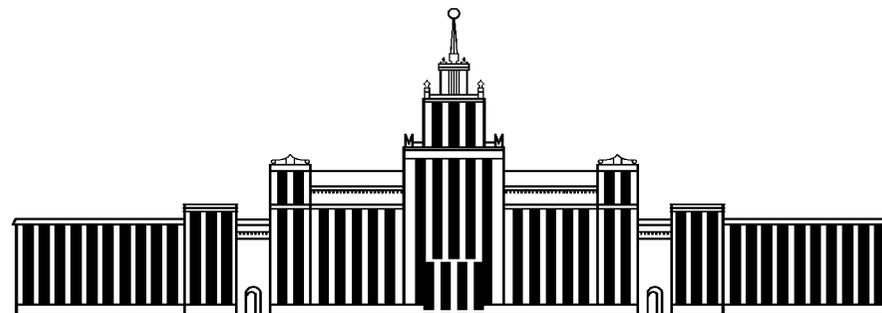

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

537(07)

Ш957

А.А. Шульгинов, Ю.В. Петров, Д.Г. Кожевников

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Учебное пособие для выполнения
лабораторных работ

Челябинск
2011

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра общей и экспериментальной физики

537(07)
Ш957

А.А. Шульгинов, Ю.В. Петров, Д.Г. Кожевников

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Учебное пособие для выполнения
лабораторных работ

Под редакцией А.А. Шульгинова

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2011

УДК 537(076.5)+537.6(076.5)
Ш957

Одобрено
учебно-методической комиссией
физического факультета

Рецензенты:
д.х.н., проф. А.В. Толчев, А.В. Шушарин

Шульгинов, А.А.
Ш957 Электричество и магнетизм: учебное пособие для выполнения лабораторных работ / А.А. Шульгинов, Ю.В. Петров, Д.Г. Кожевников; под ред. А.А. Шульгинова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 132 с.

Учебное пособие написано в соответствии с программой по разделу «Электричество и магнетизм». Предназначено для подготовки к выполнению лабораторных работ и обработке результатов физического эксперимента. Содержит описание пятнадцати лабораторных работ. В каждой работе приводятся сведения по теории, необходимые для экспериментальных исследований. Особое внимание уделяется оценке погрешностей измеряемых величин и правильности оформления отчётов по лабораторным работам.

УДК 537(076.5)+537.6(076.5)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2011

ВВЕДЕНИЕ

Главными задачами лабораторных работ являются экспериментальное подтверждение основных законов электромагнетизма, закрепление и совершенствование навыков работы с электроизмерительными приборами, обработка и анализ результатов экспериментов, оценка погрешностей измерений.

Основные правила техники безопасности

При работе с любым электрооборудованием всегда следует помнить о вероятной опасности поражения электрическим током.

Для человека смертельным считается ток более 0,1 А. Сетевое напряжение 220 В является опасным для жизни, однако на коже человека существуют точки, сопротивление между которыми на несколько порядков меньше сопротивления окружающих тканей, поэтому смертельно опасный ток может установиться между этими точками при значительно меньших напряжениях.

В целях повышения Вашей личной безопасности и безопасности оборудования:

1. Перед сборкой цепи проверьте, чтобы все приборы на рабочем столе были выключены.

2. 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.).

3. Сборку электрической цепи ведите *по контурам*, начиная с основного (содержащего источник питания); мультиметр, образующий вспомогательный контур, подключайте в последнюю очередь.

4. Перед подключением мультиметров чётко уясните, какую электрическую величину и в каком диапазоне значений Вы собираетесь измерить. В зависимости от этого продуманно и осознанно установите переключателем род работы (режим) прибора (измерение постоянного или переменного напряжения или тока, сопротивления, ёмкости или температуры) и диапазон значений измеряемой величины. Если в процессе работы прибор выйдет за пределы установленного диапазона, показывая перегрузку, переключите предел измерения на соседний, более грубый.

5. ***Обязательно проверяйте собранную схему вместе с преподавателем.***

6. 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.

7. При работе с осциллографом не допускайте сведения изображения в яркую точку: электронный луч может прожечь люминофор экрана! В таких случаях всегда уменьшайте яркость до минимальной.

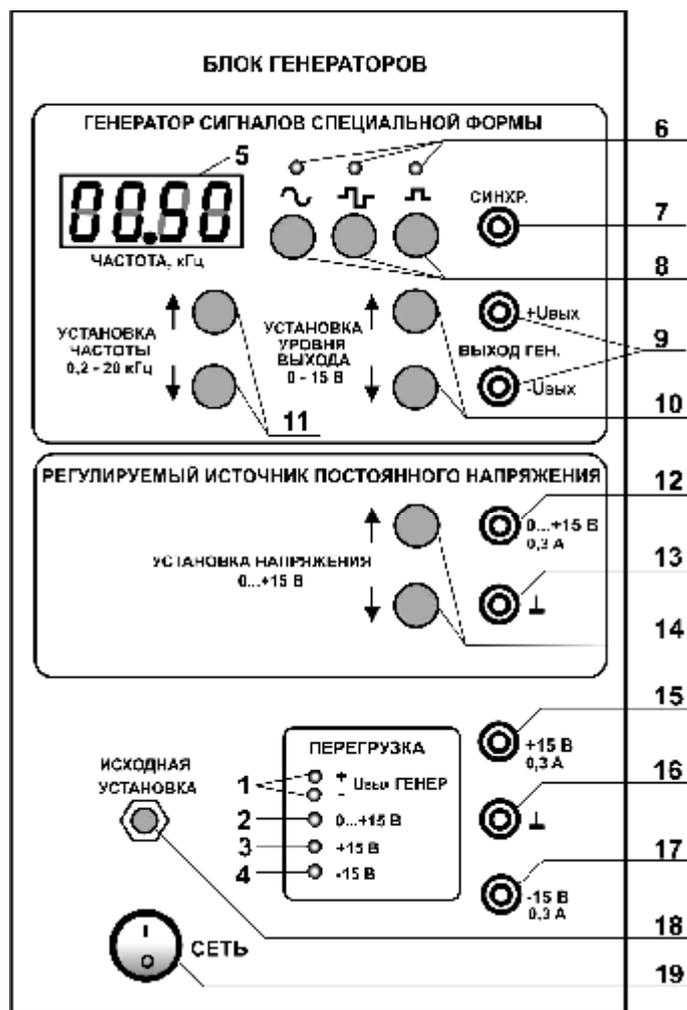
8. В подключенной к источнику напряжения цепи не касайтесь неизолированных металлических контактов.

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.

ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ»

Комплекс состоит из блока генераторов напряжений, наборного поля, блока мультиметров, блока моделирования полей, набора миниблоков и набора слабопроводящих пластин с электродами.



Общий вид блока генераторов напряжений показан на рис. В1. Блок состоит из генератора сигналов специальной формы, регулируемого источника постоянного напряжения и двух нерегулируемых источников стабилизированного постоянного напряжения.

Рис. В1. Блок генераторов напряжений:

- 1 – индикатор перегрузки генератора сигналов специальной формы;
- 2 – индикатор перегрузки регулируемого источника постоянного напряжения «0 ... 15 В»;
- 3 – индикатор перегрузки стабилизированного напряжения +15 В»;
- 4 – индикатор перегрузки стабилизированного напряжения «-15 В»;
- 5 – индикатор частоты;
- 6 – индикатор выбранной формы сигнала;
- 7 – выход синхронизации осциллографа (прямоугольные импульсы амплитудой «+5 В»);

8 – кнопки переключения формы сигнала:

- синусоидальная;
- биполярные импульсы «-15 В», «+15 В»;
- униполярные импульсы «+10 В»;

9 – выходное напряжение генератора сигналов специальной формы;

10 – кнопки регулировки амплитуды напряжения генератора сигналов специальной формы;

11 – кнопки регулировки частоты;

- 12 – регулируемое напряжение питания : «0...+15 В», максимально допустимый ток 0,3 А;
- 13 – нулевой выход (земля);
- 14 – кнопки регулировки постоянного напряжения;
- 15 – стабилизированное напряжение «+15 В», максимально допустимый ток 0,3 А;
- 16 – нулевой выход (земля);
- 17 – стабилизированное напряжение «-15 В», максимально допустимый ток 0,3 А;
- 18 – кнопка исходной установки блока генераторов:
выход источника постоянного напряжения – 0 В;
выходное напряжение генератора сигналов специальной формы – синусоидальное, частота 0,5 кГц, амплитуда 0 В;
- 19 – выключатель питания («сети»)

Генератор сигналов специальной формы (ГССФ)

Генератор (рис. В1) предназначен для получения напряжений частотой от 0,05 до 20 кГц различной формы и регулируемой амплитуды. Генератор может выдавать три вида напряжений: синусоидальное (амплитуда -15...+15 В), биполярные импульсы (амплитуда -15...+15 В, длительность импульса равна половине периода), униполярные импульсы (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 стабильного изображения формы выходного напряжения на осциллографе в генераторе предусмотрены импульсы синхронизации (прямоугольные, заданной частоты, амплитудой +5 В, длительность импульса равна половине периода), которые можно снимать с выхода 7.

Генератор имеет защиту от перегрузки и индикаторы перегрузки 1. В случае срабатывания любого из индикаторов перегрузки необходимо выключить блок из сети и выяснить причину срабатывания: проверить схему, уменьшить регулируемое напряжение.

Регулируемый источник постоянного напряжения (РИПН)

Источник (рис. В1) предназначен для получения стабилизированного постоянного напряжения -15 В, +15 В (необходимого для работы интегратора тока, вакуумной лампы и датчика Холла), и регулируемого постоянного напряжения 0...+15 В, которое регулируют кнопками 14. Генератор имеет защиту от перегрузки и индикаторы перегрузки 2, 3, 4. В случае срабатывания любого из индикаторов перегрузки необходимо выключить блок из сети и выяснить причину срабатывания: проверить схему, уменьшить регулируемое напряжение.

Наборное поле

Наборное поле (рис. В2) предназначено для сборки электрических схем. Линии на наборном поле показывают электрически соединённые гнезда.

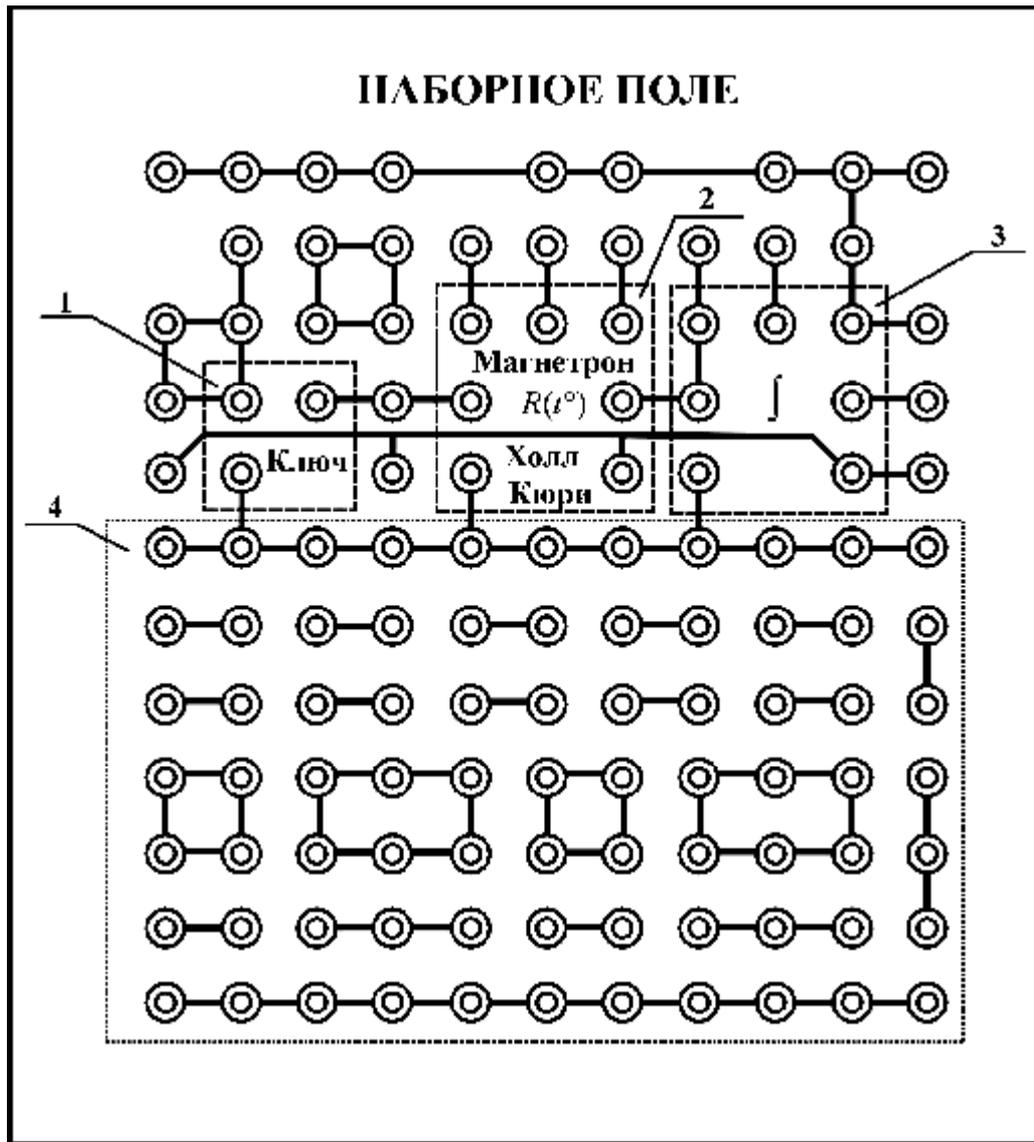


Рис. В2. Наборное поле:

- 1 – место для подключения миниблока «Ключ»;
- 2 – место для подключения миниблоков «Исследование температурной зависимости сопротивления проводника и полупроводника», «Эффект Холла», «Ферромагнетик», «Магнетрон»;
- 3 – место для подключения миниблока «Интегратор тока»;
- 4 – поле для подключения миниблоков

Блок мультиметров

Блок мультиметров состоит из двух мультиметров с источниками питания. Мультиметр предназначен для измерения постоянного и переменного напряжений, постоянного и переменного токов, сопротивления, электроёмкости и температуры. Общий вид мультиметра представлен на рис. В3.

