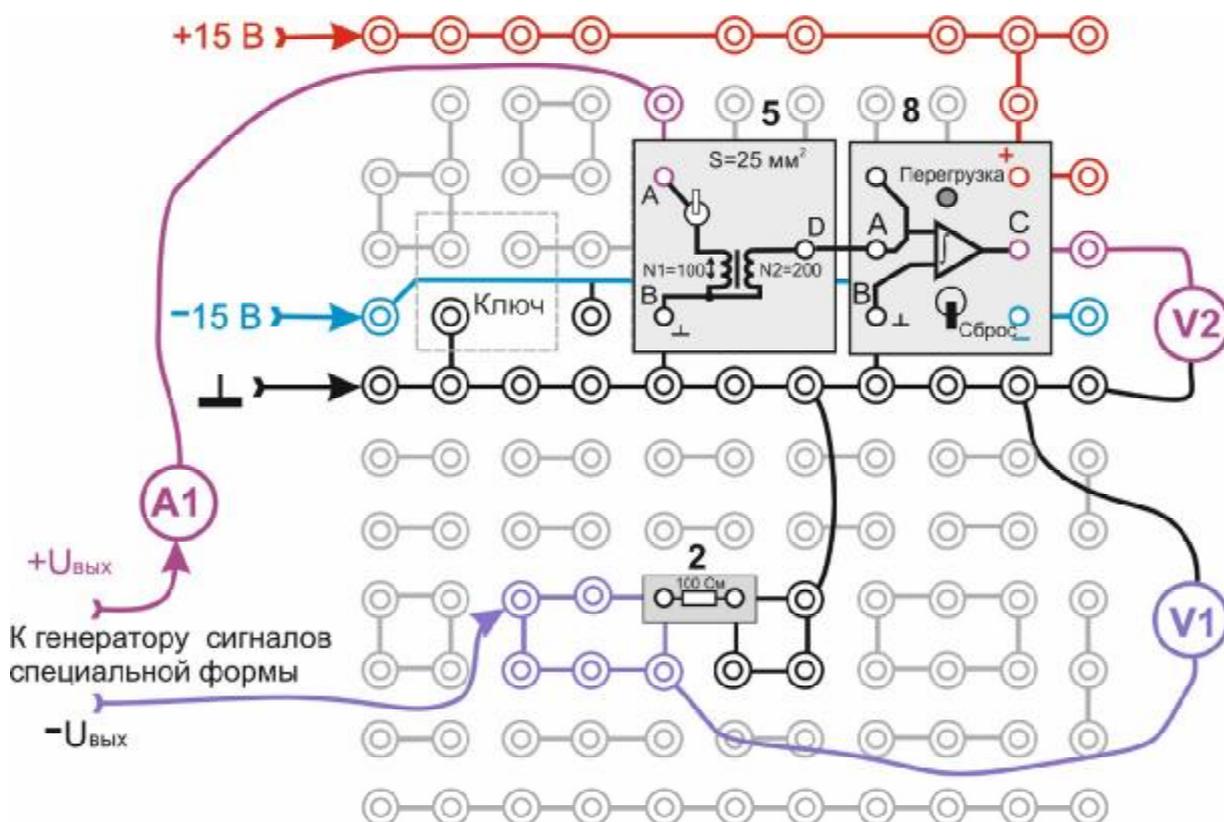


Рис. 8.8. Монтажная схема

I этап. Изучение предельной петли гистерезиса

4. Подать переменный синусоидальный ток I_1 в первичную обмотку и увеличивать его до получения на экране осциллографа изображения *предельной* петли гистерезиса. Петля считается предельной, если у неё появляются «усы» (рис. 8.2) и рост тока не приводит к увеличению её площади. Настроить усиление каналов, чтобы предельная петля гистерезиса не выходила за пределы экрана виртуального осциллографа. Записать ток $I_1^{\text{пред}}$ и напряжение $U_{\text{инт}}^{\text{пред}}$.

5. Зафиксировать петлю гистерезиса. Зафиксировать петлю можно сделать двумя способами:

А) зарисовать вручную на клетчатой или миллиметровой бумаге. *Запрещается приставлять бумагу к экрану!*

Б) Сфотографировать с экрана осциллографа.

Кроме того, с помощью портативного осциллографа можно измерить все параметры петли гистерезиса. Инструкция по работе с портативным осциллографом прилагается отдельно.

II этап. Измерение кривой намагничивания

6. Размагнитить образец. Для этого, постепенно уменьшая ток I_1 , довести его до нуля. При этом площадь петли уменьшится до размеров точки. Фон лучше сделать чёрным.

7. Устанавливая последовательно значения тока I_1 от 0 до 25 мА с шагом примерно 2-3 мА, а при токах более 25 мА с шагом примерно 5-10 мА до максимально возможного значения, получить на экране осциллографа ряд частных циклов. Последнее значение I_1 должно быть больше $I_1^{\text{пред}}$. Для каждого значения I_1 измерить величину напряжения $U_{\text{инт}}$.

8. Нажать кнопку «Исходная установка» и выключить питание стенда. Разобрать электрическую цепь установки.

Обработка результатов измерений

1. По рисунку или фотографии измерить координаты точек предельной петли $x_{\text{нас}}$, $x_{\text{коэр}}$, $y_{\text{нас}}$, $y_{\text{ост}}$, соответствующие значениям $H_{\text{нас}}$, $H_{\text{коэр}}$, $B_{\text{нас}}$, $B_{\text{ост}}$ (рис. 8.9).

2. Подставить значения $I_1^{\text{пред}}$ и $U_{\text{инт}}^{\text{пред}}$ в формулы (8.9) и (8.10) и рассчитать $B_{\text{нас}}$ и $H_{\text{нас}}$. Коэрцитивную силу $H_{\text{коэр}}$ и остаточную индукцию $B_{\text{ост}}$ рассчитать по формулам:

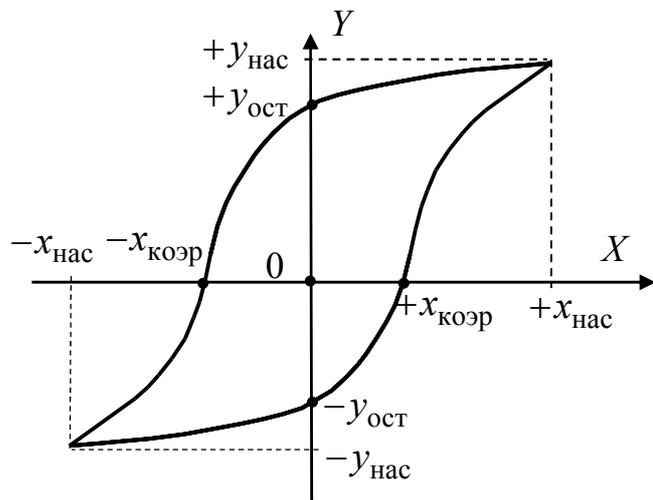


Рис. 8.9. Предельная петля гистерезиса

$$H_{\text{коэр}} = H_{\text{нас}} \frac{x_{\text{к}}}{x_{\text{нас}}}, \quad B_{\text{ост}} = B_{\text{нас}} \frac{y_{\text{ост}}}{y_{\text{нас}}}. \quad (8.11)$$

2. По формулам (8.9), (8.10) и (8.1) рассчитать H , B , μ для измеренных значений тока I_1 и напряжений $U_{\text{инт}}$. Оценить погрешности измерений.

3. Построить графики зависимостей $B = f(H)$ и $\mu = g(H)$.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие основной кривой намагничивания от петли гистерезиса?

2. Назовите характерные свойства ферромагнетиков и особенности их намагничивания.

3. Опишите изменения доменной структуры ферромагнетика в процессе его намагничивания (по мере роста напряжённости поля H).

4. От каких величин зависит:

а) напряжённость H магнитного поля тороида,

б) магнитная индукция B тороида с ферромагнитным сердечником,

в) магнитная проницаемость μ материала сердечника тороида?

5. Какие измеряемые величины, и какие формулы используют для определения следующих величин:

а) напряжённости H магнитного поля в сердечнике,

б) магнитной индукции B ,

в) магнитной проницаемости μ материала сердечника?

6. Укажите способ включения и назначение следующих элементов:

а) сопротивления R_1 в цепи первичной обмотки,

б) интегратора тока в цепи вторичной обмотки.

7. Назовите величины, пропорционально которым изменяются значения напряжений U_x и U_y (на входах X и Y осциллографа).

8. Найдите характерные точки петли гистерезиса, координаты которых используют:

а) для определения параметров ферромагнетика $H_{\text{коэрц}}$, $B_{\text{ост}}$, $H_{\text{нас}}$ и $B_{\text{нас}}$,

б) для построения основной кривой намагничивания $B(H)$?

9. По каким формулам в работе определяют следующие величины:

а) остаточной индукции $B_{\text{ост}}$,

б) коэрцитивной силы $H_{\text{коэр}}$,

в) магнитной проницаемости сердечника μ ?

Лабораторная работа Э-9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИ ФЕРРОМАГНЕТИКА МЕТОДОМ СТОЛЕТОВА

Цель работы: построение основной кривой намагничивания и графика зависимости магнитной проницаемости от напряжённости магнитного поля ферромагнетика методом А.Г. Столетова.

Основные понятия теории ферромагнетизма даны в лабораторной работе Э-8.

Описание метода исследования

Впервые полное экспериментальное исследование кривой намагничивания $B = f(H)$ проведено в 1871–1872 гг. профессором Московского университета А.Г. Столетовым. Он показал также, что напряжённость поля внутри ферромагнетика сильно зависит от формы образца и только в случае тороидального (кольцевого) образца, намагничиваемого кольцевой обмоткой, она совпадает с напряжённостью внешнего магнитного поля.

В данной работе для получения основной кривой намагничивания используют метод, предложенный А.Г. Столетовым. Он заключается в следующем. На кольцо из ферромагнитного материала располагают две обмотки (рис. 9.1): первичная (намагничивающая) содержит N_1 витков, и вторичная (с числом витков N_2), предназначенная для измерения величины магнитной индукции B . Напряжённость магнитного поля, которое создаётся в кольцевом сердечнике при протекании по первичной обмотке тока I_1 , рассчитывается по формуле:

$$H = I_1 \frac{N_1}{l} = n_1 I_1, \quad (9.1)$$

где $n_1 = N_1/l$, l – длина средней осевой линии сердечника. Это поле намагничивает кольцо. Магнитный поток в сечении кольца площадью S

$$\Phi = BS.$$

При его изменении во вторичной обмотке возникает ЭДС индукции

$$\varepsilon_i = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

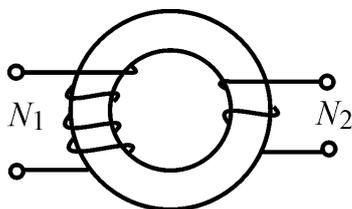


Рис. 9.1. Трансформатор

Изменение магнитного потока достигается изменением направления тока I_1 . При этом значение напряжённости поля H остается прежним, а изменяется лишь направление линий поля. В результате поток магнитной индукции изменяет от $+\Phi$ до $-\Phi$, а приращение потока

$$\Delta\Phi = -2 \cdot \Phi = -2BS. \quad (9.2)$$

Если цепь вторичной обмотки замкнуть, то в ней потечёт ток

$$I_2 = \frac{\varepsilon_i}{R} = -\frac{N_2}{R} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (9.3)$$

где R – сопротивление цепи вторичной обмотки. При протекании индукционного тока I_2 в этой цепи протекает заряд Q , величину которого можно рассчитать, используя формулы (9.2) и (9.3):

$$Q = \int_0^t I_2 dt = \int_{+\Phi}^{-\Phi} \left(-\frac{N_2}{R} \frac{d\Phi}{dt} \right) dt = -\frac{N_2}{R} \Delta\Phi = 2 \frac{N_2}{R} BS. \quad (9.4)$$

Выражая из этого равенства индукцию магнитного поля, получаем:

$$B = \frac{QR}{2N_2S}. \quad (9.5)$$

где R , N_2 и S – величины, постоянные для данной установки. Заряд Q измеряют интегратором тока, подключённым к вторичной обмотке. При этом величина заряда, прошедшего через интегратор, пропорциональна показанию вольтметра $U_{\text{инт}}$:

$$Q = b \cdot U_{\text{инт}}, \quad (9.6)$$

где b – постоянная интегратора, $U_{\text{инт}}$ – отсчёт по вольтметру. Используя выражения (9.4) и (9.5), можно получить расчётную формулу для индукции магнитного поля в исследуемом кольцевом сердечнике

$$B = \frac{bR}{2N_2S} \cdot U_{\text{инт}} = k \cdot U_{\text{инт}}, \quad k = \frac{bR}{2N_2S}. \quad (9.7)$$

Описание установки

Оборудование: источник постоянного тока, мультиметры, миниблоки «Ферромагнетик», «Интегратор тока», «Сопротивление» 100 Ом.