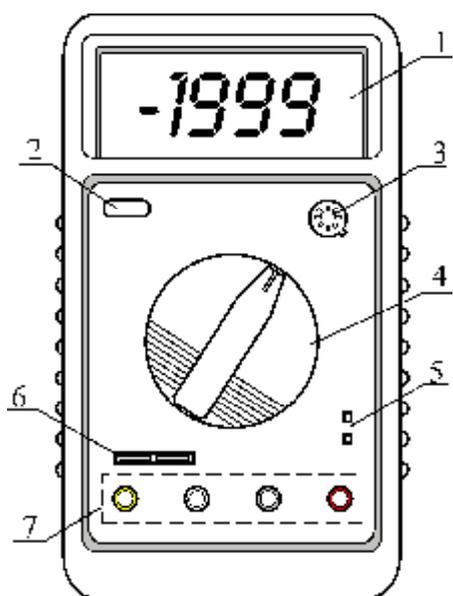


Рис. В3. Общий вид мультиметра:
 1 – дисплей; 2 – выключатель питания; 3 – гнездо для проверки транзисторов; 4 – переключатель режимов (рис. В4); 5 – разъем для подключения термопары; 6 – разъем для подключения конденсатора; 7 – входы для измерения тока, напряжения, сопротивления (рис. В5)

Рис. В4. Переключатель режимов

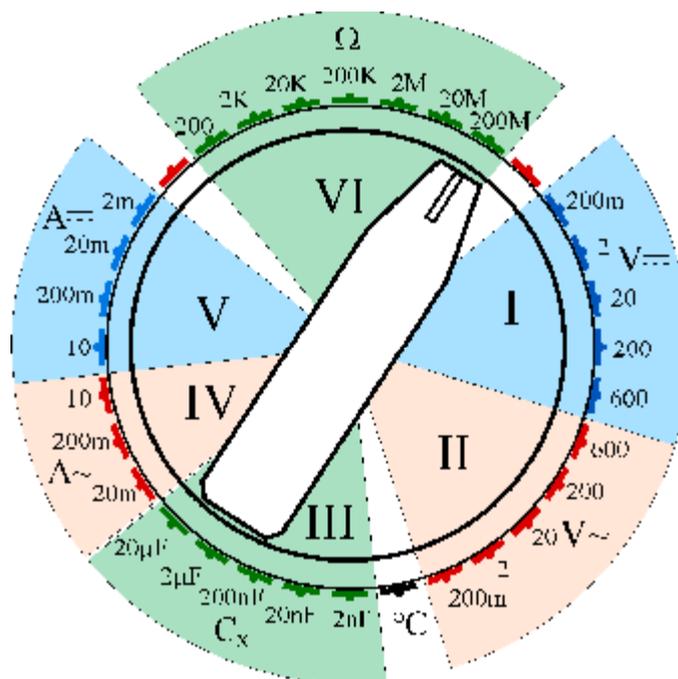
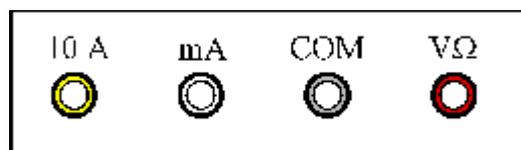


Рис. В5. Измерительные входы мультиметра:

10 A – вход для измерения тока до 10 А;

mA – вход для измерения тока до 200 мА;

COM – общий вход («земля»);

VW – вход для измерения напряжения и сопротивления

При использовании прибора 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. В3).

Измерение напряжения

Подсоедините один провод к входу **COM** (рис. В5), второй к входу **VW**. Установите переключатель режимов (рис. В4) в положение **V $\overline{\sim}$** (область I) для измерения постоянного напряжения или в положение **V \sim** (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 $U = 0,2; 2; 20; 200; 600$ В.

Измерение тока

Подсоедините один провод к входу **COM**, второй к входу **mA** или **10 A** (для измерения больших токов). Установите переключатель режимов в положение **A $\overline{\sim}$** (область V) для измерения постоянного тока или в положение **A \sim** (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 $I = 2; 20; 200$ мА; 10 А, постоянного тока $I = 2; 20; 200$ мА; 10 А.

Измерение сопротивления

Подсоедините один провод к входу **COM** второй к входу **VW**. Установите переключатель режимов в положение **W** (область VI) с учётом требуемого диапазона измерений. Подсоедините провода к измеряемому сопротивлению.

Диапазоны измерения сопротивлений $R = 200$ Ом; 2 кОм; 20 кОм; 200 кОм; 2 МОм; 20 МОм; 200 МОм.

Измерение ёмкости

Подсоедините провода к разъёму 6 (рис. В3). Установите переключатель режимов в положение **C $_x$** (область III) с учётом требуемого диапазона измерений.

Диапазон измерения ёмкости $C = 2; 20; 200$ нФ; 2; 20 мкФ. Систематическая погрешность измерений – 4 % от измеренного значения.

Измерение температуры

Установите переключатель режимов в положение $^{\circ}\text{C}$, при этом на дисплее будет показана температура окружающей среды. Вставьте провода от термопары в разъём 5 (рис. В3), при этом следует соблюдать полярность подсоединения. Систематическая погрешность измерений – 2% от измеренного значения.

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 напряженности 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 пробный 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 пробного заряда, помещённого в данную точку поля

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

Следует заметить, что практический 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.

Перемещение пробного заряда по эквипотенциальной поверхности не требует совершения работы, так как потенциал остается величиной постоянной, то есть

$$\delta A = Q_{\text{проб}} d\phi = 0. \quad (1.3)$$

С другой стороны, эту работу можно найти по формуле

$$\delta A = \vec{F} \cdot d\vec{l} = F dl \cos \alpha = Q_{\text{проб}} E dl \cos \alpha, \quad (1.4)$$

где α – угол между векторами \vec{E} и $d\vec{l}$ (рис. 1.1). \vec{n} – вектор нормали к эквипотенциальной поверхности. Так как напряжённость и пробный заряд отличны от нуля, то нулю может быть равен только $\cos \alpha$.

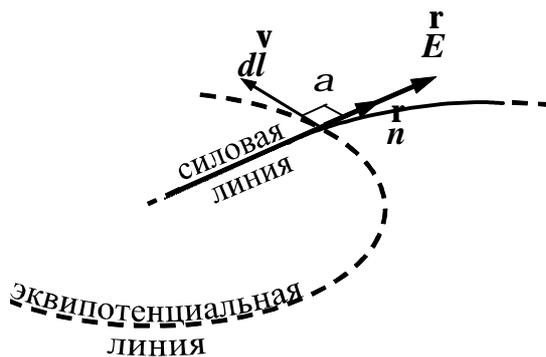


Рис. 1.1. Эквипотенциальные и силовые линии электрического поля

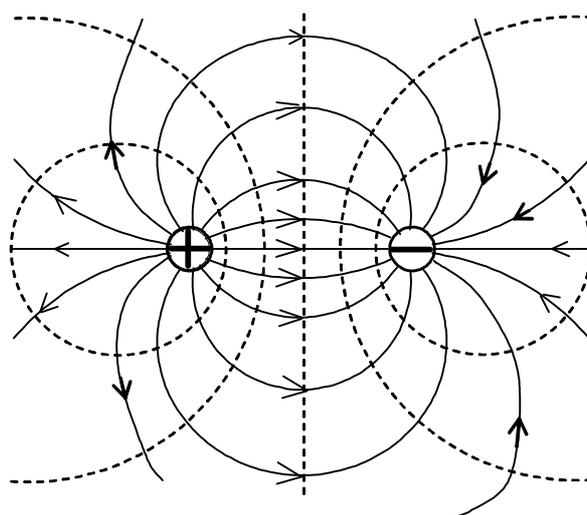


Рис. 1.2. Пример построения силовых линий

Значит, угол $\alpha = 90^\circ$. Таким образом, *силовые линии всегда перпендикулярны к эквипотенциальным поверхностям в точках их пересечения*.

На рис. 1.2 изображено плоское сечение электростатического поля двух разноимённо заряженных шаров. Силовые линии проведены здесь сплошными линиями, а эквипотенциальные линии – пунктирными.

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.

Потенциал наиболее быстро возрастает в направлении нормали \vec{n} к эквипотенциальной поверхности, поэтому можно записать

$$\text{grad } \varphi = \frac{\partial \varphi}{\partial n} \vec{n}, \quad (1.5)$$

где $\text{grad } \varphi$ – векторная величина, направление которой совпадает с направлением быстрейшего увеличения потенциала. Эта величина называется *градиентом потенциала*. Между напряжённостью и разностью потенциалов в каждой точке поля существует связь

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi, \quad (1.6)$$

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

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} \approx \frac{\Delta\varphi}{\Delta n}, \quad (1.7)$$

по формуле

$$E = \frac{\Delta\varphi}{\Delta n} \quad (1.8)$$

можно найти модуль вектора напряжённости на участке поля Δn .

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 природы. 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 [1].

Известно, что электрическое поле стационарного тока в слабопроводящей однородной среде является потенциальным. Поэтому его можно использовать для моделирования электростатического поля заряженных тел в вакууме. 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 упростится, 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, вольтметр.

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.

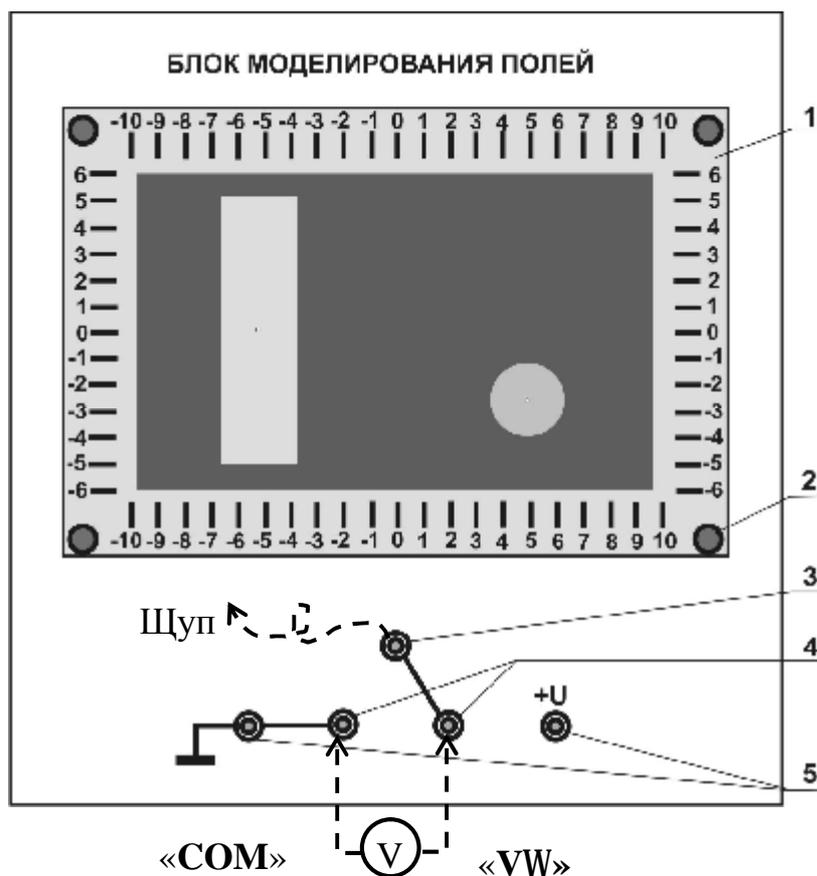


Рис. 1.3. Блок моделирования полей:
 1 – пластина с графитовым покрытием, координатной сеткой и электродами;
 2 – крепление пластины;
 3 – вход для подключения зонда (щупа);
 4 – входы для подключения вольтметра;
 5 – входы для подключения регулируемого источника постоянного напряжения

Для исследования электростатического поля собирают электрическую цепь по схеме, представленной на рис. 1.4.

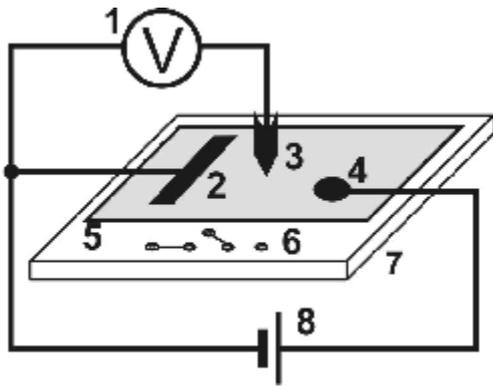


Рис. 1.4. Электрическая схема:
 1 – вольтметр или мультиметр (режим V_{DC} 20 В, входы COM, VW); 2, 4 – электроды; 3 – зонд; 5 – слабопроводящая пластина; 6 – входы для подключения блока (рис. 1.3); 7 – блок моделирования поля; 8 – регулируемый источник постоянного напряжения

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 один из мультиметров. Для этого переключатель рода работ мультиметра перевести в положение « V_{DC} » и установить предел измерения «20 В».
3. Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 1.4. Для этого выбрать два самых длинных провода и соединить ими выходы регулируемого источника постоянного напряжения « \wedge » и «0 ... +15 В» с соответствующими контактами 5 (рис. 1.3). Затем соединить проводами входы одного из мультиметров и «VW» с соответствующими контактами 4 (рис. 1.3). Один провод соединить с контактом 3. Это будет зонд (щуп) для исследования поля.
4. Кнопками «СЕТЬ» включить блок генераторов напряжения и блок мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка».
5. Кнопкой D «Установка напряжения 0 ... +15 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 ... +15 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:

$$\Delta\varphi = \frac{U}{N+1}, \text{ В.} \quad (1.9)$$

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 из сети** блоки питания генераторов напряжений и мультиметров.

Обработка результатов измерений

1. Используя свойство ортогональности касательных к эквипотенциальным и силовым линиям электростатического поля, провести не менее пяти силовых линий. Их нужно проводить плавными кривыми без резких перегибов и обязательно указать их направление. Учтите, что с поверхностью электродов силовые линии должны пересекаться под прямым углом.

2. Выбрать точку на листе для оценки напряжённости поля в этой области. Желательно, чтобы точка лежала на одной из силовых линий между двумя эквипотенциальными линиями. Отметить её на листе.

3. Измерить расстояние Δn 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:

$$\gamma = \frac{\theta E}{E} = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\theta(\Delta\varphi)}{\Delta\varphi}\right)^2 + \left(\frac{\theta(\Delta n)}{\Delta n}\right)^2}, \% \quad (1.10)$$

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 (см. табл. 1.1).

7. Определить систематическую абсолютную погрешность по формуле:

$$\theta E = \frac{\gamma}{100\%} \cdot E. \quad (1.11)$$

ОТЧЁТ
по лабораторной работе
«Изучение электростатического поля методом моделирования»

Исполнитель: студент(ка) гр. _____

Цель работы: ...

Краткое описание метода исследования:...

Расчетные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать единицы их измерения в системе СИ).

Оборудование: ...

Средства измерений и их характеристики

Таблица 1.1

Наименование прибора	Предел допускаемой относительной погрешности (в % от измеренного значения)	Абсолютная систематическая погрешность
Вольтметр	$\frac{\theta(\Delta\varphi)}{\Delta\varphi} = 0,5 \%$	—
Линейка	$\frac{\theta(\Delta n)}{\Delta n} \cdot 100\% = \dots \%$	$\theta(\Delta n) = \dots$ (Оценивается как половина цены деления шкалы линейки)

Расчёты

1. $\Delta n = \dots$ м (расстояние между соседними эквипотенциальными линиями, измеренное по силовой линии);

2. $\Delta\varphi = \dots$ В;

3. $E = \dots = \dots = \dots$ В/м; (1.8)

4. $\gamma = \dots = \dots = \dots$ %; (1.10)

5. $\theta E = \dots = \dots = \dots$ В/м; (1.11)

6. Окончательный результат: $E = \dots \pm \dots$ В/м, $\gamma = \dots$ %.

Изобразить вектор напряжённости электрического поля на графике.

7. Вывод.

Написать формулу, показать расчёт и записать результат!

Примечание. Графическое изображение модели электростатического поля прилагается к отчёту.

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 как

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

где Q – заряд одной из его обкладок, $\varphi_2 - \varphi_1 = U$ – разность потенциалов, которая в данном случае совпадает с напряжением между обкладками [2–4].

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

$$C^{\text{парал}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (2.2)$$

Ёмкость последовательного соединения конденсаторов находится из формулы

$$\frac{1}{C^{\text{посл}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (2.3)$$

Описание метода измерения

Из формулы (2.1) видно, что для определения ёмкости конденсатора необходимо знать его заряд и напряжение. Напряжение измеряют непосредственно 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 интегрирова-

нии тока $I(t) = \frac{dQ}{dt}$ по времени: $Q = \int_0^t I(t) dt$.

Значение заряда, прошедшего через интегратор, пропорционально его выходному напряжению $U^{\text{инт}}$:

$$Q = b \times U^{\text{инт}}, \quad (2.4)$$

где b – градуировочная постоянная.

Из равенств (2.1) и (2.4) следует расчётная формула для измеряемой ёмкости

$$C = b \frac{U^{\text{инт}}}{U}. \quad (2.5)$$

Значение градуировочной постоянной установки b можно определить на основе формулы (2.5), разряжая через интегратор конденсатор с известной ёмкостью C_0 (образцовый конденсатор)

$$b = C_0 \frac{U_0}{U_0^{\text{инт}}}. \quad (2.6)$$

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 . Предварительно измерив неизвестную ёмкость мультиметром в режиме прямых измерений, их соединяют сначала параллельно, затем последовательно. Сравнивая измеренное значение ёмкости батареи конденсаторов с рассчитанными по формулам (2.2) или (2.3), делают вывод о надёжности градуировки.

Описание установки

Оборудование: регулируемый источник постоянного напряжения, два мультиметра, миниблоки «Интегратор тока», «Ключ», «Конденсатор известной ёмкости», «Конденсатор неизвестной ёмкости».

Схема электрической цепи представлена на рис. 2.1, монтажная схема приведена на рис. 2.3.

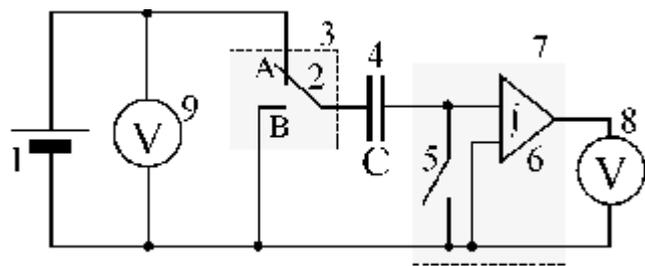


Рис. 2.1. Электрическая схема:

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 – мультиметры

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 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». Интегратор тока устанавливают на место 3 наборного поля (рис. 2 Введения). Питание интегратора осуществляется от источника стабилизированных постоянных напряжений «+15 В» и «-15 В».

Для зарядки конденсатора переключатель 2 на рис. 2.1 устанавливают 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.

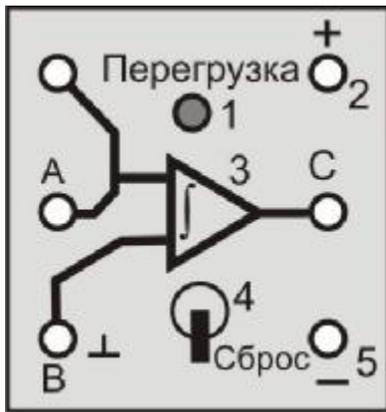


Рис. 2.2. Миниблок «Интегратор тока»:

A – вход; 1 – индикатор перегрузки; 2 – питание интегратора «+15 В»; 3 – интегратор; C – выход на измерительный прибор (мультиметр); B – вход «земля» (подключается автоматически); 4 – демпферный ключ; 5 – питание интегратора «-15 В»

Выполнение работы

1. Переключатель рода работ мультиметров 8 и 9 перевести в положение «V \rightarrow » и установить предел измерения «20 В».
2. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 2.3.

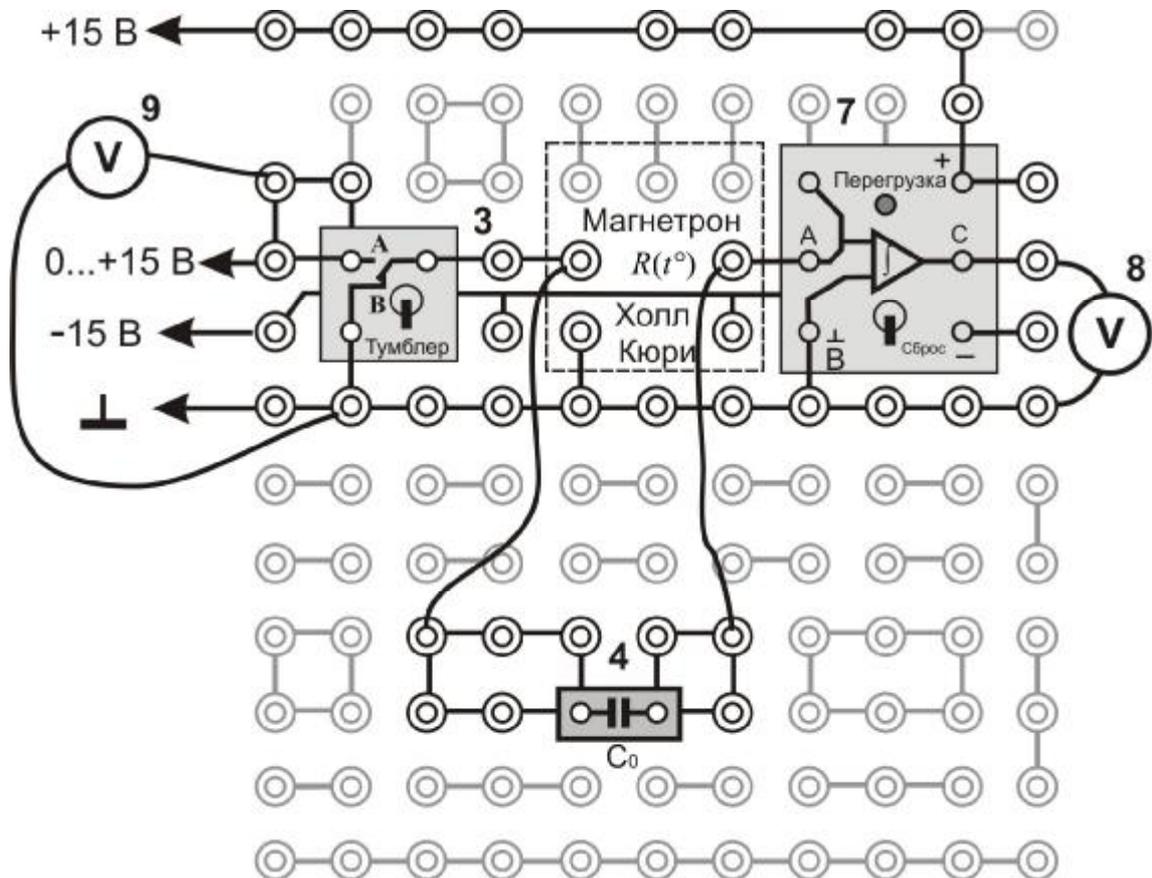


Рис. 2.3. Монтажная схема

Внимание! На общий вход «COM» мультиметров 8 и 9 подаётся нулевой потенциал (« \wedge »), на вход на вход «VW» – положительный потенциал.

3. Записать значение ёмкости образцового конденсатора C_0 и её погрешность в табл. 2.3.

4. Кнопками «СЕТЬ» включить блоки питания генераторов напряжения и мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка».

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 **D** «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 в табл. 2.3 над столбцом 1.

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 запомнить и записать в табл. 2.3 (столбец 1) 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 . Значения величин $U_0^{\text{инт}}$ записать в табл. 2.3 (столбец 1). Расчёт градуировочной постоянной b произвести после всех измерений.

ЭТАП 2. Определение неизвестной электроёмкости конденсатора C_x

1. Заменить конденсатор C_0 конденсатором с неизвестной ёмкостью C_x . Следуя пунктам 1 и 2 первого этапа, выбрать напряжение для его зарядки U_x в диапазоне 3–6 В, чтобы напряжение на выходе интегратора $U_x^{\text{инт}}$ было не больше 10 В. Записать напряжение U_x над столбцом 2 табл. 2.3.

2. Провести измерения напряжения $U_x^{\text{инт}}$ не менее 5 раз при одном и том же напряжении конденсатора U_x . Значения величин $U_x^{\text{инт}}$ записать в табл. 2.3 (столбец 2).

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 U_x .

2. Провести измерения напряжения $U_{\text{парал}}^{\text{инт}}$ не менее 5 раз при одном и том же $U_{\text{парал}}$. Значения величин $U_{\text{парал}}^{\text{инт}}$ записать в табл. 2.3 (столбец 3).