Электрическая схема установки показана на рис. 9.2. Первичная N_1 и вторичная N_2 обмотки намотаны на ферромагнитный кольцевой сердечник. Первичную обмотку используют для намагничивания ферромагнетика и по её параметрам определяют напряжённость H намагничивающего поля. Переключатель 4 служит для изменения направления тока в первичной обмотке с целью перемагничивания сердечника. Резистор R_0 ограничивает ток в цепи. Вторичная обмотка N_2 предназначена для определения индукции магнитного поля B в сердечнике. Интегратор тока 8 служит для измерения заряда Q , показываемого вольтметром 10 и пропорционального измеряемой величине B . Так как сердечник изготовлен из магнитомягкого ферромагнетика с малой величиной остаточной индукции $B_{\text{ост}}$, то для получения основной кривой намагничивания нет необходимости проводить предварительное размагничивание сердечника.

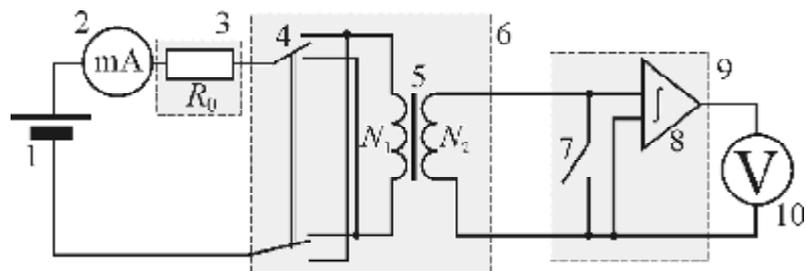


Рис. 9.2. Электрическая схема установки

- 1 – источник постоянного регулируемого напряжения 0...15 В,
 2 – амперметр, 3 – миниблок «Сопротивление» 100 Ом,
 4 – переключатель направления тока в первичной обмотке,
 5 – тороид с первичной N_1 и N_2 и вторичной обмотками,
 6 – миниблок «Ферромагнетик», 7 – демпферный ключ,
 8 – интегратор тока, 9 – миниблок «Интегратор тока»,
 10 – вольтметр

Выполнение работы

1. Собрать электрическую цепь установки по монтажной схеме, приведенной на рис. 9.3. Ключ 4 на миниблоке «Ферромагнетик» установить вниз.
2. Включить питание. Установить в первичной обмотке ток примерно 5 мА.
3. Разомкнуть демпфирующий ключ 7. Переключатель 4 перевести в **верхнее** положение, отмечая одновременно максимальное показание $U_{1 \text{ инт}}$ вольтметра. Записать его в таблицу. Перевести ключ 7 в положение «Сброс».
4. Разомкнуть демпфирующий ключ 7. Переключатель 4 перевести в **нижнее** положение, отмечая одновременно максимальное показание $U_{2 \text{ инт}}$ вольтметра. Записать его в таблицу. Перевести ключ 7 в положение «Сброс».
5. Последовательно задавая значения тока I_1 с шагом $(3 \pm 0,1)$ мА до 20 мА, а затем с шагом $(10 \pm 0,1)$ мА до 100 мА, измерить по пп. 3 и 4 для каждого тока максимальные показания вольтметра $U_{1 \text{ инт}}$ и $U_{2 \text{ инт}}$. Результаты занести в таблицу.
6. Выключить блок питания генераторов напряжений и мультиметры.

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать среднее арифметическое значение $U_{\text{инт}}$ модулей напряжений $|U_{1 \text{ инт}}|$ и $|U_{2 \text{ инт}}|$ для каждого тока I_1 .
2. Рассчитать константы n_1 и k , необходимые для вычислений величин H и B , используя значения параметров установки и исследуемого образца.

3. Для каждого значения тока рассчитать по формулам (9.1) и (9.6) величины H и B , а по формуле (8.1) магнитную проницаемость ферромагнетика.
4. Построить основную кривую намагничивания $B = f(H)$ и график зависимости $\mu = f(H)$.
5. Оценить погрешности измерений (см. Приложение).

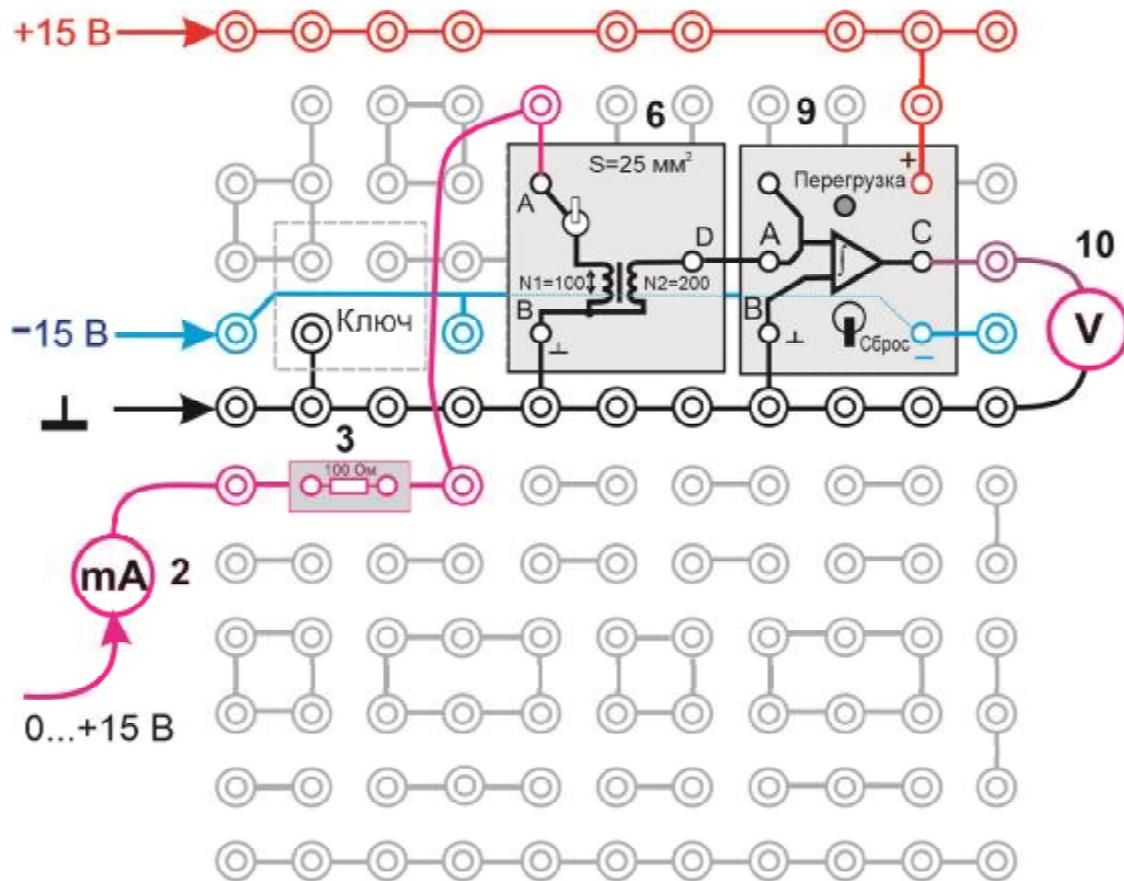


Рис. 9.3. Монтажная схема установки

2 – миллиамперметр, 3 – миниблок «Сопротивление» 100 Ом,
 6 – миниблок «Ферромагнетик», 9 – миниблок «Интегратор тока»,
 10 – вольтметр

Контрольные вопросы

1. В чём заключается особенность метода Столетова для исследования характеристик ферромагнетика по сравнению с методом петли гистерезиса?
2. Какие параметры вносят наибольшую погрешность в измерения?
3. Какие законы физики используются в этом методе?
4. Для какой цели в этой работе необходимо переключать направление магнитного поля в ферромагнетике?

Лабораторная работа Э-10

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРИМАГНЕТИКА

Цель работы: исследование зависимости магнитной проницаемости ферромагнетика от напряжённости магнитного поля, построение основной кривой намагничивания, определение намагничённости насыщения и магнитного момента кристаллической ячейки феррита.

По отношению к воздействию магнитного поля все вещества делятся на диамагнетики (вода, стекло, кварц), парамагнетики (воздух, алюминий, вольфрам, платина) и ферромагнетики (железо, никель и их многочисленные сплавы, а также соединения). Диамагнетики ослабляют внешнее магнитное поле, а парамагнетики незначительно усиливают его. Ферромагнетики многократно усиливают внешнее магнитное поле, т.е. имеют большую магнитную проницаемость μ . Ферромагнетики – это кристаллические вещества, в которых магнитные моменты атомов и ионов находятся в состоянии самопроизвольного магнитного упорядочения, причём результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля [2]. К этому классу веществ относятся также вещества, которые называются ферримагнетики или ферриты. Обычно, это сплав оксидов железа, никеля, марганца и других веществ, обладающий диэлектрическими свойствами. Поэтому такие вещества используются в качестве сердечников трансформаторов, т.к. в них не возникают токи Фуко при возникновении переменного магнитного поля от обмоток. Это существенно сокращает потери мощности электрического тока при трансформации.

Ферромагнетики – это вещества, обладающие особыми магнитными свойствами. К особым свойствам относится, в первую очередь, нелинейная зависимость индукции магнитного поля внутри ферромагнетика от напряжённости намагничивающего поля \vec{H} . Это значит, что магнитная проницаемость ферромагнетиков, характеризующая их магнитные свойства, также является функцией напряжённости магнитного поля.

Ферриты – это сложные системы окислов железа с окислами других металлов, чаще всего двухвалентных, это химические соединения типа $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Me – атом другого металла (железа, никеля, цинка, марганца и др.). Так как разные вещества имеют разное строение электронных оболочек, то атомные магнитные моменты их отличаются по величине и расположению в пространстве. Получается, что одинаково ориентированные атомные магнитные моменты образуют в кристаллической решётке вещества магнитную подрешётку. Если в кристалле имеются две магнитные подрешётки с равными и антипараллельными суммарными магнитными моментами, то кристалл антиферромагнитен.

Магнитные моменты подрешёток (одна подрешётка образована ионами железа, другая – также ионами железа с другой степенью окисления или ионами другого металла) могут быть взаимно не скомпенсированы, тогда кристалл ферримагнитен (рис. 10.1, а). Такой кристалл имеет спонтанную намагниченность и доменную структуру.

Во внешнем магнитном поле ферримагнетик намагничивается подобно ферромагнетику, в котором магнитные моменты атомов ориентированы в одну сторону (рис. 10.1, б), но остаточная индукция ферритов значительно ниже, чем ферромагнетиков за счёт компенсации магнитных моментов.

В силу своей оксидной природы ферриты обладают большим удельным сопротивлением, то есть они практически не имеют потерь энергии на вихревые токи. Ферриты широко используются для изготовления постоянных магнитов, ферритовых антенн, сердечников радиочастотных контуров, элементов оперативной памяти в вычислительной технике и т.д. Ферриты могут быть магнитомягкими и магнитотвёрдыми – это зависит от Me:

- магнитотвёрдые – в качестве Me используют кобальт и барий;
- магнитомягкие получаются при использовании в качестве Me лития, марганца, никеля и цинка. В лабораторной работе использован марганец-цинковый феррит. Магнитомягкие материалы можно размагнитить в магнитных полях напряжённостью менее 4 кА/м.

Описание метода исследования

Объектом исследования является ферритовый сердечник тороидального трансформатора. Его параметры известны: N_1 , N_2 – число витков в первичной и вторичной обмотке соответственно, S – площадь поперечного сечения сердечника, l – длина средней осевой линии сердечника. Необходимо получить кривую намагничивания $B = f(H)$, а также $\mu = g(H)$. Определить μ_{\max} .

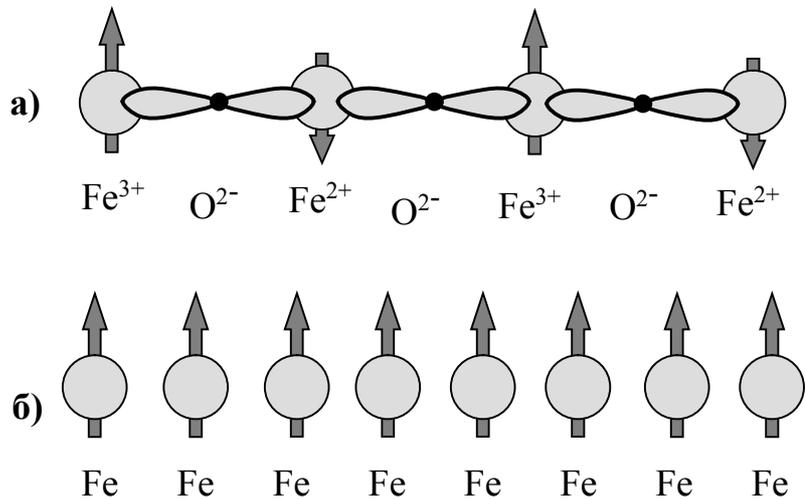


Рис. 10.1. Виды магнитного упорядочения атомов:
а) ферримагнитное упорядочение ($\text{FeO Fe}_2\text{O}_3$),
б) ферромагнитное упорядочение (Fe)

На первичную обмотку подаётся переменное синусоидальное напряжение частотой ν , амплитудой U_m . Циклическая частота переменного напряжения ω . Допускается также использование вторичной обмотки трансформатора вместо первичной. Активное сопротивление обмотки R должно быть измерено. Цепь представляет собой неоднородный участок цепи, и для него может быть записан закон Ома:

$$IR = U = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_s = U_m \cos \omega t - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (10.1)$$

$\varphi_1 - \varphi_2$ – разность потенциалов на клеммах обмотки, \mathcal{E}_s – ЭДС самоиндукции в обмотке, R – сопротивление обмотки, Φ – магнитный поток, пронизывающий витки обмотки. В этой цепи возникает ток $I = I_m \cos(\omega t + \varphi)$. Отсюда,

$$\frac{d\Phi}{dt} = -I_m R \cos(\omega t + \varphi) + U_m \cos \omega t. \quad (10.2)$$

$$\Phi = -\frac{I_m R}{\omega} \sin(\omega t + \varphi) + \frac{U_m}{\omega} \sin \omega t \quad (10.3)$$

Магнитный поток $\Phi = BSN$, а магнитная индукция в тороиде можно определить по формуле: $B = \mu\mu_0 H = \mu\mu_0 I(t)n$, где $n = N/l$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная. Подставляя эти выражения в (10.3), получаем:

$$\mu\mu_0 I_m \frac{N}{l} SN \cos(\omega t + \varphi) = -\frac{I_m R}{\omega} \sin(\omega t + \varphi) + \frac{U_m}{\omega} \sin \omega t. \quad (10.4)$$

Введём обозначения:

$$Z = U_m / I_m = U / I, \quad (10.5)$$

$$X = \omega \frac{\mu\mu_0 N^2 S}{l} = \omega L. \quad (10.6)$$

Здесь, U и I – действующие значения напряжения и тока, измеренные приборами, ($U = U_m / \sqrt{2}$, $I = I_m / \sqrt{2}$), L – индуктивность обмотки.