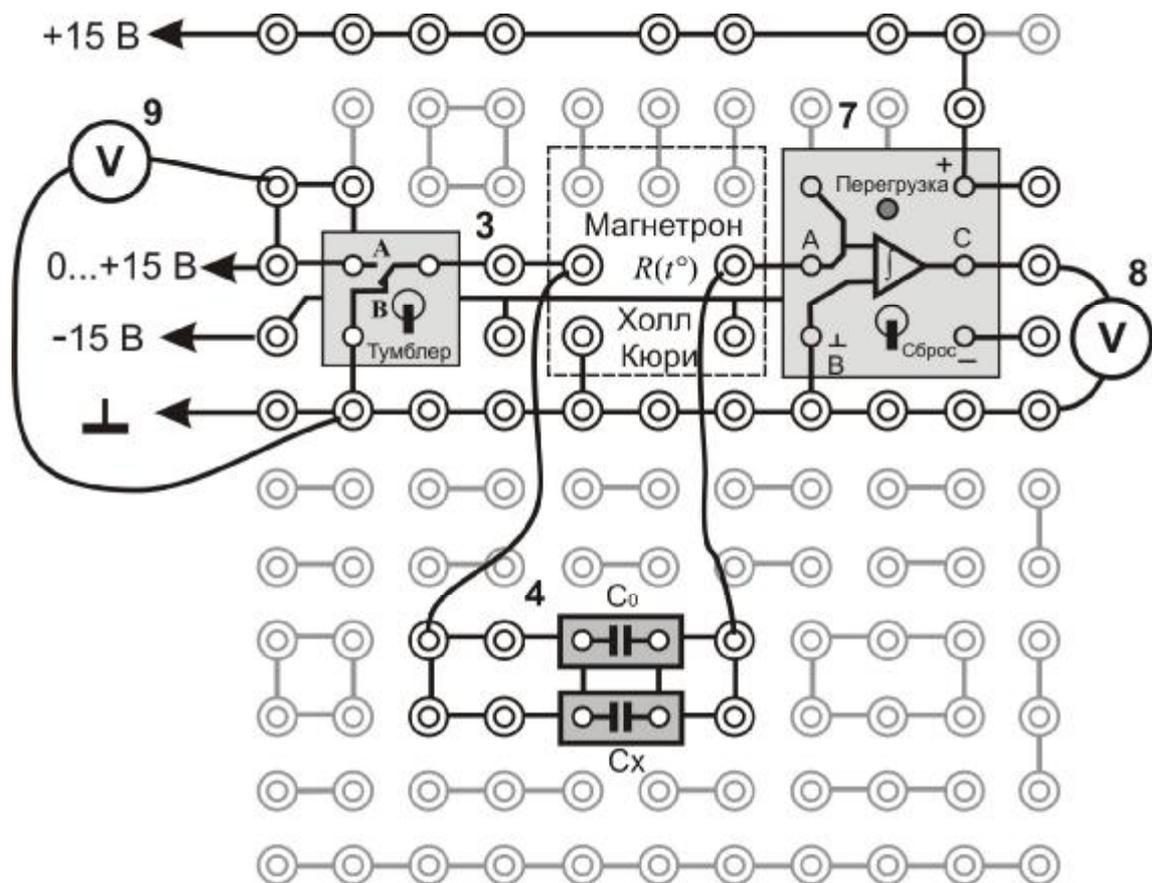


Рис. 2.4. Параллельное соединение конденсаторов

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 U_x , но напряжение разряда $U_{\text{посл}}^{\text{инт}}$ не должно превышать 8 – 10 В.
2. Провести измерения напряжения $U_{\text{посл}}^{\text{инт}}$ не менее 5 раз. Значения величин $U_{\text{посл}}^{\text{инт}}$ записать в табл. 2.3 (столбец 4).
3. Нажать кнопку «Исходная установка» и левой кнопкой «СЕТЬ» **выключить** питание генераторов напряжения.

ЭТАП 5. Определение неизвестной электроёмкости конденсатора C_x с помощью фарадометра

1. 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 с помощью зажимов типа «крокодил» подключить к разъёму «С_x» на панели мультиметра. Результат измерения $C_x^{\text{изм}}$ записать в табл. 2.4.
2. Правой кнопкой «СЕТЬ» **выключить** питание мультиметров.

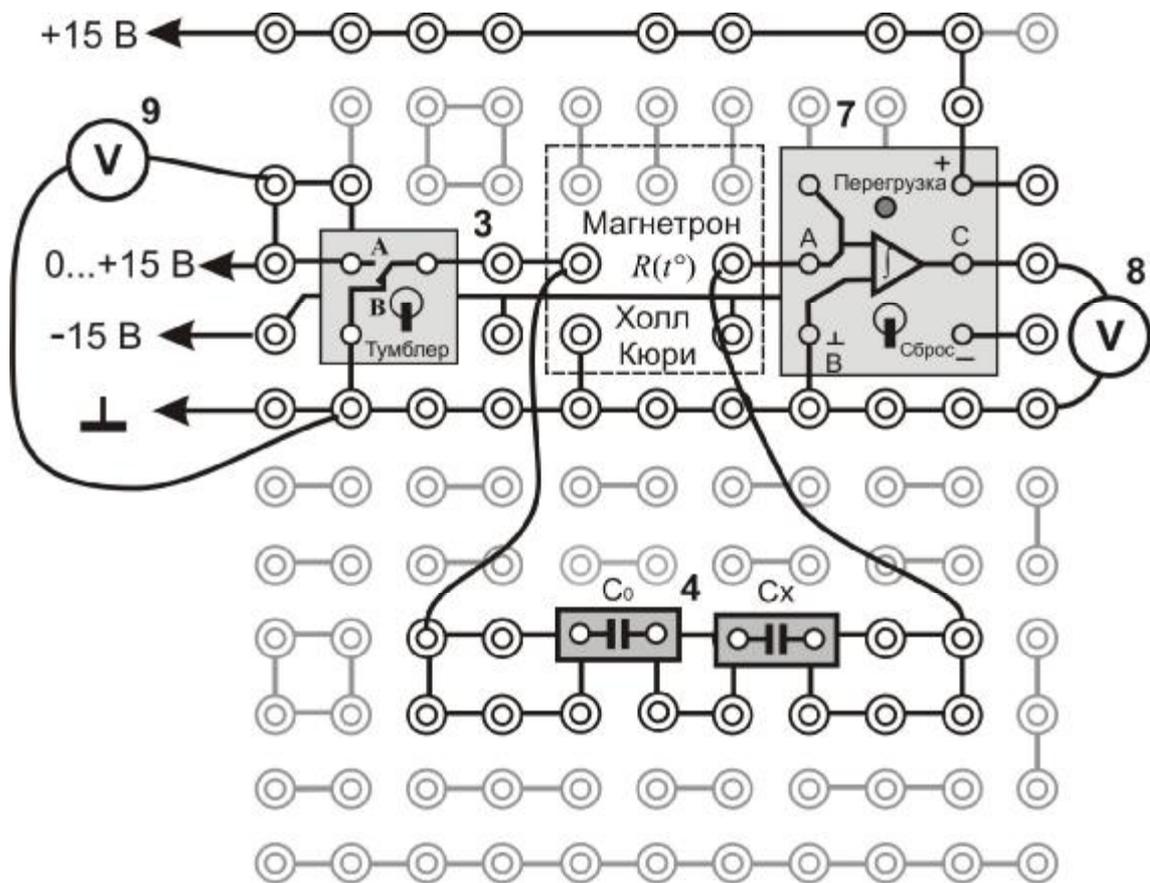


Рис. 2.5. Последовательное соединение конденсаторов

Обработка результатов измерений

1. Используя данные табл. 2.3, рассчитайте градуировочную постоянную b по формуле (2.6).

2. По формуле (2.5) рассчитайте ёмкости неизвестного конденсатора C_x и батарей конденсаторов $C_{\text{эксп}}^{\text{парал}}$, $C_{\text{эксп}}^{\text{посл}}$.

3. Используя значения ёмкостей C_0 и $C_x^{\text{изм}}$, по формулам (2.2) и (2.3) вычислите величины $C_{\text{теор}}^{\text{парал}}$ и $C_{\text{теор}}^{\text{посл}}$.

4. Найдите относительное отклонение γ экспериментальных значений ёмкостей батарей конденсаторов от теоретических

$$\gamma^{\text{парал}} = \frac{|C_{\text{эксп}}^{\text{парал}} - C_{\text{теор}}^{\text{парал}}|}{C_{\text{теор}}^{\text{парал}}} 100\%, \quad (2.7)$$

$$\gamma^{\text{посл}} = \frac{|C_{\text{эксп}}^{\text{посл}} - C_{\text{теор}}^{\text{посл}}|}{C_{\text{теор}}^{\text{посл}}} 100\%. \quad (2.8)$$

5. Результаты расчетов запишите в табл. 2.4.

Оценка погрешностей измерений

1. **Систематическая относительная** погрешность косвенных измерений неизвестной ёмкости, определяемой выражением

$$C_x = b \frac{\langle U_x^{\text{ИНТ}} \rangle}{U_x} = C_0 \frac{U_0}{\langle U_0^{\text{ИНТ}} \rangle} \frac{\langle U_x^{\text{ИНТ}} \rangle}{U_x}, \quad (2.9)$$

находится как

$$\gamma_C = \frac{\theta C_x}{\langle C_x \rangle} = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\theta C_0}{C_0}\right)^2 + \left(\frac{\theta U_0}{U_0}\right)^2 + \left(\frac{\theta U_0^{\text{ИНТ}}}{U_0^{\text{ИНТ}}}\right)^2 + \left(\frac{\theta U_x}{U_x}\right)^2 + \left(\frac{\theta U_x^{\text{ИНТ}}}{U_x^{\text{ИНТ}}}\right)^2}, \quad (2.10)$$

где $\frac{\theta C_0}{C_0}$ – систематическая относительная погрешность, указанная на образце

вом конденсаторе, $\frac{\theta U_0}{U_0} = \frac{\theta U_x}{U_x} = \frac{\theta U_0^{\text{ИНТ}}}{\langle U_0^{\text{ИНТ}} \rangle} = \frac{\theta U_x^{\text{ИНТ}}}{\langle U_x^{\text{ИНТ}} \rangle} = \frac{\theta U}{U}$ – систематические от-

носительные погрешности прямых измерений соответствующих напряжений (табл. 2.1).

2. **Случайная относительная** погрешность косвенных измерений неизвестной ёмкости находится по формуле

$$\varepsilon_C = \frac{\delta C_x}{\langle C_x \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\delta U_0^{\text{ИНТ}}}{\langle U_0^{\text{ИНТ}} \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\delta U_x^{\text{ИНТ}}}{\langle U_x^{\text{ИНТ}} \rangle}\right)^2}, \quad (2.11)$$

где в числителях стоят доверительные границы случайной абсолютной погрешности прямых многократных измерений ёмкости и напряжения.

3. Доверительная граница **случайной абсолютной** погрешности прямых многократных измерений величины U определяется по формуле

$$\delta U_0^{\text{ИНТ}} = t_{P,N} \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \left(U_0^{\text{ИНТ}}{}_i - \langle U_0^{\text{ИНТ}} \rangle \right)^2}, \quad (2.12)$$

$$\delta U_x^{\text{ИНТ}} = t_{P,N} \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \left(U_x^{\text{ИНТ}}{}_i - \langle U_x^{\text{ИНТ}} \rangle \right)^2}. \quad (2.13)$$

где $t_{P,N}$ – коэффициент Стьюдента (табл. 2.1), P – доверительная вероятность, N – число измерений, U_i – результат i -го измерения, $\langle U \rangle$ – среднее значение результатов N измерений.

В этих формулах величины $U^{\text{ИНТ}}{}_i$ и $\langle U^{\text{ИНТ}} \rangle$ берутся из табл. 2.3.

Коэффициенты Стьюдента

Таблица 2.1

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

4. После определения систематической погрешности и доверительной границы случайной погрешности нужно оценить границы **полной** погрешности результата измерений. Для этого сравнивают их между собой. Если эти погрешности близки по значению, то доверительная граница суммарной погрешности рассчитывается по формуле:

– *относительная* $E_C = \sqrt{\gamma_C^2 + \varepsilon_C^2}$, (2.14)

– *абсолютная* $\Delta C = E_C \cdot \langle C_x \rangle \frac{1}{100\%}$. (2.15)

ОТЧЁТ по лабораторной работе «Определение электроёмкости конденсатора»

Исполнитель: студент(ка) гр. _____

Цель работы:

Краткое описание метода исследования:

Расчетные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать единицы их измерения в системе СИ).

Оборудование:

Средства измерений и их характеристики

Таблица 2.2

Наименование прибора	Предел допускаемой относительной погрешности (в % от измеренного значения)
Вольтметр 8	$\frac{\theta U}{U} = 0,5 \%$
Вольтметр 9	$\frac{\theta U}{U} = 0,5 \%$
Измеритель электроёмкости (фарадометр)	$\frac{\theta C}{C} = 4 \%$

Результаты измерений

Таблица 2.3

№ п/п	Градуировка $C_0 =$ мкФ $\frac{\theta C_0}{C_0} =$ %	Електроёмкость измеренная фарнадометром $C_x^{\text{изм}} =$ мкФ	Соединение конденсаторов	
			параллельное	последоват.
Показания вольтметров	$U_0 =$ В	$U_x =$ В	$U_{\text{парал}} =$ В	$U_{\text{посл}} =$ В
	1	2	3	4
	$U_0^{\text{инт}},$ В	$U_x^{\text{инт}},$ В	$U_{\text{парал}}^{\text{инт}},$ В	$U_{\text{посл}}^{\text{инт}},$ В
1				
2				
3				
4				
5				
...				
Среднее $\langle U \rangle$				

Расчёты

1. $b = \dots = \dots$ мкКл/В; (2.6)

2. $C_x = \dots = \dots$ мкФ; (2.5)

3. $C_{\text{эксп}}^{\text{парал}} = \dots = \dots$ мкФ; (2.5)

4. $C_{\text{теор}}^{\text{парал}} = \dots = \dots$ мкФ; (2.2)

5. $\gamma^{\text{парал}} = \dots = \dots$ %; (2.7)

6. $C_{\text{эксп}}^{\text{посл}} = \dots = \dots$ мкФ; (2.5)

7. $C_{\text{теор}}^{\text{посл}} = \dots = \dots$ мкФ; (2.3)

8. $\gamma^{\text{посл}} = \dots = \dots$ %. (2.8)

Написать формулу, показать расчёт и записать результат!