Тогда выражение (10.4) можно записать в виде:

$$X \cos(\omega t + \varphi) + R \sin(\omega t + \varphi) = Z \sin \omega t. \quad (10.7)$$

Используя формулы косинуса суммы и синуса суммы для выражения (10.7), получаем:

$$\begin{aligned} -X \sin \varphi + R \cos \varphi &= Z, \\ +X \cos \varphi + R \sin \varphi &= 0. \end{aligned} \quad (10.8)$$

Возведём в квадрат оба выражения (10.8) и сложим их:

$$X^2 + R^2 = Z^2, \quad X = \sqrt{Z^2 - R^2}. \quad (10.9)$$

Это выражение хорошо известно в электротехнике. Оно связывает полное сопротивление (импеданс) цепи Z , активное сопротивление R и реактивное сопротивление X . Полное и активное сопротивление обмотки можно определить экспериментально. Тогда, расчётная формула для определения магнитной проницаемости, полученная с использованием выражений (10.6) и (10.7), имеет следующий вид:

$$\mu = \frac{l}{\omega \mu_0 N^2 S} X = aX, \quad (10.10)$$

где $a = \frac{l}{\omega \mu_0 N^2 S}$ – постоянная установки, N – число витков в обмотке.

Можно использовать первичную обмотку, тогда $N = N_1$, или вторичную, тогда $N = N_2$. Амплитуда напряжённости магнитного поля, которое создаётся в кольцевом сердечнике при протекании по обмотке тока I , можно рассчитать по формуле

$$H = \frac{N}{l} I_m = nI\sqrt{2}. \quad (10.11)$$

Таким образом, каждому значению тока I соответствует напряжённость магнитного поля H , магнитная проницаемость сердечника μ и индукция магнитного поля B

$$B = \mu_0 \mu H. \quad (10.12)$$

Определяя величины H , μ и B при различных токах, можно построить кривую намагничивания $B = f(H)$.

Определение намагниченности насыщения феррита J_s . Магнитная индукция в веществе складывается из магнитной индукции макроскопических токов (токов в обмотке) $\mu_0 H$ и внутреннего поля микроскопических токов $\mu_0 J$:

$$B = \mu_0 H + \mu_0 J. \quad (10.13)$$

Если веществом является ферромагнетик, то намагниченность J нелинейно и неоднозначно зависит от напряжённости намагничивающего поля. Возникает магнитный гистерезис. При увеличении напряжённости внешнего магнитного поля ферромагнетик входит в состояние насыщения, когда все магнитные моменты доменов выстраиваются в одном направлении. Намагниченность перестаёт расти, достигнув максимума J_s . Вид кривой намагничивания показан на рис. 10.2.

Поэтому намагниченность насыщения можно оценить по кривой намагничивания путём экстраполяции по линейному её участку, на котором достигается насыщение $B = \mu_0 H + \mu_0 J_s$.

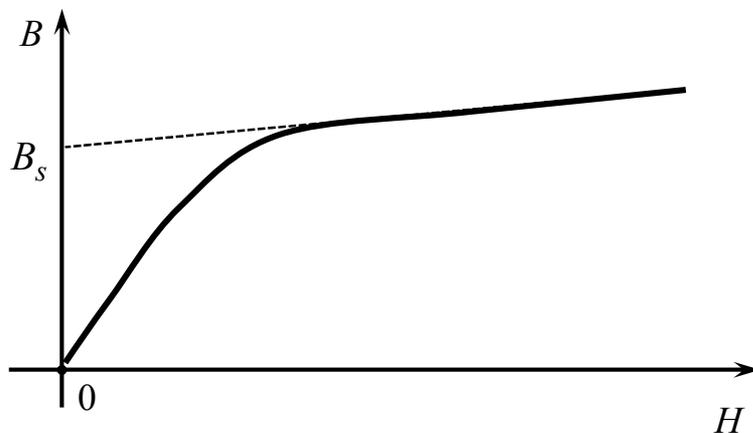


Рис. 10.2. Кривая намагничивания ферромагнетика

Намагниченность J_s доменов можно оценить так:

$$J_s = B_s / \mu_0 . \quad (10.14)$$

Отсюда можно оценить средний магнитный момент $\langle p_m \rangle$ кристаллической ячейки ферритового сердечника. Его химическая формула – $\text{NiO} \cdot \text{ZnO} \cdot 2\text{Fe}_2\text{O}_3$. Этот сплав трёх оксидов называется никель-цинковый феррит. Его молярную массу M можно определить. По определению намагниченности:

$$J_s = \frac{\sum p_{mi}}{\Delta V} = \frac{\langle p_m \rangle N_0}{\Delta V} = \frac{\langle p_m \rangle N_A v}{\Delta V} = \frac{\langle p_m \rangle N_A}{\Delta V} \cdot \frac{m}{M} = \frac{\langle p_m \rangle N_A \rho}{M} . \quad (10.15)$$

Здесь, N_A – число Авогадро, $\rho = 6,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность ферритового сердечника. Из формулы (10.15) можно определить эту величину в долях магнетона Бора $\mu_B = 0,927 \cdot 10^{-23} \text{ А/м}^2$:

$$\frac{\langle p_m \rangle}{\mu_B} = \frac{J_s M}{N_A \rho \mu_B} . \quad (10.16)$$

Магнетон Бора приблизительно равен магнитному моменту свободного электрона. Можно полученную величину сравнить с магнитным моментом свободного атома железа, который равен $4\mu_B$.

Описание установки

Оборудование: миниблоки «Точка Кюри», «Сопротивление», генератор сигналов специальной формы (ГССФ), мультиметры.

Электрическая схема установки показана на рис. 10.1. На кольцевой сердечник 5, изготовленный из исследуемого ферромагнитного материала, намотаны N_1 проволочных витков. Эта обмотка, по которой пропускают переменный ток частоты более 200 Гц, служит для намагничивания магнетика. Генератор напряжений специальной формы 1 позволяет изменять напряжение U , и ток I в обмотке тороида. Эти величины измеряют мультиметрами. Можно также использовать вместо первичной обмотки вторичную.

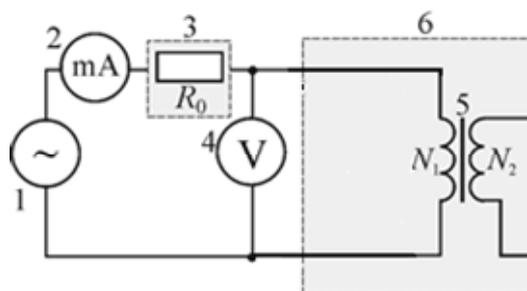


Рис. 10.1. Электрическая схема установки
1 – ГССФ, 2 – миллиамперметр, 3 – миниблок «Сопротивление» 100 Ом, 4 – вольтметр, 5 – кольцевой сердечник с обмотками N_1 и N_2 , 6 – миниблок «Точка Кюри»

Можно также использовать вместо первичной обмотки вторичную.

Выполнение работы

1. Заполнить данные об измерительных приборах, которые будут использованы.
2. Измерить и записать все необходимые величины (число витков, их сопротивления, характеристики элементов цепи и т.д.)
3. Собрать схему установки (рис. 10.1). Провести все необходимые измерения и записать в таблицу. Частоту напряжения и шаг измерения выбрать самостоятельно.

Обработка результатов измерений

1. Сделать расчёты B , H , μ по измеренным значениям.
2. Оценить погрешности измеренных величин.
3. Построить кривую зависимости магнитной проницаемости от напряжённости поля. Определить максимальное значение μ
4. Построить кривые намагничивания и провести экстраполяцию для определения B_s .
5. Оценить магнитный момент кристаллической ячейки феррита в долях от μ_B . Оценить погрешность этой величины.
6. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Лабораторная работа Э-11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ КЮРИ И МАГНИТНОГО МОМЕНТА КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ ФЕРРИМАГНЕТИКА

Цель работы: исследование температурной зависимости магнитного момента кристаллической ячейки ферримагнетика и определение его температуры Кюри.

Основные понятия теории ферримагнетизма даны в лабораторной работе Э-10.

Температура Кюри – это температура T_k , выше которой намагниченность каждого домена ферромагнетика равна нулю. Причина этого – тепловое движение, разрушающее доменную структуру. В результате вещество переходит из ферримагнитного состояния в парамагнитное. По мере уменьшения температуры ферримагнетика от температуры Кюри, его намагниченность J возрастает, так как магнитные моменты элементарных кристаллических ячеек в пределах каждого домена стремятся выстроиться параллельно друг другу. При достаточно низких температурах магнитные моменты всех доменов устанавливаются вдоль вектора магнитной индукции внешнего поля: наступает магнитное насыщение, при котором намагниченность J_s ферримагнетика максимальна. Её величина равна сумме магнитных моментов кристаллических ячеек p_{ms} в этом объёме (10.15):

$$J_s = \frac{N_A}{M} \rho \cdot p_{ms}, \quad (11.1)$$

где N_A – число Авогадро, M – молярная масса, соответствующая формульной единице ферримагнетика, ρ – его плотность.

Теоретически зависимость J_s от абсолютной температуры T для ферромагнетиков была выведена швейцарским физиком Ф. Блохом в 1930 году:

$$J_s = J_{s0} \left(1 - \alpha \left(\frac{T}{T_C} \right)^{3/2} \right). \quad (11.2)$$

Здесь, T_C – температура Кюри, J_{s0} – максимальное значение намагниченности феррита, α – постоянная, характерная для данного вещества ($\alpha \approx 1$).

Описание метода исследования

Объектом исследования, также, как и в лабораторной работе Э-10, является ферритовый сердечник тороидального трансформатора. Его параметры известны: N_1, N_2 – число витков в первичной и вторичной обмотке соответственно, S – площадь поперечного сечения сердечника, l – длина средней

осевой линии сердечника. На первичную обмотку подаётся переменное синусоидальное напряжение частотой ν , амплитудой U_m . Методика определения намагниченности насыщения J_s описана в лабораторной работе Э-10. Определить магнитный момент ячейки феррита в долях магнетона Бора можно по формуле (10.16):

$$\frac{\langle p_m \rangle}{\mu_B} = b \cdot J_s, \quad b = \frac{M}{N_A \rho \mu_B}. \quad (11.3)$$

Здесь, N_A – число Авогадро, $\rho = 6,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность ферритового сердечника, $\mu_B = 0,927 \cdot 10^{-23} \text{ А/м}^2$ – магнетон Бора, M – молярная масса феррита ($\text{NiO} \cdot \text{ZnO} \cdot 2\text{Fe}_2\text{O}_3$).

Зависимость (11.2) может быть представлена в виде:

$$J_s = A + B \cdot T^{3/2}, \quad A = J_{s0}, \quad B = -\frac{J_{s0} \cdot \alpha}{T_C^{3/2}}. \quad (11.4)$$

Как показывает опыт, эта зависимость хорошо выполняется вплоть до температуры $T = T_C/2$. Поэтому, если построить график $J_s = f(T^{3/2})$, то по нему, путём линейной аппроксимации, можно получить требуемые величины: T_C , J_{s0} , α .

Описание установки

Электрическая схема установки показана на рис. 11.1.

Оборудование: генератор сигналов специальной формы, генератор регулируемого постоянного напряжения, мультиметры, миниблоки «Сопротивление» 100 Ом, «Точка Кюри».

На кольцевой сердечник 5, изготовленный из исследуемого ферромагнитного материала, намотаны N_1 проволочных витков. Эта обмотка, по которой пропускают переменный синусоидальный ток от генератора сигналов специальной формы 1. Внутри миниблока также имеется нагреватель 7 и термопара 8, соединённая через разъём с мультиметром 9, работающим в режиме электронного термометра.

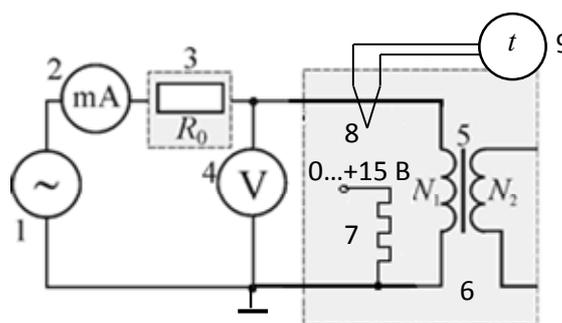


Рис. 11.1. Электрическая схема установки
1 – ГССФ, 2 – миллиамперметр, 3 – миниблок «Сопротивление» 100 Ом, 4 – вольтметр, 5 – кольцевой сердечник с обмотками N_1 и N_2 , 6 – миниблок «Точка Кюри», 7 – нагреватель, 8 – термопара, 9 – электронный термометр

Выполнение работы

1. Заполнить данные об измерительных приборах, которые будут использованы.
2. Измерить и записать все необходимые величины (число витков, их сопротивление, характеристики элементов цепи и т.д.)
3. Измерить активное сопротивление обмотки в холодном состоянии $R_{\text{нач}}$. Собрать схему установки (рис. 11.1).
4. Включить питание. Выбрать частоту напряжения. Подать переменный ток на обмотку, соответствующий состоянию насыщения, можно максимально возможное значение.
5. Провести измерения тока в обмотке и напряжения в процессе нагрева, который должен производиться медленно, чтобы в миниблоке успевало устанавливаться термодинамическое равновесие. Шаг измерений выбрать самостоятельно.
6. Нагрев рекомендуется делать не выше 100 °С.
7. По окончании нагрева сразу измерить активное сопротивление обмотки $R_{\text{кон}}$.

Обработка результатов измерений

1. Сделать расчёты B , H , μ , J_s , T , $T^{3/2}$ по измеренным значениям для каждого значения температуры t . Кроме того, рассчитать активное сопротивление обмотки путём линейной интерполяции начального $R_{\text{нач}}$ и конечного значения $R_{\text{кон}}$.
2. Оценить погрешности полученных величин.
3. Построить график зависимости J_s от $T^{3/2}$.
4. Путём линейной аппроксимации графика определить точку Кюри T_c и оценить её погрешность. Также определить J_{s0} , α .
5. Оценить магнитный момент кристаллической ячейки феррита при абсолютном нуле температуры в долях магнетона Бора и его погрешность.
6. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Контрольные вопросы к ЛР Э-10 и Э-11

1. Чем отличаются ферриты от ферромагнетиков?
2. Что такое намагничённость вещества?
3. Что такое температура Кюри?
4. Какова методика определения намагничённости насыщения в этих лабораторных работах?
5. При каком условии происходит магнитное насыщение феррита?
6. К какому классу магнетиков относится феррит при температуре выше температуры Кюри?

Лабораторная работа Э-12

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: наблюдение электромагнитных затухающих колебаний на осциллографе, определение основных характеристик таких колебаний, оценка погрешностей измерений.

Электромагнитные колебания представляют собой периодическое изменение электрических зарядов, токов, электрического и магнитного полей. Получить электромагнитные колебания можно в колебательном контуре. Он представляет собой электрическую цепь из последовательно соединенных конденсатора C , катушки индуктивности L и резистора с активным сопротивлением R (в качестве последнего может служить и собственное омическое сопротивление катушки) (рис. 12.1).

Если конденсатор зарядить, то есть сообщить ему запас энергии

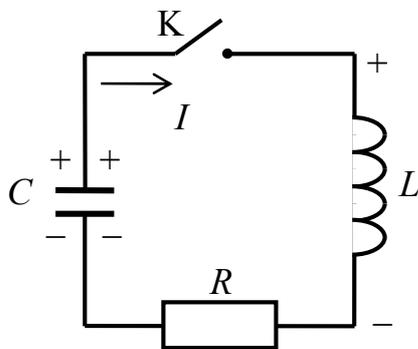


Рис. 12.1. Колебательный контур

$$W_{\text{эл}} = \frac{Q^2}{2C}, \quad (12.1)$$

а затем ключом K замкнуть контур, конденсатор начнет разряжаться через катушку и в цепи появится быстро нарастающий ток. Согласно закону Фарадея, этот ток вызовет на концах катушки ЭДС самоиндукции, имеющую знак, противоположный знаку разности потенциалов на обкладках конденсатора. Вследствие этого скорость нарастания тока в контуре будет постепенно уменьшаться до тех пор, пока конденсатор полностью не разрядится. В этот момент сила тока в цепи будет максимальна. Энергия электрического поля конденсатора перейдет в энергию магнитного поля катушки

$$W_{\text{маг}} = \frac{LI^2}{2}. \quad (12.2)$$

В дальнейшем ток, сохраняя свое прежнее направление, перезаряжает конденсатор. На его обкладках появляется разность потенциалов, противоположная по знаку первоначальной, что приводит к уменьшению тока, а значит, и магнитного поля катушки. Возникающая при этом ЭДС самоиндукции будет поддерживать уменьшающийся ток. В момент времени, когда ток прекратится, конденсатор полностью перезарядится: заряд, разность потенциалов на его обкладках и ЭДС самоиндукции будут максимальны. После этого вновь начинается разряд конденсатора через катушку, и процесс повторяется в противоположном направлении.

Найдём зависимость заряда на обкладках конденсатора от времени. Из закона сохранения энергии следует, что убыль энергии электрического и магнитного полей в реальном контуре равна количеству выделенного контуром тепла:

$$-d \left(\frac{LI^2}{2} + \frac{Q^2}{2C} \right) = I^2 R dt. \quad (12.3)$$

Считая, что индуктивность L не зависит от времени, проведём дифференцирование и обозначим:

$$I = -\frac{dQ}{dt}, \quad \frac{dI}{dt} = -\frac{d^2Q}{dt^2}, \quad \frac{R}{L} = 2\delta, \quad \frac{1}{LC} = \omega_0^2. \quad (12.4)$$

Получим

$$\frac{d^2Q}{dt^2} + 2\delta \frac{dQ}{dt} + \omega_0^2 Q = 0. \quad (12.5)$$

Решение этого дифференциального уравнения при $\delta \ll \omega_0$ имеет вид

$$Q = Q_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (12.6)$$

где $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$ – циклическая частота колебаний,

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – циклическая частота свободных незатухающих колебаний,

Q_0 – начальный заряд конденсатора, φ_0 – начальная фаза, $\delta = \frac{R}{2L}$ – коэффициент затухания – величина, обратная промежутку времени τ , в течение которого амплитуда убывает в e раз. Величину τ называют временем релаксации.

Выражение (12.6) можно представить в виде, похожем на гармонические колебания:

$$Q = Q_m(t) \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (12.7)$$

где $Q_m(t) = Q_0 e^{-\delta t}$ – амплитуда колебаний заряда, которая, в отличие от гармонических колебаний, не является постоянной, а уменьшается со временем по экспоненте.

График функции (12.6) представлен на рис. 12.2. Подобным же образом будут изменяться сила тока в контуре и разность потенциалов на обкладках конденсатора.

Из рис. 12.2 видно, что, хотя затухающие колебания не являются периодическими в строгом смысле этого слова, этот процесс обладает определенной повторяемостью: максимальные и минимальные значения заряда, тока и разности потенциалов достигаются через одинаковые промежутки времени T . Эту величину и называют *периодом свободных затухающих колебаний (условным периодом)*

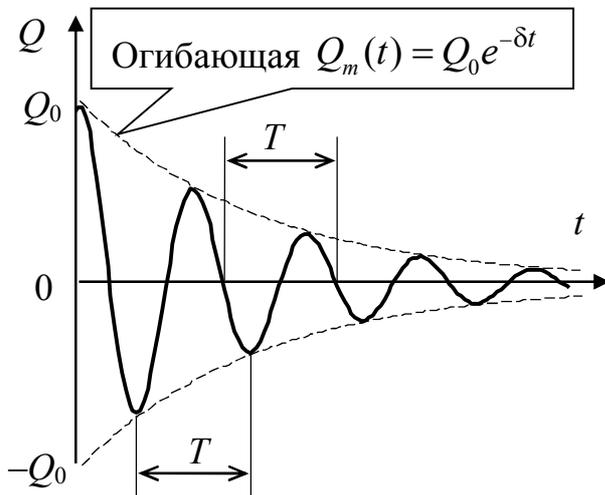


Рис. 12.2. Затухающие колебания

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \quad (12.8)$$

Наряду с коэффициентом затухания δ пользуются и другой величиной – *логарифмическим декрементом затухания θ* . Он равен *натуральному логарифму отношения двух последовательных амплитуд, разделённых промежутком времени, равным периоду колебаний T* :

$$\theta = \ln \frac{U_t}{U_{t+T}}. \quad (12.9)$$

Можно показать, что

$$\theta = \delta T = \frac{R}{2L} T. \quad (12.10)$$

Из выражения (12.8) видно, что с увеличением сопротивления контура период колебаний в нём возрастает и при условии

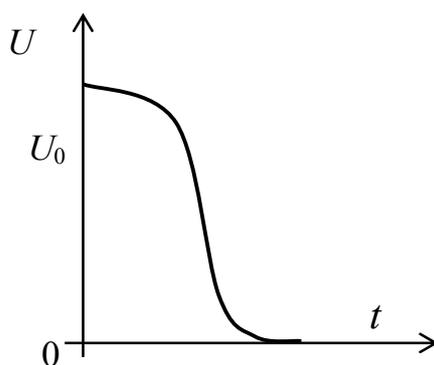


Рис. 12.3. Аперiodический процесс

$$\frac{R^2}{4L^2} = \frac{1}{LC} \quad (12.11)$$

обращается в бесконечность. Это значит, что колебания в контуре не возникают. Наступает *аперiodический разряд*, характер которого показан на рис. 12.3. *Минимальное сопротивление контура, при котором не возникают колебания, называется критическим*. Его можно определить по формуле:

$$R_{\text{крит}} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (12.12)$$

Описание метода исследования

Если конденсатор колебательного контура зарядить с помощью однополярного прямоугольного импульса напряжения, а затем напряжение с обкладок подать на вход вертикальной развертки осциллографа, то на его экране будет наблюдаться осциллограмма униполярного импульса с затухающими колебаниями (рис. 12.4). Период этих колебаний можно найти по формуле

$$T = k_x \frac{l}{N}, \quad (12.13)$$

где k_x – коэффициент горизонтальной развертки осциллографа, l – длина участка этой развертки, на котором укладывается N полных колебаний.

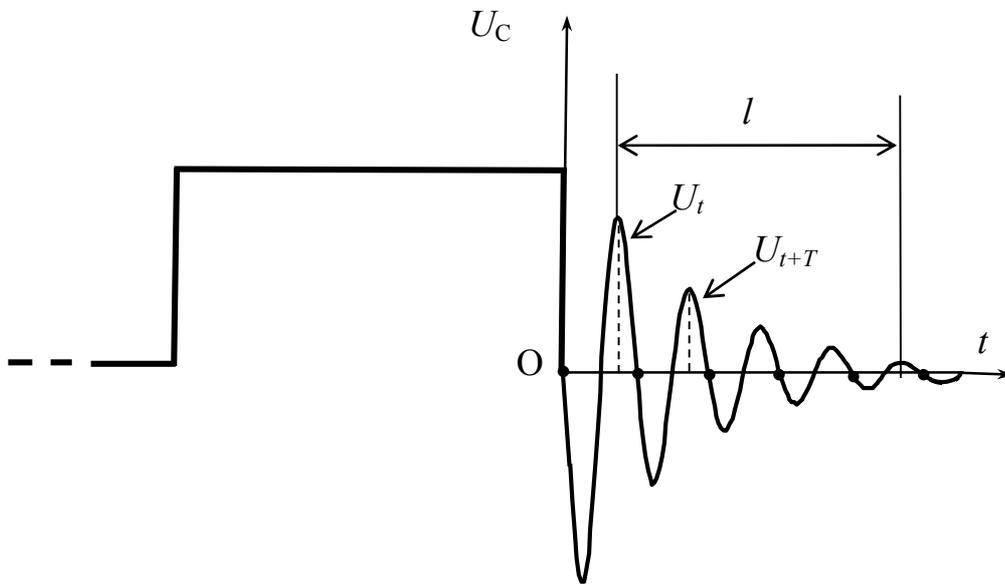


Рис. 12.4. Затухающие колебания напряжения на пластинах конденсатора

Амплитуды напряжения на конденсаторе U_t и U_{t+T} , необходимые для расчёта логарифмического декремента θ , находятся по формуле

$$U = k_y h, \quad (12.14)$$

где k_y – коэффициент вертикального отклонения осциллографа, h – величина этого отклонения (пунктирные линии на рис. 12.4).

По известным значениям логарифмического декремента θ и периода затухающих колебаний T можно найти значение коэффициента затухания δ :

$$\delta = \theta / T. \quad (12.15)$$

Критическое сопротивление колебательного контура $R_{\text{крит}}$ находят, наблюдая, по мере увеличения его активного сопротивления, за изменением осциллограммы затухающих колебаний. Признаком выхода колебательного

процесса на режим аperiodического разряда конденсатора является получение кривой $U(t)$ не содержащей колебаний (рис. 12.3). Тогда критическое сопротивление контура находится как сумма активного сопротивления катушки индуктивности R_k и реостата R_p

$$R_{\text{крит}} = R_k + R_p. \quad (12.16)$$

Описание установки

Оборудование: генератор сигналов специальной формы (ГССФ), мини-блоки «Реостат», «Конденсатор» 0,1 мкФ, «Катушка» 16 мГн, осциллограф, мультиметр.