Результаты расчётов

Таблица 2.4

Град. пост. $b,$ мкКл/В	Неизвестная ём- кость $C_x,$ мкФ		Ёмкость соединения конденсаторов, мкФ			
			$C_{\text{эксп}}^{\text{парал}}$	$C_{\text{теор}}^{\text{парал}}$	$C_{\text{эксп}}^{\text{посл}}$	$C_{\text{теор}}^{\text{посл}}$
	экспер.	измерен.				
			$\gamma^{\text{парал}} =$ %		$\gamma^{\text{посл}} =$ %	

Оценка погрешностей

1. $\gamma_C = \frac{\theta C_x}{\langle C_x \rangle} = \dots = \dots \%$; (2.10)

2. $\delta U_0^{\text{ИИТ}} = \dots = \dots \text{ В}$; (2.12)

3. $\frac{\delta U_0^{\text{ИИТ}}}{\langle U_0^{\text{ИИТ}} \rangle} \cdot 100\% = \dots = \dots \%$;

Написать формулу, показать расчёт и записать результат!

4. $\delta U_x^{\text{ИИТ}} = \dots = \dots \text{ В}$; (2.13)

5. $\frac{\delta U_x^{\text{ИИТ}}}{\langle U_x^{\text{ИИТ}} \rangle} \cdot 100\% = \dots = \dots \%$;

6. $\varepsilon_C = \frac{\delta C_x}{\langle C_x \rangle} = \dots = \dots \%$; (2.11)

7. $E_C = \dots = \dots \%$; (2.14)

8. $\Delta C = \dots = \dots \text{ мкФ}$; (2.15)

9. Окончательный результат $C = \langle C \rangle \pm \Delta C$, мкФ, $P = \dots$

10. Сравнить полную погрешность измерений неизвестной ёмкости E_C с относительным отклонением γ (см. табл. 2.4).

11. Сделать вывод.

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 [2–4]. Согласно закону Ома, сила тока в однородном участке цепи равна отношению напряжения U на его концах к сопротивлению этого участка R :

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

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

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

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

$$\rho = R \frac{S}{l}, \quad (3.3)$$

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

Методы измерений сопротивления проводника

В работе реализуют три метода измерения сопротивления проводника:

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

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

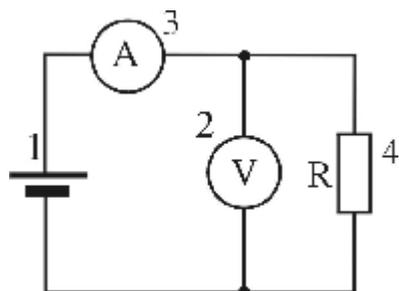


Рис. 3.1. Электрическая схема:

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

При этом измеряют ток I через резистор и падение напряжения на нём U . Это позволяет рассчитать неизвестное сопротивление резистора R (3.1):

$$R = \frac{U}{I}. \quad (3.4)$$

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 (мостик Уитстона), который используется для измерения сопротивлений.

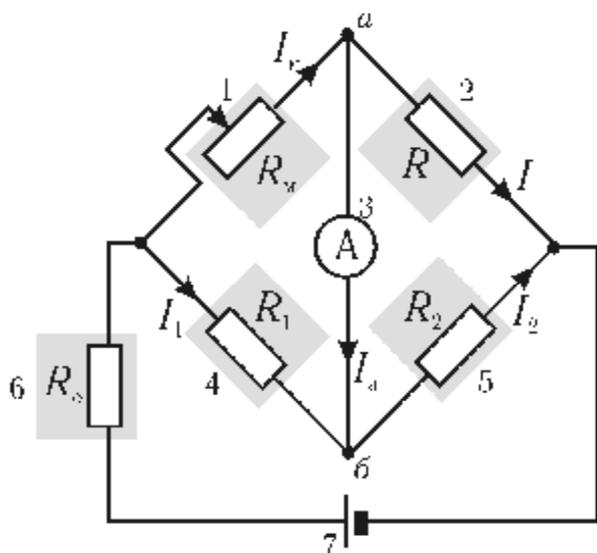


Рис. 3.2. Электрическая схема простейшего моста Уитстона:
1 – магазин сопротивлений R_M , 2 – измеряемое сопротивление R , 3 – амперметр 4 – сопротивление $R_1 = 100$ Ом, 5 – сопротивление $R_2 = 10$ Ом,; 6 – сопротивление $R_0 = 470$ Ом, 7 – источник постоянного напряжения «+15 В»

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

$$I_M R_M = I_1 R_1; \quad IR = I_2 R_2; \quad I_M = I; \quad I_1 = I_2. \quad (3.5)$$

Из этих соотношений следует расчётная формула

$$R = R_M \frac{R_2}{R_1}. \quad (3.6)$$

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

3. *Использование омметра* является наиболее простым методом: достаточно подключить измеряемый резистор к входам омметра и считать показания прибора. В основе работы омметров обычно лежит приближённый технический метод: шкалу прибора градуируют с использованием формулы (3.4) при фиксированном напряжении U батареи питания. Этот метод применяют, когда не нужна высокая точность измерений.

Описание установки

Оборудование: миниблок «Сопротивление проводника» (рис. 3.3), источник постоянного напряжения, мультиметры, магазин сопротивлений, миниблоки «Резистор» (рис. 3.4).

Миниблок «Сопротивление проводника» (рис. 3.3) предназначен для определения удельного сопротивления проводника (выводы АВ). На блоке указаны длина и диаметр проводника.



Рис. 3.3. Миниблок «Сопротивление проводника»

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

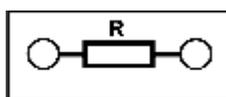


Рис. 3.4. Миниблок «Резистор»

Выполнение работы

1. Технический метод измерения сопротивления

1.1. Переключатель рода работ мультиметра 2 (рис. 3.1) перевести в положение « V_{\rightarrow} » и установить предел измерения «**20 В**», мультиметра 3 – в положение « A_{\rightarrow} » и установить предел измерения «**200 м**».

1.2. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 3.5.

Внимание! На общий вход **COM** мультиметров 2 и 3 подаётся отрицательное напряжение (« \wedge »), на входы **VW** и **mA** – положительное напряжение.

1.3. Записать геометрические параметры проводника L и d в табл. 3.4.

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

1.5. Кнопкой **D** «Установка напряжения 0 ... +15 В» на регулируемом источнике постоянного напряжения по мультиметру 3 установить ток I в цепи примерно 10 мА. По мультиметру 2 определить напряжение U . Значения величин записать в табл. 3.4 (столбец 1).

1.6. Увеличивая последовательно ток примерно на 10 мА, провести ещё не менее четырёх измерений. Результаты записать в табл. 3.4 (столбец 1).

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

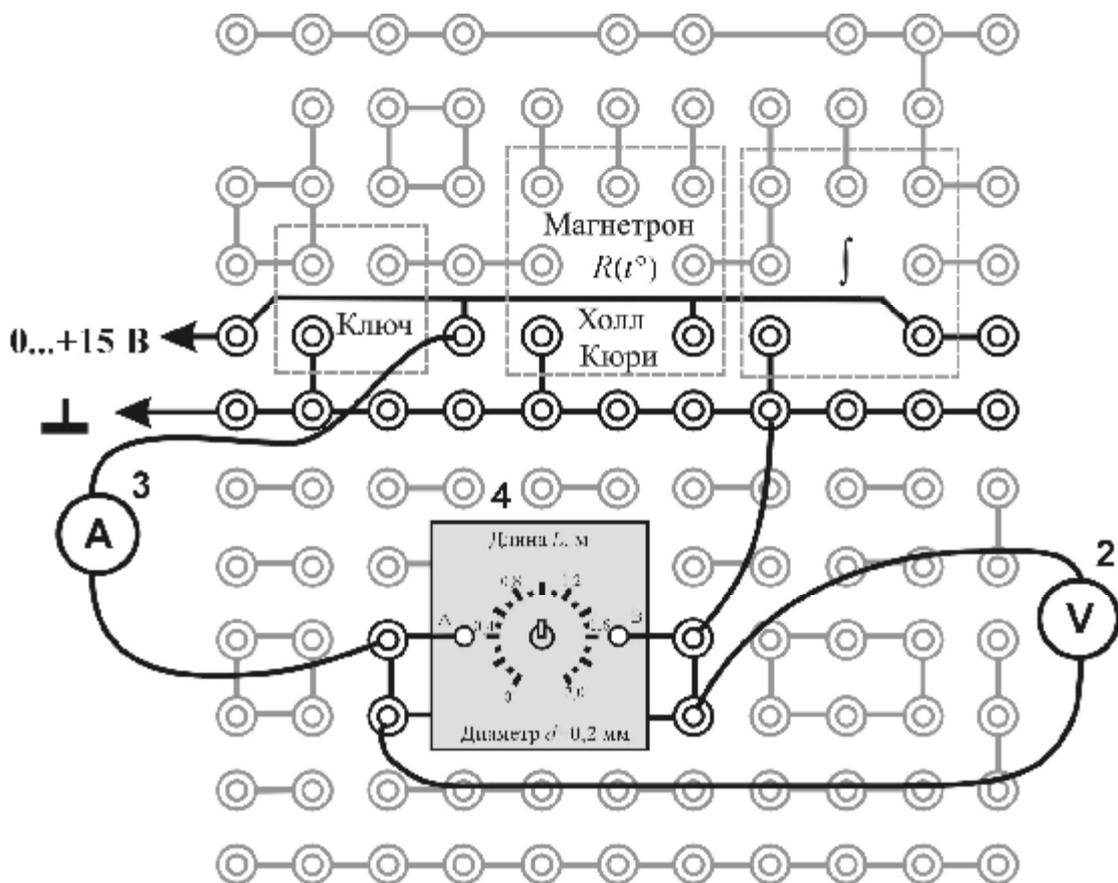


Рис. 3.5. Монтажная схема измерения сопротивлений методом амперметра и вольтметра: обозначения 2, 3, 4 – см. на рис. 3.1

2. Измерение мостом Уитстона

2.1. Мультиметр 3 перевести в положение «**A**» и установить предел измерения «**200 m**».

2.2. Собрать монтажную схему (см. рис. 3.6).

2.3. Установить все декады магазина сопротивлений в нулевое положение.

2.4. Кнопкой «СЕТЬ» включить питание блока генераторов напряжений. Нажать кнопку «Исходная установка».

2.5. Подобрать такое сопротивление магазина R_M , чтобы показание амперметра было равно нулю. Магазин сопротивлений это переменный резистор. С помощью декад можно установить сопротивление от 00000,0 до 99999,9 Ом. Каждая из шести декад соответствует определённому разряду числа.

2.5.1. Первые две декады – 10000 и 1000 Ом – рекомендуется оставить в нулевом положении.

2.5.2. Увеличить сопротивление декады 100 Ом на одно значение. Если ток, текущий через амперметр, уменьшился, но не изменил знак, то продолжать увеличивать сопротивление декады. Как только знак тока изменится на противоположный, то декаду следует вернуть в предыдущее положение, после чего перейти к подбору сопротивления следующей декады.

2.5.3. Переключить диапазон работы мультиметра в положение «**2 m**» и продолжать подбирать сопротивление на декадах магазина до тех пор, пока показа-

ние амперметра не будет равно нулю. Найти сопротивление магазина R_M как сумму сопротивлений отдельных декад. Результат записать в табл. 3.4 (столбец 2).

2.6. Кнопками «СЕТЬ» **выключить** питание генераторов напряжения и мультиметров. Разобрать электрическую цепь. Миниблок «Сопротивление проводника» оставить на наборном поле в прежнем положении.

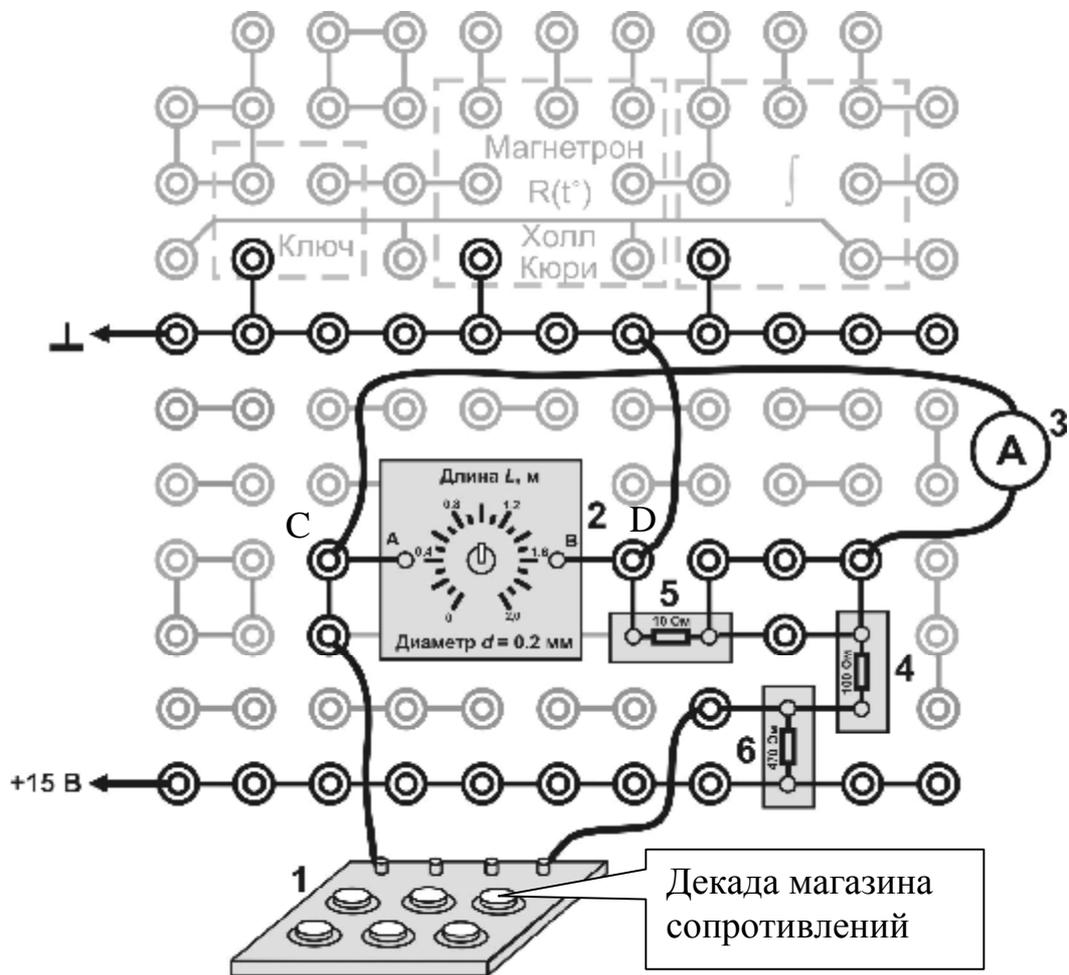


Рис. 3.6. Монтажная схема измерения сопротивлений методом моста Уитстона: обозначения 1, 2, 3, 4, 5, 6 – см. рис. 3.2

3. Измерение сопротивления омметром

3.1. Переключатель рода работ одного из мультиметров перевести в положение «W» и установить предел измерения «200». С помощью одного проводника подключить клемму «COM» мультиметра с клеммой С на наборном поле (рис. 3.6). Другим проводником соединить клемму «VW» мультиметра и клеммой D на наборном поле.

3.2. Включить мультиметр. Показания прибора записать в табл. 3.4 (столбец 3).

Обработка результатов измерений

1. По формуле (3.4) рассчитать сопротивление проводника R , измеренное техническим методом.

2. Вычислить по формуле (3.6) 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 (3.3) удельное сопротивление проводника. Определить материал проводника, сравнив полученное значение ρ с табличными значениями.

Удельное сопротивление металлов и сплавов

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

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

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 (3.4).

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

$$\gamma_R = \frac{\theta R}{R} = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\theta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\theta I}{I}\right)^2}, \quad (3.7)$$

где $\frac{\theta U}{U}$, $\frac{\theta I}{I}$ – систематические относительные погрешности прямых измерений напряжения и тока (см. табл. 3.3).

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

$$\theta R = \frac{\gamma_R \cdot R}{100\%}. \quad (3.8)$$

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

$$\delta R = t_{P,N} \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (R_i - \langle R \rangle)^2}, \quad (3.9)$$

где $t_{P,N}$ – коэффициент Стьюдента, P – доверительная вероятность, N – число измерений. В этой формуле величины R_i и $\langle R \rangle$ взять из табл. 3.4.

Коэффициенты Стьюдента

Таблица 3.2

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

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

$$\Delta R = \sqrt{\delta R^2 + \theta R^2}, \quad (3.10)$$

относительная

$$E_R = \frac{\Delta R}{\langle R \rangle} \cdot 100\%. \quad (3.11)$$

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 (3.6). Поэтому относительная погрешность определяется по формуле

$$\gamma_R = \frac{\theta R}{R} = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\theta R_M}{R_M}\right)^2 + \left(\frac{\theta R_2}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{\theta R_1}{R_1}\right)^2}, \quad (3.12)$$

где $\frac{\theta R_M}{R_M}, \frac{\theta R_2}{R_2}, \frac{\theta R_1}{R_1}$ – **систематические относительные** погрешности измерения сопротивлений, входящих в мост Уитстона (см. табл. 3.3).

3. Измерение омметром

В этом случае измерения сопротивления R являются прямыми и их погрешность определяется систематической относительной погрешностью мультиметра (табл. 3.3).

ОТЧЁТ

по лабораторной работе

«Определение удельного сопротивления проводника»

Исполнитель: студент(ка) гр. _____

Цель работы:

Краткое описание метода исследования:

Расчётные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать их наименование в СИ)

Оборудование:

Средства измерений и их характеристики

Таблица 3.3

Наименование прибора	Предел допускаемой относительной погрешности (в % от измеренного значения)
Вольтметр (2)	$\theta U/U = 0,5 \%$
Амперметр (3)	$\theta I/I = 1,5 \%$
Омметр	$\theta R/R = 0,8 \%$
R1, R2 и магазин сопр.	$\theta R_M/R_M = 0,2\%$

Результаты измерений

Таблица 3.4

Геометрические параметры проводника: $l = \quad \text{м}, \quad d = \quad \text{мм}, \quad S = \pi d^2/4 = \quad \text{мм}^2$						
Технический метод				Мостовой метод	Метод омметра	
№	I, мА	U, В	R, Ом			
1				$R_M = \quad \text{Ом}$ $R_1 = 100 \text{ Ом}$ $R_2 = 10 \text{ Ом}$ $R = \quad \text{Ом}$	$R = \quad \text{Ом}$	
2						
3						
4						
5						
...			
Среднее сопротивление $R = \quad \text{Ом}$						
$\Delta R = \quad \text{Ом}$ $E_R = \quad \%$				$\Delta R = \quad \text{Ом}$ $\gamma_R = \quad \%$	$\Delta R = \quad \text{Ом}$ $\gamma_R = \quad \%$	

Расчеты

1. Технический метод

$$R = \dots = \dots \text{ Ом} \quad (3.4) \quad (\text{Показать один расчёт})$$

$$\gamma_R = \dots = \dots \%$$

$$\theta R = \dots = \dots \text{ Ом} \quad (3.8)$$

$$\delta R = \dots = \dots \text{ Ом} \quad (3.9)$$

$$\Delta R = \dots = \dots \text{ Ом} \quad (3.10)$$

$$E_R = \dots = \dots \%$$

2. Мостовой метод

$$R = \dots = \dots \text{ Ом} \quad (3.6)$$

$$E_R = \gamma_R = \dots = \dots \%$$

$$\Delta R = \theta R = \dots = \dots \text{ Ом}$$

$$3. \rho = \dots = \dots \text{ Ом}\cdot\text{м}. \quad (3.3)$$

4. Сравнить удельное сопротивление проводника с табличными значениями (табл. 3.1) и сделать вывод.

Написать формулу, показать расчёт и записать результат!

Лабораторная работа Э-4 ИЗУЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛА И ПОЛУПРОВОДНИКА

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

По электрическим свойствам вещества разделяют на три класса: проводники, диэлектрики и полупроводники [2–4]. 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 таблицы элементов Д.И. Менделеева (В, Ge, Si, As, Те 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 твердого тела дает более обоснованную классификацию веществ. Согласно этой теории, электроны в атоме могут иметь только определенные 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 уровне может находиться не более двух электронов, имеющих противоположно направленные спины. Зона считается свободной, если все уровни этой зоны не заняты.

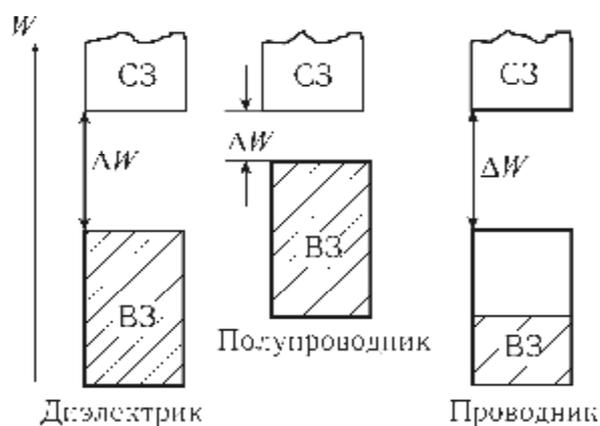


Рис. 4.1. Энергетические зоны:

ВЗ – валентная; CZ – свободная; ΔW – ширина запрещённой зоны. Штриховкой отмечена заполненная часть зоны (при абсолютной температуре $T = 0$ К).

Если в веществе валентные электроны, ответственные за все электрические свойства, 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 0,02 – 2 эВ, а для диэлектриков – больше 2 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 является в данном случае зоной проводимости. 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 ведет 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 °С, α_t – температурный коэффициент сопротивления (ТКС), t – температура в градусах Цельсия.

Описание метода исследования

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

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

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: регулируемый источник постоянного напряжения, миниблоки «Исследование температурной зависимости сопротивления проводника и полупроводника», «Ключ», мультиметры.

Электрическая схема установки показана на рис. 4.2, описание миниблока – на рис. 4.3, а монтажная схема – на рис. 4.4.

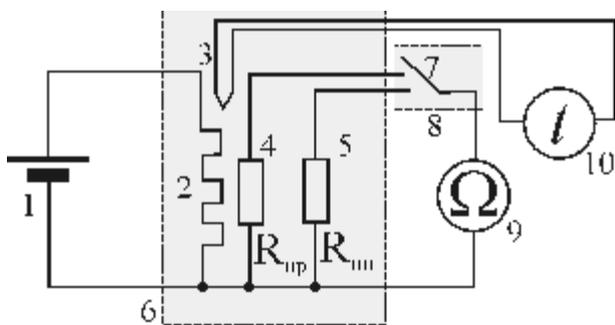


Рис. 4.2. Электрическая схема:

1 – регулируемый источник постоянного напряжения («0 ... +15 В»); 2 – электронагреватель; 3 – термопара; 4, 5 – исследуемые образцы проводника и полупроводника; 6 – миниблок «Исследование температурной зависимости сопротивления проводника и полупроводника»; 7 – переключатель; 8 – блок «Ключ»; 9 – мультиметр в режиме измерения сопротивления; 10 – мультиметр в режиме измерения температуры

Электронагреватель 2 подключен к регулируемому источнику постоянного напряжения 1 («0...+15 В»). При включении источника начинается нагрев исследуемых образцов. Для измерения сопротивления образцов 4, 5 в режиме непрерывного нагрева их поочередно подсоединяют к мультиметру 9 с помощью переключателя 7. Температуру образцов измеряют с помощью термопары 3, напряжение с которой подаётся на клеммы измерителя температуры (мультиметр 10).

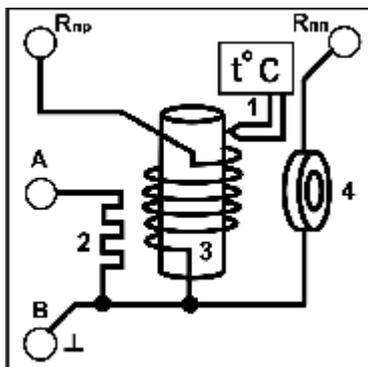


Рис. 4.3. Миниблок «Исследование температурной зависимости сопротивления проводника и полупроводника»:

- 1 – клеммы термопары для подключения к мультиметру;
- 2 – нагреватель печи;
- 3 – проводник;
- 4 – полупроводник;
- $R_{пр}$ – вывод проводника;
- $R_{пп}$ – вывод полупроводника

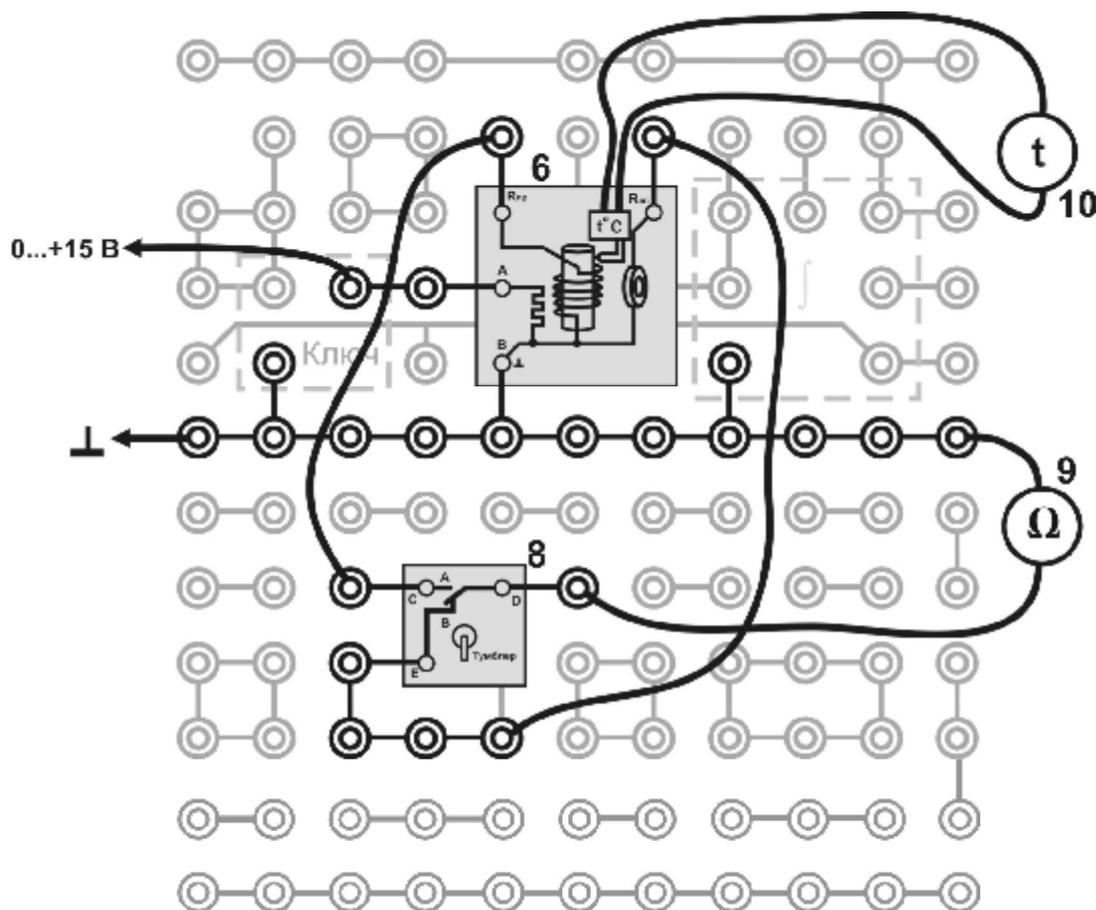


Рис. 4.4. Монтажная схема установки:
6, 8, 9, 10 – см. рис. 4.2

Выполнение работы

1. Заполнить табл. 4.2 (см. бланк отчёта).
2. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 4.4. При подсоединении термопары к мультиметру необходимо учитывать полярность подключения проводов.
3. Включить в сеть блоки питания генераторов и мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка».
4. Установить необходимые режимы измерений мультиметров. Учесть, что при измерении сопротивления проводника переключатель диапазонов ставится в положение 200 Ом, а полупроводника – 2 кОм или 20 кОм.
5. С помощью миниблока «Ключ» подключая поочередно к мультиметру проводник (положение А) и полупроводник (положение В), измерить их сопротивление при комнатной температуре. Результаты измерений записать в табл. 4.3 (см. бланк отчёта).
6. Кнопками «Установка напряжения 0 ... +15 В» установить по индикатору 7–8 делений.
7. По мере нагрева образцов, измерять по п. 4 их сопротивления через каждые 5 °С до 70 °С. Результаты измерений записать в табл. 4.3.
8. **Выключить из сети** блоки питания генераторов напряжений и мультиметров.