На рис. 12.5 приведена электрическая схема установки. Миниблоки 2, 3, 4, соединённые соответствующим образом, образуют исследуемый колебательный контур. Генератор униполярных прямоугольных импульсов напряжения 1 служит для пополнения энергии колебательного контура. U_Y – напряжение, подаваемое на вход Y осциллографа.

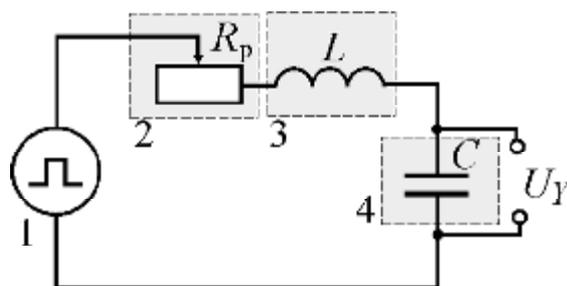


Рис. 12.5. Электрическая схема:
1 – ГССФ (форма сигнала «⌋⌋»),
2 – миниблок «Реостат»,
3 – миниблок «Катушка»,
4 – миниблок «Конденсатор»

Выполнение работы

Этап 1. Наблюдение затухающих колебаний

1. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 12.6.

2. Установить сопротивление реостата R_p равным «0 кОм». Для этого повернуть ручку реостата против часовой стрелки до упора. Записать параметры установки.

3. Включить питание блоков генераторов напряжений и измерительный блок. Нажать на панели генератора кнопку с формой импульса «⌋⌋». Кнопками «Установка частоты 0...20 кГц установить частоту $\nu = 0,2$ кГц.

4. Включить осциллограф и настроить его на регистрацию временной развёртки сигнала. Осциллограмма затухающих колебаний должна занимать большую часть экрана и быть выровненной по сетке. Весь цикл затухающих колебаний должен уместиться на экране (рис. 12.7). Необходимо зафиксировать осциллограмму. Это можно сделать двумя способами:

А) зарисовать вручную на клетчатой или миллиметровой бумаге. *Запрещается приставлять бумагу к экрану!*

Б) Сфотографировать с экрана осциллографа.

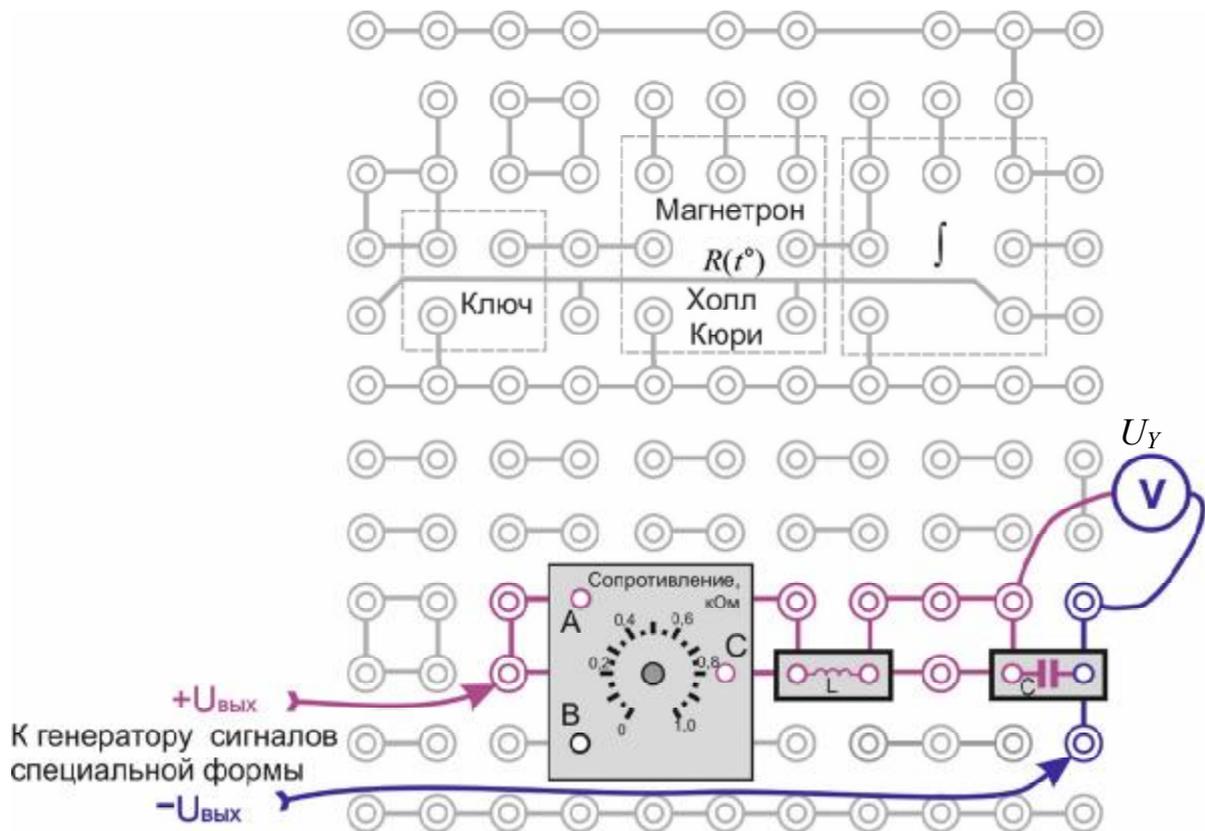


Рис. 12.6. Монтажная схема

С помощью портативного осциллографа можно провести все измерения затухающих колебаний – периода и всех амплитуд. Инструкция о проведении измерений прилагается отдельно.

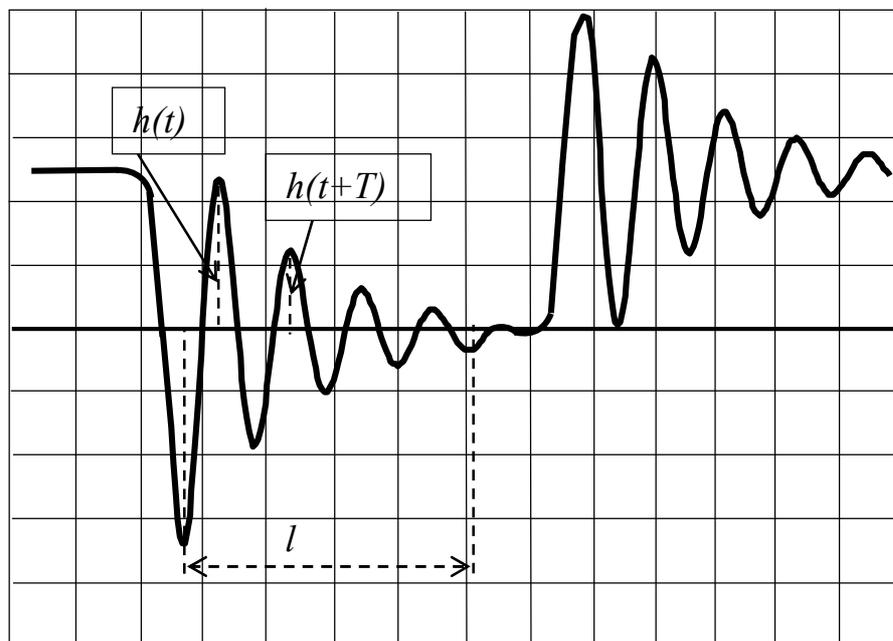


Рис. 12.7. Осциллограмма затухающих колебаний

Этап 2. Изучение апериодического режима

5. Медленно увеличивать сопротивление реостата до тех пор, пока не исчезнет последнее колебание и осциллограмма примет вид, изображенный на рис. 12.8. После этого ручку реостата не крутить. Выключить питание стенда.

6. Измерить величины R_k (сопротивление катушки) и R_p (сопротивление реостата). Для этого необходимо воткнуть миниблок «Катушка» в мультиметр, настроенный на измерение сопротивления (рис. 12.9). Диапазон измерений выбрать самостоятельно. Миниблок «Реостат» оставить на наборном поле, отключив его от всей остальной схемы, и соединить его проводами с мультиметром (рис. 3.6).

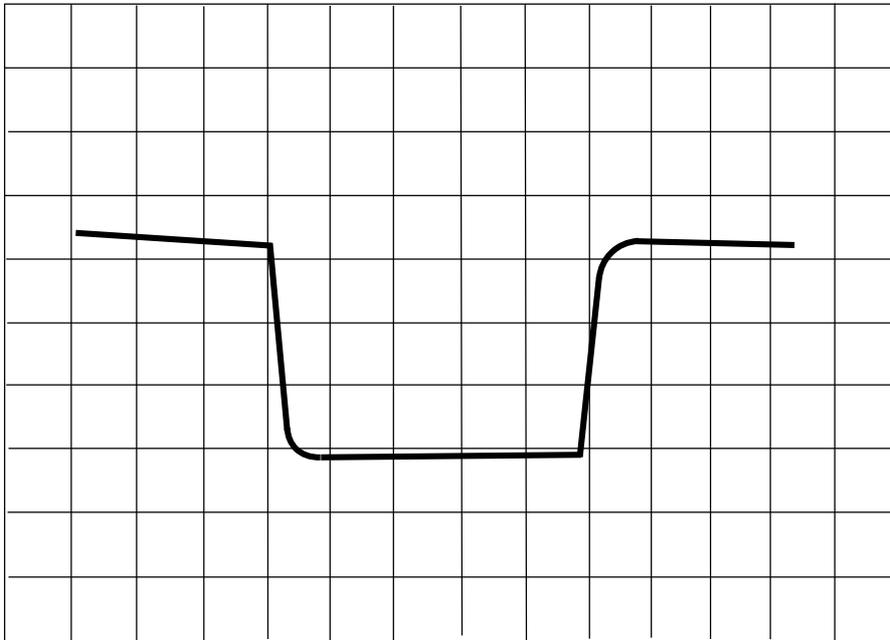


Рис. 12.8. Осциллограмма апериодического процесса

Обработка результатов измерений

1. По формуле (12.8) – теоретическое значение $T_{\text{теор}}$ ($R = R_{\text{к}}$). Определить относительное отклонение γ_T' экспериментального и теоретического значений:

$$\gamma_T' = \frac{|T_{\text{теор}} - T_{\text{эксп}}|}{T_{\text{теор}}} \cdot 100\%, \quad (12.17)$$

$T_{\text{эксп}}$ определяется, либо по формуле (12.13), либо непосредственно с помощью портативного осциллографа.

2. Вычислить экспериментальное $\theta_{\text{эксп}}$ (12.9) и теоретическое значение логарифмического декремента затухания $\theta_{\text{теор}}$ (12.10) ($R = R_{\text{к}}$), а также относительное отклонение γ_{θ}' экспериментального и теоретического значения

$$\gamma_{\theta}' = \frac{|\theta_{\text{теор}} - \theta_{\text{эксп}}|}{\theta_{\text{теор}}} \cdot 100\%, \quad (12.18)$$

3. Вычислить экспериментальное $R_{\text{крит}}^{\text{эксп}}$ (12.16) и теоретическое значение критическое сопротивление колебательного контура $R_{\text{крит}}^{\text{теор}}$ (12.12), а также относительное отклонение γ_R' экспериментального и теоретического значения

$$\gamma_R' = \frac{|R_{\text{крит}}^{\text{теор}} - R_{\text{крит}}^{\text{эксп}}|}{R_{\text{крит}}^{\text{теор}}} \cdot 100\%. \quad (12.19)$$

4. Оценить погрешности величин (см. Приложение)



Рис. 12.9. Измерение сопротивления катушки

Контрольные вопросы

1. По какому закону изменяются при разряде конденсатора в колебательном контуре, содержащем R , L , C , следующие величины:

- а) напряжение на конденсаторе,
- б) заряд обкладок,
- в) ток в цепи?

2. Как зависят от параметров колебательного контура следующие характеристики колебаний:

- а) циклическая частота и период затухающих колебаний,
- б) коэффициент затухания колебаний,
- в) критическое сопротивление контура.

3. Какие величины измеряют по осциллограмме колебаний для определения:

- а) периода затухающих колебаний,
- б) логарифмического декремента затухания колебаний?

4. Какое назначение имеют следующие элементы электрической цепи:

- а) генератор напряжений специальной формы,
- б) реостат?

5. Какой параметр колебательного контура измеряют в работе при апериодическом режиме?

6. С каких элементов электрической цепи можно подать напряжение на вход Y осциллографа для наблюдения затухающих колебаний?

7. По каким формулам определяют:

- а) экспериментальные значения периода колебаний T , δ и $R_{кр}$?
- б) теоретические значения величин T , δ и $R_{кр}$?

Лабораторная работа Э-13

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСА В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы: изучение резонанса напряжений и токов в цепях переменного тока, измерение индуктивности резонансным методом.

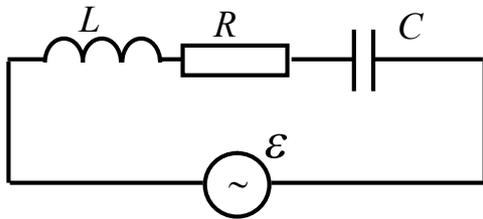


Рис. 13.1. Цепь переменного тока

Рассмотрим замкнутую электрическую цепь (контур), состоящую из последовательно соединённых конденсатора ёмкостью C , катушки с индуктивностью L , резистора с активным сопротивлением R и генератора переменной ЭДС $\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t$ (рис. 13.1).

Считаем, что переменный ток, протекающий в цепи, подчиняется условию $\tau \ll T$, где τ – время распространения электромагнитного возмущения вдоль цепи, а T – характерное время изменения напряжённости электрического поля. Такие токи называются *квазистационарными* и для их *мгновенных значений* выполняются законы постоянного тока. Согласно закону Ома для неоднородного участка цепи

$$IR = \Delta\varphi + \varepsilon_s + \varepsilon, \quad (13.1)$$

где IR – падение напряжения на участке; $\Delta\varphi = Q/C$ – разность потенциалов на конденсаторе; $\varepsilon_s = -L \cdot dI/dt$ – ЭДС самоиндукции в катушке. Дифференцируя это уравнение по времени и, используя соотношение $I = -dQ/dt$, получим дифференциальное уравнение вынужденных колебаний тока в цепи

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{dI}{dt} + \frac{1}{LC} I = \frac{\varepsilon_m}{L} \omega \cos \omega t. \quad (13.2)$$

Введём обозначения: $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – собственная частота колебаний тока в колебательном контуре, $\delta = \frac{R}{2L}$ – коэффициент затухания. Тогда уравнение (13.2) запишется в виде:

$$\ddot{I} + 2\delta\dot{I} + \omega_0^2 I = \frac{\varepsilon_m}{L} \omega \cos \omega t. \quad (13.3)$$

Частным решением этого уравнения является гармоническая функция, описывающая установившиеся колебания частотой ω и амплитудой I_m :

$$I = I_m \sin(\omega t - \varphi), \quad (13.4)$$

где φ – сдвиг фаз между ЭДС и током. Амплитудно-частотная характеристика для тока описывается уравнением:

$$I_m = \frac{(\varepsilon_m/L) \cdot \omega}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2\omega^2}}. \quad (13.5)$$

Эта функция имеет единственный максимум $\omega = \omega_0$, называемый резонансной частотой (рис. 13.2). Напряжение на резисторе будет изменяться синфазно с током $U_R = IR = U_{mR} \sin(\omega t - \varphi)$, где $U_{mR} = I_m R$ – амплитуда напряжения:

$$U_{mR} = \varepsilon_m \frac{2\delta\omega}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2\omega^2}}. \quad (13.6)$$

Нетрудно из (13.6) получить выражение для коэффициента затухания:

$$\delta = \frac{\Delta\omega}{2\sqrt{3}}, \quad \Delta\omega = \omega_2 - \omega_1. \quad (13.7)$$

Описание метода исследования

На колебательный контур подают синусоидальное внешнее напряжение с контролируемой частотой ν , измеряют напряжение на резисторе при различных частотах и строят график зависимости амплитуды соответствующих напряжений от частоты $U_m = f(\nu)$. В случае последовательного соединения конденсатора и катушки индуктивности на резонансной частоте ν_0 должен наблюдаться максимум $U_{mR \text{ рез}}$.

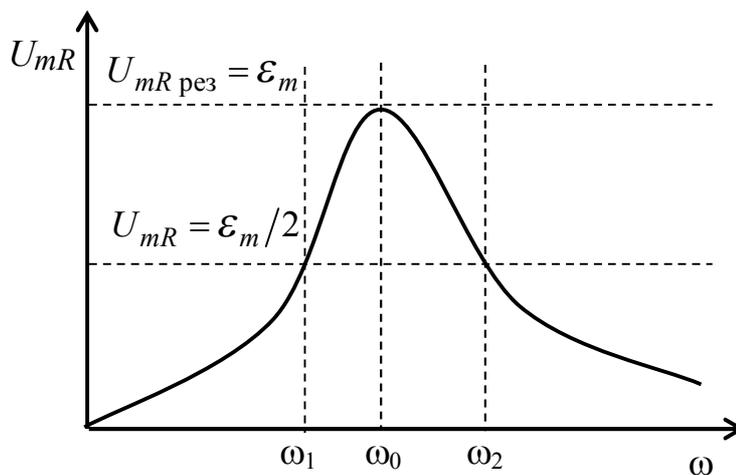


Рис. 13.2. Зависимость амплитуды напряжения на резисторе от частоты

Описание установки

Оборудование: генератор напряжений специальной формы (ГССФ), миниблоки «Индуктивность L_x », «Конденсатор» 1 мкФ, «Сопротивление» 100 Ом, мультиметры.

Для исследования явления резонанса используется электрическая цепь, в которой последовательно соединены конденсатор, резистор и катушка индуктивности. К этой цепи подводится переменное синусоидальное напряжение от источника. Действующие напряжения (они в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудных, однако для наших целей это различие несущественно) на участках измеряют с помощью мультиметров, подключённых параллельно. На рис. 13.3 приведена монтажная схема.

Выполнение работы

1. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 13.3. Вольтметры подключить на V1 и V2, т.е. для измерения полного падения напряжения (V1) и падения напряжения на резисторе (V2).

2. Включить в сеть блоки генераторов и измерительный блок. Нажать кнопку « \sim » для установки синусоидального напряжения. Кнопками «Установка частоты 0,2 – 20 кГц» установить частоту $\nu_1 = 0,20$ кГц. Установить выходное напряжение генератора $\mathcal{E} = 1,5 \pm 0,3$ В. В дальнейшем необходимо контролировать выходное напряжение генератора с помощью вольтметра V1, чтобы оно не изменялось. Значение \mathcal{E} записать.

3. Увеличивая частоту ν выходного сигнала генератора, найти резонансное (*максимальное*) напряжение на резисторе $U_{R \text{ рез}}$ и соответствующую ему частоту ν_0 .

4. Провести измерения $U_R(\nu)$. Измерения производить в том диапазоне частот, в пределах которого напряжение уменьшается в 3 – 4 раза по сравнению с резонансным $U_{R \text{ рез}}$. Интервал между измерениями можно варьировать. Вблизи резонанса, в области крутого подъема и спада кривой, интервал следует уменьшить. Количество измерений должно быть не меньше 10 – 15.

Обработка результатов измерений

1. По экспериментальным данным построить резонансную кривую: $U_R(\nu)$ для контура с последовательно включенными элементами.

2. По значению резонансной частоты ν_0 и известной ёмкости C найти индуктивность катушки L_x по формуле, полученной из (13.6),

$$L_x = \frac{1}{C \cdot (2\pi\nu_0)^2}. \quad (13.8)$$

3. Рассчитать теоретическое значение коэффициента затухания δ и сравнить его с экспериментальным (13.7).

4. Оценить погрешности полученных величин.

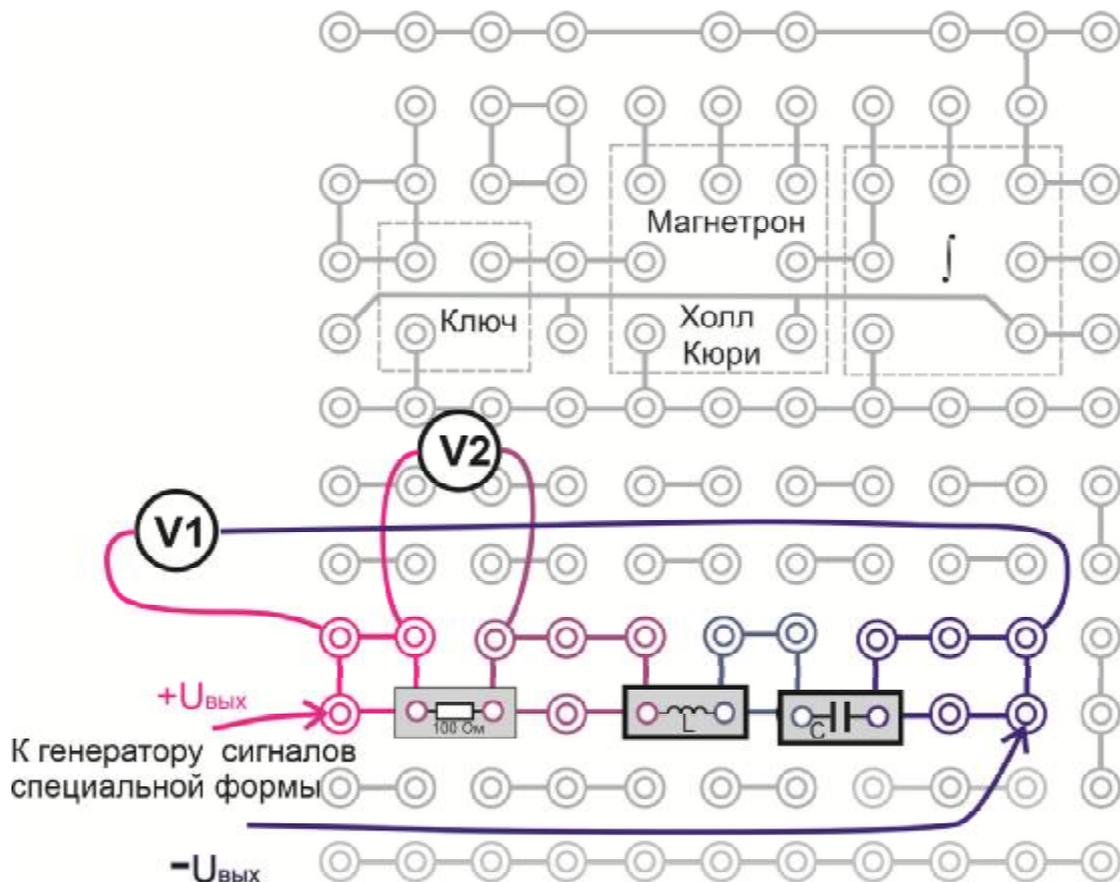


Рис. 13.3. Монтажная схема

Контрольные вопросы

1. Запишите закон изменения тока в цепи при вынужденных колебаниях.
2. Чем определяются частота и амплитуда вынужденных колебаний?
3. При каком условии наблюдается резонанс в колебательном контуре?
4. Какова величина полного сопротивления контура и тока в нём в случае резонанса напряжений?
5. Чем объясняется, что при резонансе напряжений ток в контуре максимальный?
6. От каких величин зависит высота резонансного пика $I = f(\omega)$?
7. Каким образом в данном колебательном контуре можно изменять:
 - а) частоту вынужденных колебаний, б) резонансную частоту контура?
8. Какие параметры колебаний в контуре изменятся, если изменить частоту колебаний генератора?
9. Каким путем в работе добиваются получения резонансов? Что служит признаком достижения резонанса?
10. Какие опытные данные используют для определения величины индуктивности контура L ?

ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Погрешности измерений физических величин

Измерения. Типы измерений

Установление закономерностей физических явлений осуществляется путём *наблюдений, измерений и обобщений*. Особое место в этом процессе отводится измерениям. По способу получения результатов различают *прямые* и *косвенные* измерения [3–7].

Прямые – это измерения, при которых результат находят непосредственно из опытных данных одного измерения. К таким измерениям относится большинство измерений, проводимых с помощью приборов, заранее отградуированных в определённых единицах, например, измерения длины линейкой, времени – часами, напряжения – вольтметром и т. п.

Прямые измерения можно выразить формулой

$$Q = X, \quad (\text{П1})$$

где Q – искомое значение измеряемой величины, а X – значение, непосредственно получаемое из опытных данных.

Косвенные – это измерения, при которых искомую величину определяют на основании прямых измерений нескольких величин, связанных с измеряемой величиной определённой зависимостью. Пример: определение плотности материала путём прямых измерений массы и размеров образца. При косвенных измерениях измеряют не саму определяемую величину, а другие величины, функционально с нею связанные. Значение измеряемой величины находят путём вычисления по формуле

$$Q = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N), \quad (\text{П2})$$

где Q – искомое значение косвенно измеряемой величины; f – знак функциональной зависимости, которая заранее известна; $X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$ – значения величин, измеренных прямым способом.

Косвенные измерения широко распространены в тех случаях, когда искомую величину невозможно или слишком сложно измерить непосредственно или когда прямое измерение даёт менее точный результат. Роль косвенных измерений особенно велика при измерении величин, недоступных непосредственному экспериментальному сравнению, например, размеров астрономического или внутриатомного порядка. Следует заметить, что косвенными измерениями определяются наибольшее число физических величин, причём иногда этот способ измерений является единственно возможным.

Погрешности измерений и их классификация

Результаты измерений, вследствие несовершенства измерительных приборов, наших органов чувств и других независящих от нас причин, всегда содержат погрешность. Это значит, что в любом измерении мы получаем не истинное значение физической величины, а лишь близкое к нему. Теория погрешностей дает нам возможность установить предельное значение погрешности, определить интервал, в котором вероятнее всего находится истинное значение измеряемой величины.

Погрешность измерений – это отклонение результата измерения от истинного значения физической величины, т. е. это разность между измеренным и истинным значениями измеряемой величины:

$$\Delta X = X_{\text{изм}} - X_{\text{ист}} . \quad (\text{П3})$$

Погрешность, определённая такой формулой, называется *абсолютной*. Кроме абсолютной погрешности ΔX часто бывает важно знать *относительную* погрешность γ , которая равна отношению абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины и выражается в процентах:

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_{\text{ист}}} \cdot 100\% . \quad (\text{П4})$$

Относительная погрешность позволяет лучше характеризовать качество измерений, чем абсолютная. Например, одна и та же абсолютная погрешность в 1 мм при измерении длины комнаты не играет роли, а при определении диаметра болта совершенно недопустима. Ясно, что у этих измерений одинаковые абсолютные погрешности, но разные относительные. Как следует из формул (П3) и (П4), для нахождения абсолютной и относительной погрешности измерений нужно знать не только измеренное, но и истинное значение измеряемой величины. Что же такое истинное значение?

Истинное значение физической величины – это значение, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта. Но если истинное значение известно, то зачем производить измерения!

Итак, поскольку истинное значение физической величины неизвестно, то неизвестна и погрешность. Поэтому формулы (П3) и (П4) для практики непригодны. На практике *погрешности не вычисляются, а оцениваются*. Если истинное значение физической величины мы в состоянии знать только приближённо, то и погрешность тоже выражается приближённым значением. Для того, чтобы оценить достоверность измерений, требуется знать степень этого приближения, то есть требуется знать не только результат измерения

и его погрешность, но также и вероятность того, что истинное значение измеряемой величины отличается от измеренного не более, чем на указанную погрешность.

Таким образом, *корректно выполненные измерения должны иметь своим итогом: результат, погрешность и вероятность того, что отклонение измеренной величины от её истинного значения не превышает указанной погрешности.*

В соответствии с ГОСТ 8.011 – 72, результат любого измерения Q должен быть представлен в форме:

$$Q = X \pm \Delta X, \quad P = \dots, \quad (\text{П5})$$

где X – результат измерения, выраженный в единицах измеряемой величины, ΔX – погрешность, выраженная в тех же единицах, P – установленная вероятность, с которой погрешность находится в этих границах.

Замечание о значащих цифрах. Значащими цифрами считаются все цифры числа, кроме крайних нулей, стоящих слева. Количество значащих цифр не всегда совпадает с количеством десятичных знаков после запятой, это разные вещи. Например, числа 784; 78,4; 7,84; 0,784; 0,0784; 0,0000784 обладают одинаковым количеством значащих цифр. Для учебных целей будем оставлять в погрешности, как правило, *одну* значащую цифру. Исключения из этого правила будем делать, когда первая цифра погрешности равна единице. В этом случае будем оставлять в погрешности *две* значащие цифры. Конечный результат полагается округлять до того количества значащих цифр, которое диктует погрешность. Например, если результат получился $X=26,8964$, а погрешность $\Delta X=0,3$, то результат следует округлить до $X=26,9$ и записать $Q=26,9 \pm 0,3$.

Погрешности бывают *систематическими, случайными и грубыми.*

Грубая погрешность измерений, или *промах* – это погрешность, существенно превышающая ожидаемую при данных условиях погрешность. Такие погрешности происходят либо по недосмотру оператора, либо из-за неисправности аппаратуры. Грубых погрешностей следует избегать. Если установлено, что они произошли, соответствующие измерения нужно отбрасывать.

Систематическая погрешность измерения – составляющая погрешности, которая остаётся постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же физической величины. Она обозначается буквой θ , например, θX .

Случайная погрешность измерения – составляющая погрешности, которая изменяется случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины вследствие невозможности учесть многочисленные воздействия при измерении. Она обозначается буквой δ , например, δX .

Обработка результатов прямых измерений

Однократные измерения. Систематическая абсолютная погрешность определяется в основном максимальной погрешностью измерительных приборов $\theta x_{\text{приб}}$. Приборная погрешность *аналоговых приборов* находится через класс точности K прибора:

$$\theta x_{\text{приб}} = \frac{K\% X_{\text{max}}}{100\%}. \quad (\text{П6})$$

Класс точности прибора – это выраженное в процентах отношение абсолютной систематической погрешности к пределу измерений x_{max} по его шкале. Класс точности указывается на шкале прибора.

Относительная систематическая погрешность цифровых приборов. указывается в паспорте прибора и выражается в процентах от измеренного значения. Однако чаще всего погрешность измерения определяется фактором нестабильности входного сигнала. Можно заметить, что показания цифрового прибора флуктуируют относительно какой-то средней величины, которую можно принять за показание прибора, а среднее отклонение от неё может оказаться больше чем погрешность прибора. Таким образом, погрешность измерения оценивается как цена деления минимального стабильного разряда.

Систематическая погрешность измерения расстояний. Эта погрешность может определяться ценой деления шкалы линейки или экрана осциллографа. Обычно принимается, что систематическая погрешность расстояния равна половине цены деления шкалы: $\theta l = C/2$. Однако, это не всегда так. Например, необходимо измерить расстояние АВ на экране осциллографа и оценить погрешность измерения (рис. П1). Это расстояние $l \approx 18$ мм. Учитывая, что толщина луча осциллографа составляет не менее 1 мм и цена деления составляет 1 мм, можно оценить погрешность так: $\theta l = 1$ мм.

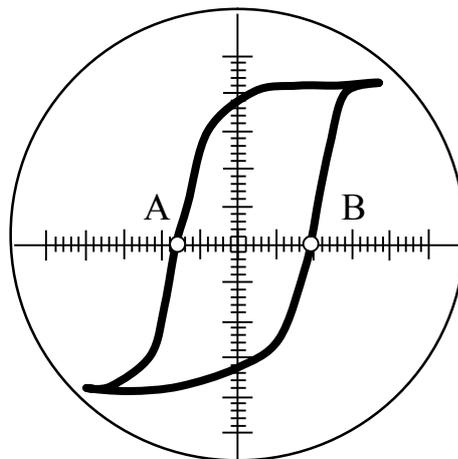


Рис. П1. Осциллограмма

Обработка результатов многократных прямых измерений, содержащих случайные погрешности

Случайные величины, к которым относятся случайные погрешности, изучаются в теории вероятностей. Мы рассмотрим без доказательства основные свойства и основные правила обращения с ними в том объёме, который необходим для обработки результатов измерений, полученных в лаборатории. Будем предполагать, что систематические погрешности либо пренебрежимо малы, либо исключены из результатов отдельных измерений. Каждое отдельно выполненное прямое измерение называется *наблюдением*. Пусть имеется N результатов наблюдений X_1, X_2, \dots, X_N некоторой физической величины X , полученные в одинаковых условиях. За результат измерения принимают среднее арифметическое результатов наблюдений:

$$\langle X \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i. \quad (\text{П7})$$

Этому результату присваивается среднеквадратичное отклонение S , определяемое как

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \langle X \rangle)^2}{N-1}}. \quad (\text{П8})$$

В большинстве тех случаев, с которыми мы будем иметь дело, этому результату следует приписать погрешность, определяемую формулой:

$$\delta X = t_{P,N} \frac{S}{\sqrt{N}} = t_{P,N} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \langle X \rangle)^2}{N(N-1)}}, \quad (\text{П9})$$

где $\langle X \rangle$ – среднее арифметическое, определяемое по формуле (П7); X_i – результат i -го наблюдения; N – количество наблюдений; $t_{P,N}$ – коэффициент Стьюдента для данного числа измерений N и заданной доверительной вероятности P (определяется по табл. П1).

Коэффициенты Стьюдента

Таблица П1

N	3	4	5	6	8	10	20
$P = 0,90$	2,9	2,4	2,1	2,0	1,9	1,8	1,7
$P = 0,95$	4,5	3,2	2,8	2,6	2,4	2,3	2,1

Доверительную вероятность P (вероятность того, что погрешность не выйдет за границы доверительного интервала $(-\delta X, +\delta X)$) рекомендуется выбирать 0,90 или 0,95.

Обработка результатов косвенных измерений

Пусть измеряемая величина выражается формулой

$$Q = f(X, Y, Z). \quad (\text{П10})$$

Погрешность косвенного измерения величины Q зависит от погрешностей измерений величин X, Y, Z . Это справедливо как для случайных, так и для систематических погрешностей. Будем считать, что систематические погрешности исключены, а случайные не зависят друг от друга. Значение измеряемой величины оценивают по формуле

$$Q = f(\langle X \rangle, \langle Y \rangle, \langle Z \rangle), \quad (\text{П11})$$

где $\langle X \rangle, \langle Y \rangle, \langle Z \rangle$ – средние значения величин X, Y, Z , подвергаемых прямым измерениям. Если дать приращения аргументам функции (П10), то полный дифференциал величины Q будет равен:

$$dQ = \frac{\partial Q}{\partial X} dX + \frac{\partial Q}{\partial Y} dY + \frac{\partial Q}{\partial Z} dZ, \quad (\text{П12})$$

где $\frac{\partial Q}{\partial X}, \frac{\partial Q}{\partial Y}, \frac{\partial Q}{\partial Z}$ – частные производные Q по X, Y, Z . Разделим выражение (П12) на Q :

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{1}{Q} \frac{\partial Q}{\partial X} dX + \frac{1}{Q} \frac{\partial Q}{\partial Y} dY + \frac{1}{Q} \frac{\partial Q}{\partial Z} dZ. \quad (\text{П13})$$

Учитывая, что

$$\frac{dQ}{Q} = d(\ln Q) \quad (\text{П14})$$

получим:

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{\partial(\ln Q)}{\partial X} dX + \frac{\partial(\ln Q)}{\partial Y} dY + \frac{\partial(\ln Q)}{\partial Z} dZ. \quad (\text{П15})$$

Бесконечно малые величины dX, dY, dZ в (П14) заменяем соответствующими погрешностями прямых измерений $\delta X, \delta Y, \delta Z$ (конечные малые величины) и берём геометрическую сумму слагаемых. В результате получается выражение:

$$\frac{\delta Q}{Q} = \sqrt{\left(\frac{\partial(\ln Q)}{\partial X} \delta X\right)^2 + \left(\frac{\partial(\ln Q)}{\partial Y} \delta Y\right)^2 + \left(\frac{\partial(\ln Q)}{\partial Z} \delta Z\right)^2}. \quad (\text{П16})$$

Используя формулу (П12), получаем выражение для абсолютной случайной погрешности косвенного измерения:

$$\delta Q = \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial X} \delta X\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial Y} \delta Y\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial Z} \delta Z\right)^2}, \quad (\text{П17})$$

В частном случае, когда функциональная зависимость имеет вид

$$Q = kX^\alpha Y^\beta Z^\gamma, \text{ где } k, \alpha, \beta, \gamma = \text{const}, \quad (\text{П18})$$

формула для относительной случайной погрешности становится такой:

$$\frac{\delta Q}{Q} = \sqrt{\alpha^2 \left(\frac{\delta X}{X}\right)^2 + \beta^2 \left(\frac{\delta Y}{Y}\right)^2 + \gamma^2 \left(\frac{\delta Z}{Z}\right)^2}, \quad (\text{П19})$$

где $\frac{\delta X}{X}$, $\frac{\delta Y}{Y}$, $\frac{\delta Z}{Z}$ – относительные случайные погрешности прямых измерений соответствующих величин.

Рассмотренный подход применим не только к случайным, но и к неисключённым систематическим погрешностям косвенных измерений. Относительную систематическую погрешность в этом случае оценивают по формуле:

$$\frac{\theta Q}{Q} = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\partial(\ln Q)}{\partial X} \theta X\right)^2 + \left(\frac{\partial(\ln Q)}{\partial Y} \theta Y\right)^2 + \left(\frac{\partial(\ln Q)}{\partial Z} \theta Z\right)^2}. \quad (\text{П20})$$

Здесь θX , θY , θZ – границы соответствующих систематических погрешностей прямых измерений. Коэффициент 1,1 перед квадратным корнем, в соответствии с ГОСТ 8.207-76, определяется принятой доверительной вероятностью 0,95 в предположении равномерного распределения неисключённых систематических погрешностей. В случае (П16) относительная систематическая погрешность косвенных измерений принимает вид

$$\frac{\theta Q}{Q} = 1,1 \sqrt{\alpha^2 \left(\frac{\theta X}{X}\right)^2 + \beta^2 \left(\frac{\theta Y}{Y}\right)^2 + \gamma^2 \left(\frac{\theta Z}{Z}\right)^2}, \quad (\text{П21})$$

где $\frac{\theta X}{X}$, $\frac{\theta Y}{Y}$, $\frac{\theta Z}{Z}$ – относительные случайные погрешности прямых измерений соответствующих величин.

Оценка суммарной погрешности

Если систематическая погрешность θQ и доверительная граница случайной погрешности δQ близки по значению, то *верхняя доверительная граница* суммарной погрешности определяется по формуле:

– абсолютная $\Delta_Q = \sqrt{(\theta Q)^2 + (\delta Q)^2},$ (П22)

– относительная $E = \frac{\Delta_Q}{\langle Q \rangle}.$ (П23)

Если же одна из погрешностей в три и более раза превосходит другую, то в качестве суммарной погрешности берется большая из них.

Графический способ оценки случайной погрешности

Пусть функция $z = kx + b$ линейная или её можно свести к линейной. Случайные погрешности δk и δb можно определить *графически*.

По экспериментальным точкам можно провести прямую наилучшего соответствия (рис. П2). Оценим случайную погрешность δb величины b . Для этого проведём параллельно экспериментальной прямой по обе стороны две прямые A и B по возможности ближе так, чтобы большинство точек, (кроме промахов) оказалось внутри. Тогда величину $\frac{1}{2}(b_A - b_B)$ можно трактовать как интервал, равный $2S$ – удвоенной выборочной средней квадратичной погрешности. Во внутрь этого интервала попадает не менее 95% измерений. С другой стороны, случайная абсолютная погрешность величины b равна (П8). Для оценки случайной погрешности δk углового коэффициента k , среднее значение которого находится из треугольника 1–2–3 (рис. П3)

$$\delta b = t_{P,N} \frac{S}{\sqrt{N}} = t_{P,N} \frac{z_A - z_B}{4\sqrt{N}}. \quad (\text{П23})$$

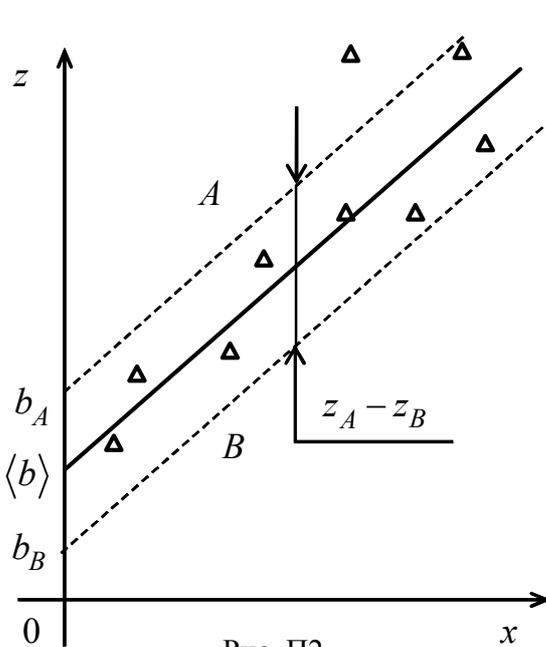


Рис. П2

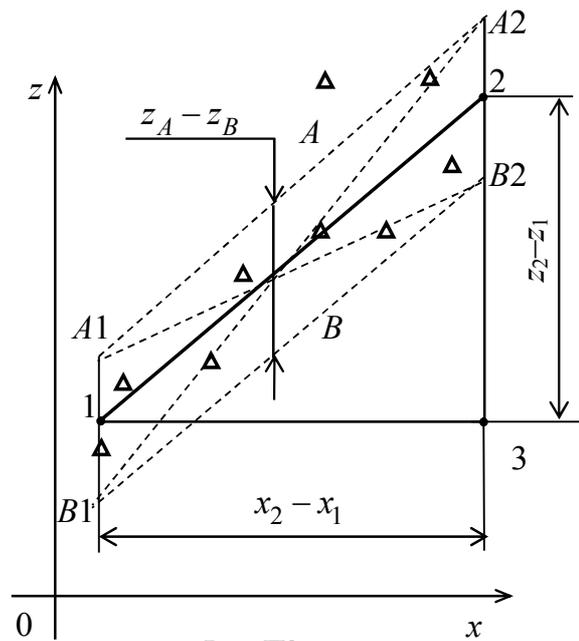


Рис. П3

$$\langle k \rangle = \frac{z_2 - z_1}{x_2 - x_1}. \quad (\text{П24})$$

Проводят параллельно экспериментальной прямой 1–2 две линии A и B так, чтобы большинство точек оказалось внутри. Крайние точки $B1-A2$, $A1-B2$ соединяют крест-накрест. Это экспериментальные прямые, проведенные под максимально и минимально возможными углами. Их угловые коэффициенты:

$$k_{\max} = \frac{z_{A2} - z_{B1}}{x_2 - x_1}, \quad k_{\min} = \frac{z_{B2} - z_{A1}}{x_2 - x_1}. \quad (\text{П25})$$

Эти величины можно трактовать как наибольшее и наименьшее значение углового коэффициента k , отличающегося от среднего на величину $2S$. Тогда его случайная погрешность

$$\delta k = t_{P,N} \frac{S}{\sqrt{N}} = t_{P,N} \frac{k_{\max} - k_{\min}}{4\sqrt{N}}. \quad (\text{П26})$$

Можно упростить оценочную формулу, если подставить значения k_{\max} и k_{\min} из (П25):

$$\delta k = t_{P,N} \frac{z_A - z_B}{2\sqrt{N}(x_2 - x_1)}, \quad (\text{П27})$$

здесь $(z_A - z_B)$ – расстояние между вспомогательными прямыми (рис. П3).

2. Правила построения и обработки графиков

График – самое наглядное представление результатов эксперимента [8]. Графическое представление облегчает сравнение величин, позволяет легко обнаружить наличие характерных точек (экстремумов, точек перегиба), провести интерполяцию, экстраполяцию, обнаружить промах (рис. П4, П5).

1. График выполняется на миллиметровой бумаге размером с тетрадный лист (А5).

2. Прочертить координатные оси. Для независимой переменной (аргумента) используют ось абсцисс, для функции – ось ординат. Масштаб нужно выбирать так, чтобы экспериментальные точки заняли весь лист. Оси надо равномерно разметить и поставить числа напротив меток.

3. В конце оси указать откладываемую величину и её размерность, а также порядок масштаба ($10^{\pm k}$, где k – целое число).

Вольтамперная характеристика вакуумного диода

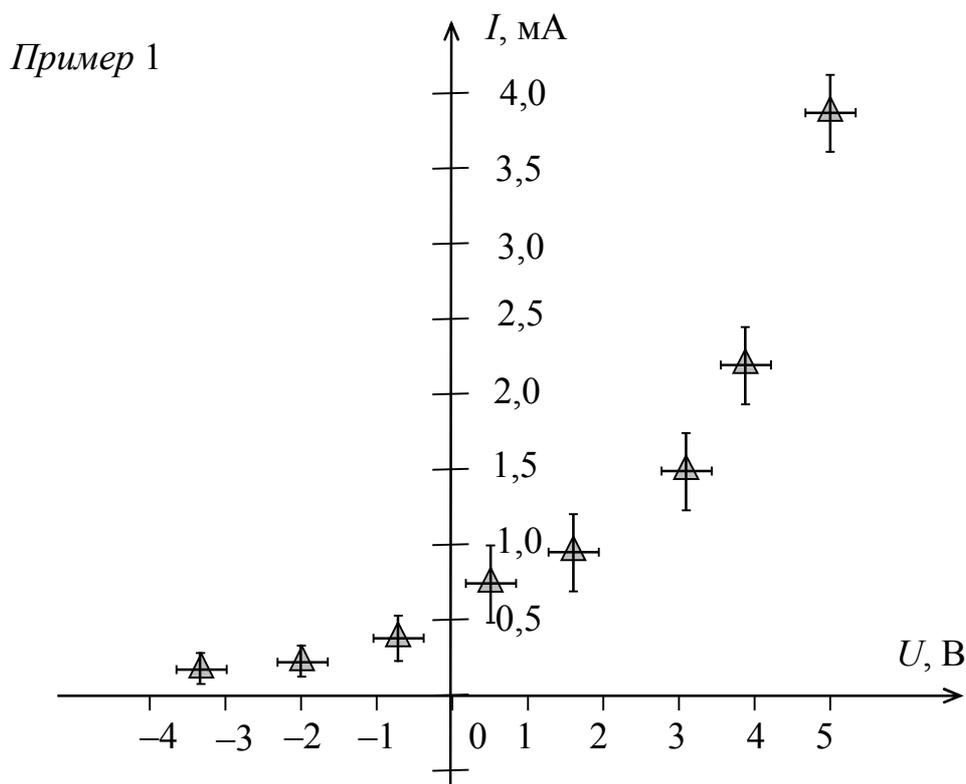


Рис. П4. График 1

4. Экспериментальные точки на график нужно наносить тщательно и точно, обводя их каким-либо знаком: \circ , \times , \square , $+$. Числа, соответствующие экспериментальным точкам, на осях не откладывать, т.к. это затрудняет работу с графиком. Если известны погрешности величин, то можно их указать на экспериментальной точке в виде креста, по горизонтали которого откладывают удвоенную погрешность аргумента, а по вертикали — удвоенную погрешность функции.

5. Экспериментальные точки не соединять. В некоторых случаях необходимо провести прямую наилучшего соответствия или теоретически рассчитанную кривую. Прямая должна быть проведена так, чтобы отклонения от неё соответствующих экспериментальных точек было минимальным. При этом число точек под прямой должно быть приблизительно равным числу точек над прямой.

6. Вверху необходимо написать название графика.

Зависимость тока от напряжения на различных резисторах

Пример 2

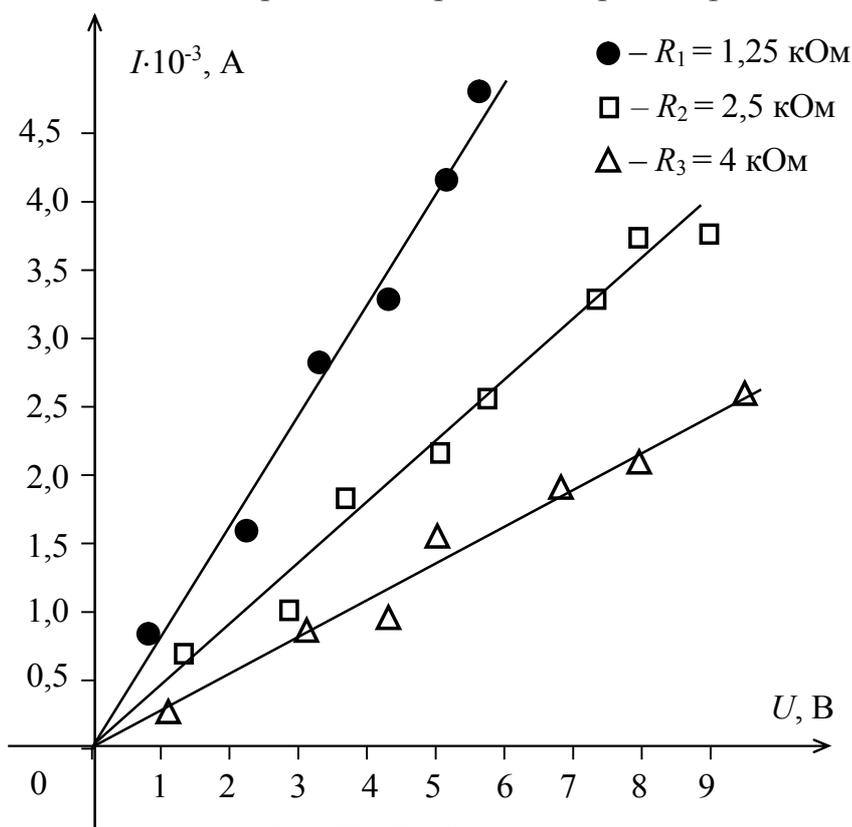


Рис. П5. График 2

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рязанов, Г.А. Опыты и моделирование при изучении электростатического поля / Г.А. Рязанов. – М.: Наука, 1966. – 200 с.
2. ГОСТ 19693-74. Материалы магнитные. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 32 с.
3. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 7 с.
4. Пустовалов, Г.Е. Погрешности измерений. Методическая разработка по общему физическому практикуму / Г.Е. Пустовалов // М.: Изд-во МГУ, 2012. – 19 с.
5. Корнфельд, М.И. Погрешность и надежность простейших экспериментов / М.И. Корнфельд // УФН. – 1965. – Т. 85. – С. 533.
6. Зайдель, А.Н. Погрешности измерения физических величин / А.Н. Зайдель. – Л.: Высшая школа, 1985. – 105 с.
7. Касандрова, О.Н. Обработка результатов измерений / О.Н. Касандрова, В.В. Лебедев – М.: Наука, 1970. – 195 с.
8. Культура построения графиков. – https://edu-potential.ru/images/catalog/physics/Kultura_postroeniya_grafikov.pdf

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторный комплекс «Электричество и магнетизм»	3
Лабораторная работа Э-1. Изучение электростатического поля методом моделирования	8
Лабораторная работа Э-2. Определение электроёмкости конденсатора	15
Лабораторная работа Э-3. Определение удельного сопротивления проводника	24
Лабораторная работа Э-4. Изучение температурной зависимости сопротивления металла и полупроводника	31
Лабораторная работа Э-5. Изучение процесса разряда конденсатора.....	38
Лабораторная работа Э-6. Определение удельного заряда электрона методом магнетрона	42
Лабораторная работа Э-7. Изучение эффекта холла в полупроводниках	49
Лабораторная работа Э-8. Изучение свойств ферромагнетика с помощью петли гистерезиса	55
Лабораторная работа Э-9. Определение характеристики ферромагнетика методом Столетова	64
Лабораторная работа Э-10. Изучение магнитных свойств ферромагнетика	68
Лабораторная работа Э-11. Определение температуры кюри и магнитного момента кристаллической ячейки ферромагнетика	74
Лабораторная работа Э-12. Изучение электромагнитных затухающих колебаний	77
Лабораторная работа Э-13. Исследование явления резонанса в электрических цепях переменного тока.....	86
ПРИЛОЖЕНИЕ	90
1. Погрешности измерений физических величин	90
2. Правила построения и обработки графиков.....	98
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	100