Обработка результатов измерений

1. По данным табл. 4.3 построить график температурной зависимости сопротивления проводника от температуры в координатах $R \leftrightarrow t$. Ось температуры следует начинать с 0 °С.

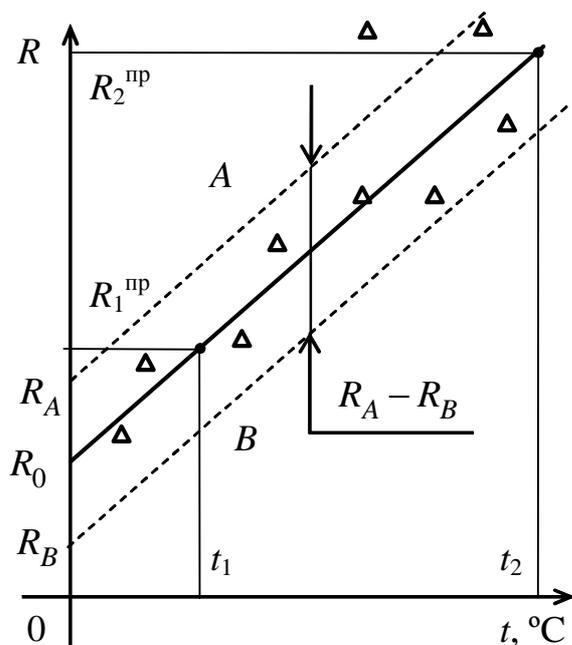


Рис. 4.5. Зависимость сопротивления проводника от температуры

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

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

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

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

5. По данным табл. 4.3 построить для полупроводника график в координатах $\ln R \leftrightarrow \frac{1}{T}$. 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:

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

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

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

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

здесь $\frac{\theta R}{R}$, $\frac{\theta t}{t}$ – систематическая относительная погрешность мультиметра при измерении сопротивления и температуры (табл. 4.2).

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

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

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:

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

$$\delta R_0 = \frac{t_{P,N}(R_A - R_B)}{4\sqrt{N}}, \quad (4.14)$$

где $t_{P,N}$ – коэффициент Стьюдента, P – доверительная вероятность, N – число измерений, R_A, R_B – см. на рис. 4.5. Провести параллельно экспериментальной прямой по обе стороны две прямые A и B по возможности ближе так, чтобы большинство точек, (кроме промахов) оказалось внутри.

Коэффициенты Стьюдента

Таблица 4.1

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

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

$$E = \frac{\Delta\alpha_t}{\alpha_t} = \sqrt{\varepsilon^2 + \gamma^2}. \quad (4.15)$$

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

$$\Delta\alpha_t = \frac{E}{100\%} \cdot \alpha_t. \quad (4.16)$$

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

6. Оформить отчёт по работе в соответствии с прилагаемым образцом и сравнить α_t и ΔW с табличными значениями (табл. 4.4, 4.5).

ОТЧЁТ

по лабораторной работе «Изучение температурной зависимости сопротивления проводника и полупроводника»

Исполнитель студент(ка) гр. _____

Цель работы: ...

Краткое описание метода исследования: ...

Расчетные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать единицы их измерения в СИ) ...

Оборудование: ...

Средства измерений и их характеристики

Таблица 4.2

Наименование прибора	Предел допускаемой относительной погрешности (в % от измеренного значения)
Омметр	$\theta R/R = 0,8 \%$
Термометр	$\theta t/t = 1,0 \%$

Результаты измерений

Таблица 4.3

№	$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$1/T, \text{K}^{-1}$	$R_{\text{пр}}, \text{Ом}$	$R_{\text{пп}}, \text{Ом}$	$\ln R_{\text{пп}}$
1						
2						
...	...					
N	70					

Результаты расчетов

1. $k_1 = \dots = \dots \text{ Ом}/^\circ\text{C};$ (4.8)

2. $R_0 = \dots \text{ Ом};$ (по графику)

3. $\alpha_t = \dots = \dots \text{ 1}/^\circ\text{C};$ (4.4)

4. $\gamma = \dots = \dots \text{ %};$ (4.11)

5. $\delta k_1 = \dots = \dots \text{ Ом}/^\circ\text{C};$ (4.13)

6. $\delta R_0 = \dots \text{ Ом};$ (4.14)

7. $\varepsilon = \dots = \dots \text{ %};$ (4.12)

8. $E = \dots = \dots \text{ %};$ (4.15)

9. $\Delta\alpha_t = \dots = \dots \text{ 1}/^\circ\text{C};$ (4.16)

10. Окончательный результат: $\alpha_t = \dots \pm \dots \text{ 1}/^\circ\text{C}, E = \dots \text{ %};$

11. $k_2 = \dots = \dots \text{ К};$ (4.9)

12. $\Delta W = \dots = \dots \text{ Дж} = \dots \text{ эВ.}$ (4.7) (1 эВ = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж).

13. Оценка погрешностей ширины запрещенной зоны ΔW исследуемого полупроводника.

14. Вывод.

Примечание. К отчёту прилагаются два графика, построенные по данным табл. 4.3.

Написать формулу, показать расчёт и записать результат!

Температурный коэффициент сопротивления

Таблица 4.4

Вещество	$\alpha_t \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
Al	4,5
W	5,1
Cu	4,3
Pb	4,2
Ag	4,1
Нихром	0,2

Ширина запрещённой зоны веществ

Таблица 4.5

Вещество	$\Delta W, \text{ эВ}$ (при 20 °C)
C (алмаз)	5,40
Se	1,79
Ge	0,66
Si	1,11
GaAs	1,43
InAs	0,36

Лабораторная работа Э-5 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПИ, ОБЛАДАЮЩЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЕМ И ЭЛЕКТРОЁМКОСТЬЮ

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

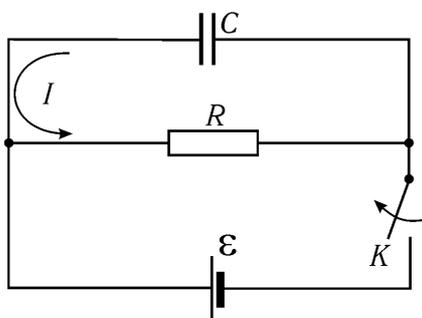


Рис. 5.1

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 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 – ёмкость 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:

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

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

Прологарифмируем зависимость (5.6):

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

Зависимость $\ln U \leftrightarrow t$ 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 сопротивление цепи R , если известна ёмкость C .

Описание установки

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

Электрическая схема установки показана на рис. 5.2, монтажная схема приведена на рис. 5.3.

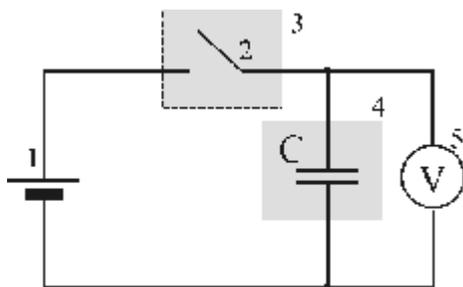


Рис. 5.2. Электрическая схема:

- 1 – источник постоянного напряжения («+15 В»);
- 2 – ключ;
- 3 – миниблок «Ключ»;
- 4 – миниблок «Конденсатор»;
- 5 – мультиметр (режим V_{DC} : 20 В, входы COM, VW)

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. Заполнить табл. 1 (см. бланк отчёта).
2. Собрать электрическую цепь с конденсатором C_1 по монтажной схеме, приведенной на рис. 5.3.
3. Включить в сеть блоки питания генераторов и мультиметров.

4. Отключить конденсатор от источника постоянного напряжения, переведя ключ в положение В, и по мере разряда конденсатора через каждые 5 секунд записывать показания вольтметра в табл. 5.2. Повторить измерения не менее 3 раз.

5. Подсоединить параллельно к конденсатору C_1 второй C_2 (рис. 5.4) и по п. 4 повторить измерения для батареи конденсаторов. Результаты записать в табл. 5.2. Повторить измерения не менее 3 раз.

6. **Выключить из сети** блоки генераторов напряжений и мультиметров.

Обработка результатов измерений

1. По формуле для параллельного соединения конденсаторов рассчитать и записать в табл. 5.2 ёмкость батареи конденсаторов $C_{\text{парал}}^{\text{бат}}$.

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

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

4. Рассчитать сопротивление вольтметра R_V для ёмкости C_1 и ёмкости батареи конденсаторов, соединённых параллельно $C_{\text{парал}}^{\text{бат}}$ по формуле:

$$R_V = -\frac{1}{k \cdot C} = \frac{\tau}{C}. \quad (5.9)$$

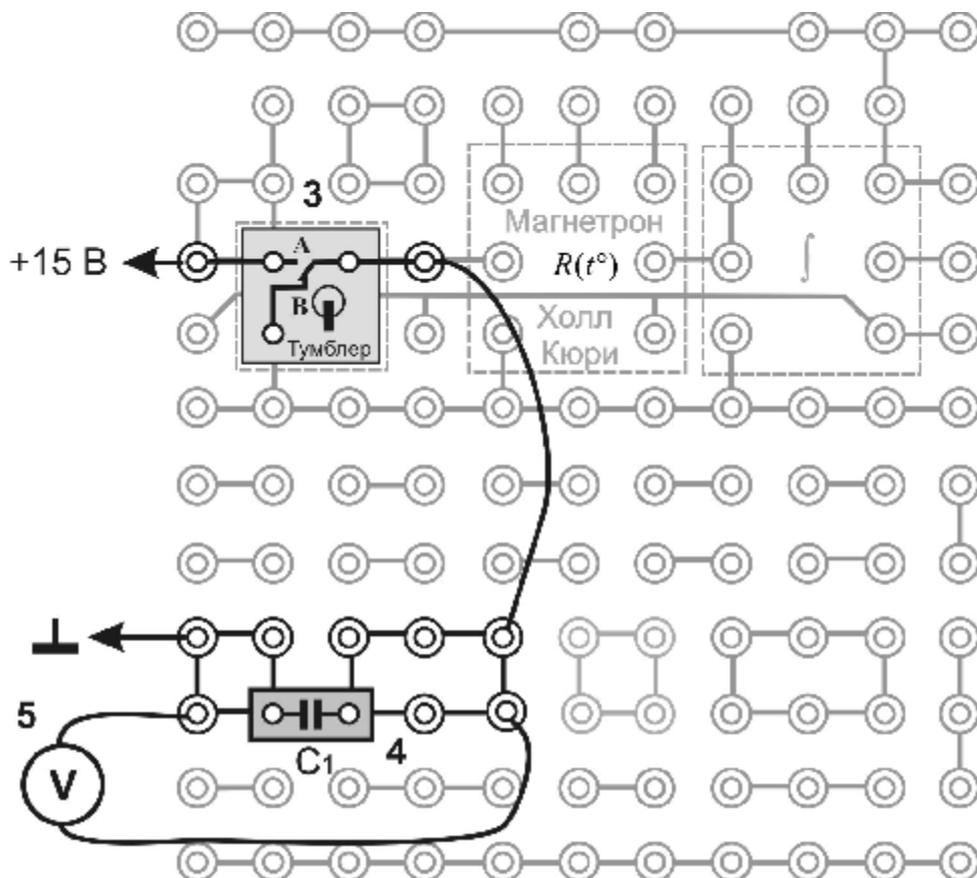


Рис. 5.3. Монтажная схема: 3, 4, 5 – см. на рис. 5.2

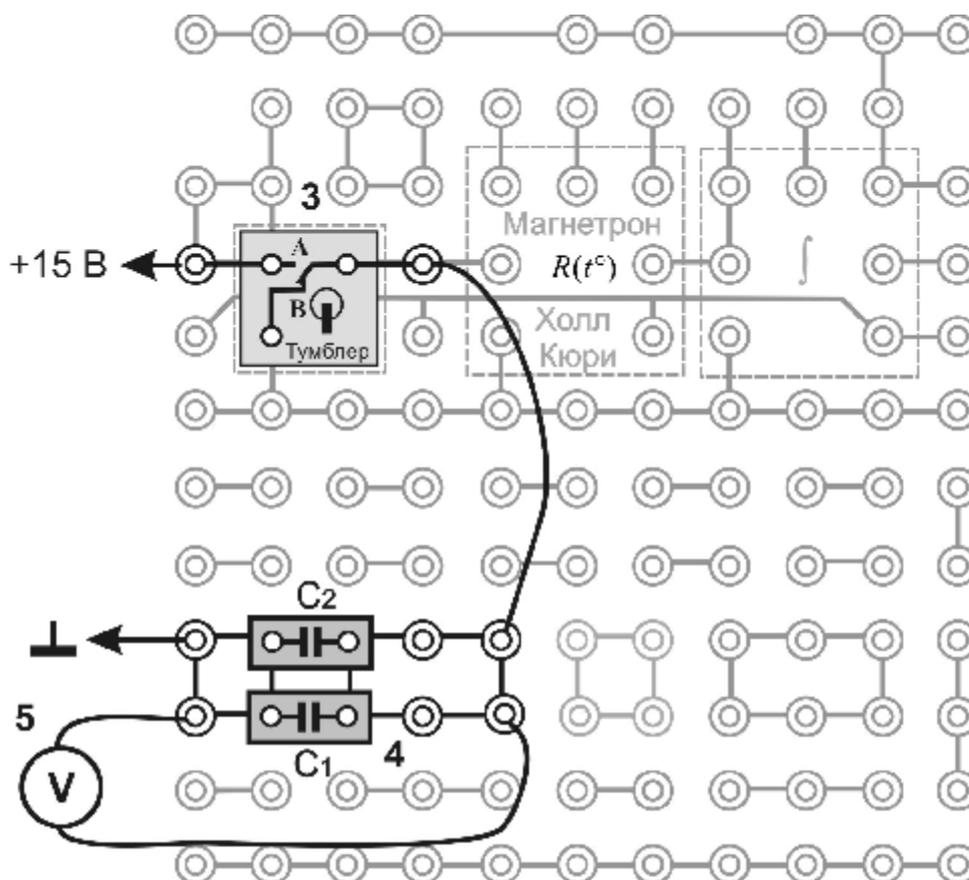


Рис. 5.4. Монтажная схема. Параллельное соединение конденсаторов

Оценка погрешностей измерений

1. **Систематическая относительная** погрешность косвенных измерений среднего внутреннего сопротивления вольтметра на основе формулы (5.9) определяется выражением

$$\gamma = \frac{\theta R_V}{R_V} = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\theta t}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{\theta C}{C}\right)^2}, \quad (5.10)$$

где $\frac{\theta t}{\tau}$, $\frac{\theta C}{C}$ – систематические относительные погрешности измерения времени релаксации и ёмкости конденсатора.

2. **Случайная относительная** погрешность косвенных измерений сопротивления определяется только случайной погрешностью углового коэффициента

$$\varepsilon = \frac{\delta R_V}{R_V} = \frac{\delta k}{k}, \quad (5.11)$$

где δk – **случайная абсолютная** погрешность углового коэффициента.

Поскольку зависимость натурального логарифма напряжения на конденсаторе от времени его разряда является функцией линейной (5.7) и изображается прямой, то погрешность δk наиболее просто найти графическим способом.

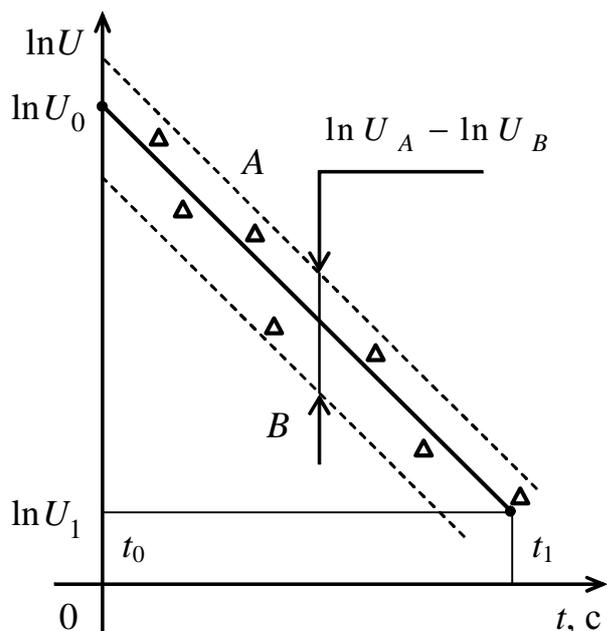


Рис. 5.5. Зависимость $\ln U$ от времени

Рабочей формулой в этом случае является выражение

$$\delta k = \frac{t_{P,N}(\ln U_A - \ln U_B)}{2\sqrt{N}(t_1 - t_0)}, \quad (5.12)$$

где $t_{P,N}$ – коэффициент Стьюдента, P – доверительная вероятность, N – число измерений.

3. **Полная относительная** погрешность рассчитывается по формуле

$$E = \frac{\Delta R_V}{R_V} = \sqrt{\varepsilon^2 + \gamma^2}. \quad (5.13)$$

4. **Полная абсолютная** погрешность рассчитывается по формуле

$$\Delta R_V = E \cdot R_V. \quad (5.14)$$

ОТЧЁТ

по лабораторной работе «Определение параметров цепи, обладающей сопротивлением и ёмкостью»

Исполнитель студент(ка) гр. _____

Цель работы:

Краткое описание метода исследования:

Расчётные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать единицы их измерения в системе СИ.)

Оборудование:

Средства измерений и их характеристики

Таблица 5.1

Наименование прибора	Предел допускаемой относительной погрешности (в % от измеренного значения)	Абсолютная систематическая погрешность
Вольтметр (5)	0,5 %	—
Секундомер	—	$\theta t = \dots$ (погрешность измерения времени экспериментатором зависит от его реакции)

Результаты измерений

Таблица 5.2

$C_1 = \dots$ мкФ $\frac{\theta C}{C} = \dots$ %						$C_2 = \dots$ мкФ $C_{\text{парал}}^{\text{бат}} = C_1 + C_2 = \dots$ мкФ					
$t, \text{с}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	$\langle U \rangle, \text{В}$	$\ln U$	$t, \text{с}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	$\langle U \rangle, \text{В}$	$\ln U$
0						0					
5						5					
10						10					
15						15					
20						20					
25						25					
30						30					
35						35					
40						40					
45						45					
50						50					
55						55					
60						60					

Результаты расчётов

1. $k_1 = \dots = \dots$ 1/с
 $k_2 = \dots = \dots$ 1/с
2. $\tau_1 = \dots = \dots$ с
 $\tau_2 = \dots = \dots$ с
3. $R_{V1} = \dots = \dots$ Ом (Для схемы с конденсатором C_1)
 $R_{V2} = \dots = \dots$ Ом (Для схемы с конденсаторами C_1 и C_2)
 $R_V = \dots = \dots$ Ом (Среднее между ними)
4. $\gamma = \dots = \dots$ % (Расчёт для одной схемы)
5. $\delta k = \dots = \dots$ с⁻¹
6. $\varepsilon = \dots = \dots$ %.
7. $E = \dots = \dots$ %.
8. $\Delta R_V = \dots = \dots$ Ом.
9. Окончательный результат: $R_V = \dots \pm \dots$ Ом, $E = \dots$ %.

10. Вывод.

Примечание. К отчёту прилагаются графики, построенные по данным табл. 5.2.

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 $\dot{\mathbf{v}}$ в пространстве, где имеется электрическое поле напряженностью $\dot{\mathbf{E}}$ и магнитное поле индукцией $\dot{\mathbf{B}}$, то на неё действует сила Лоренца [2–4]

$$\dot{\mathbf{F}} = Q\dot{\mathbf{E}} + Q [\dot{\mathbf{v}}, \dot{\mathbf{B}}]. \quad (6.1)$$

Согласно второму закону Ньютона уравнение движения частицы имеет вид

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

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

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 двух-электродной 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

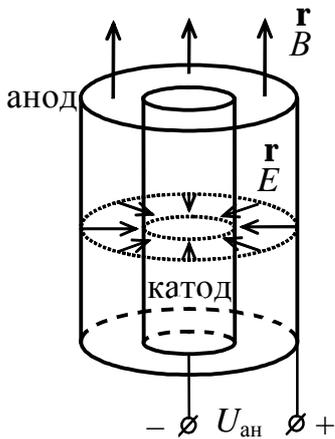


Рис. 6.1. Магнетрон

$\dot{\mathbf{B}}$ 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. 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.

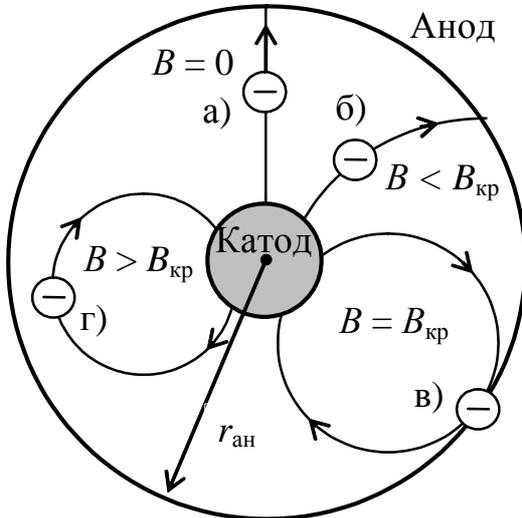


Рис. 6.2. Траектории движения электронов в магнитном поле

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 центробежной силы и вызывает движение по окружности. Радиус этой окружности определяется вторым законом Ньютона

$$e\upsilon B = \frac{m_e \upsilon^2}{R}, \quad (6.3)$$

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

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

Отсюда следует:

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

то есть 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).

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

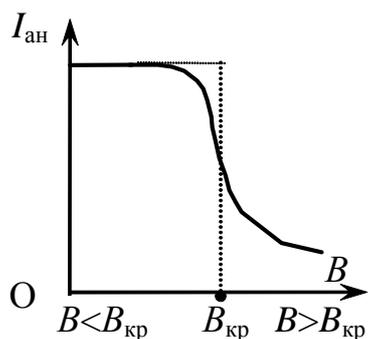


Рис. 6.3. Зависимость анодного тока от индукции магнитного поля

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 $I_{\text{ан}}$ 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 $B = B_{\text{кр}}$ радиус кривизны траектории электрона равен половине радиуса анода $R = r_{\text{ан}}/2$. Подставив это значение в формулу (6.5), выразим удельный заряд электрона:

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

Скорость электрона определим из закона сохранения энергии:

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

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

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

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 $B_{\text{кр}}$ соответствует значение силы тока соленоида $I_{c,\text{кр}}$.

Таким образом,

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

Для определения $I_{\text{с.кр}}$ можно использовать экспериментальную зависимость анодного тока от тока в соленоиде $I_{\text{ан}} = f(I_{\text{с}})$ (сплошная кривая на рис. 6.4). Она по виду подобна зависимости $I_{\text{ан}} = f(B)$ (рис. 6.3). В этом случае критический ток в соленоиде будет определяться наибольшим наклоном кривой в области спада анодного тока (участок b-c на рис. 6.4), то есть максимальным значением модуля производной $dI_{\text{ан}}/dI_{\text{с}} \approx \Delta I_{\text{ан}}/\Delta I_{\text{с}}$. Таким образом, если построить график $\Delta I_{\text{ан}}/\Delta I_{\text{с}} = g(I_{\text{с}})$, то максимум этой зависимости будет соответствовать значению критического тока в соленоиде (пунктирная кривая на рис. 6.4).

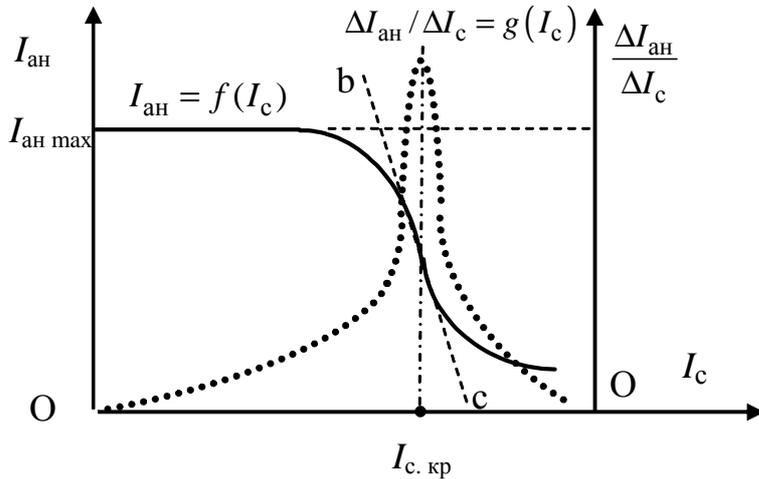


Рис. 6.4. Зависимость анодного тока магнетрона от тока соленоида

Описание установки

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

Для определения удельного заряда электрона методом магнетрона собирают электрическую цепь (см. рис. 6.5). На рис. 6.7 приведена монтажная схема установки.

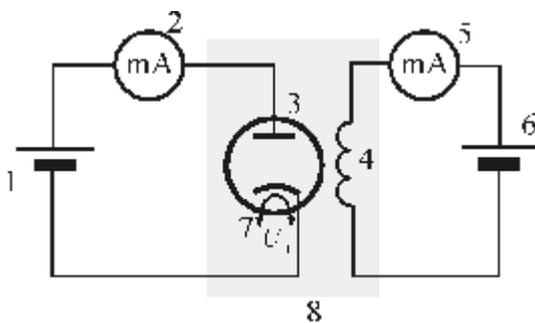


Рис. 6.5. Электрическая схема:

- 1 – источник постоянного напряжения «+15 В»;
- 2 – мультиметр для измерения анодного тока (режим A: «2 mA», входы «COM», «mA»);
- 3 – вакуумный диод;
- 4 – соленоид;
- 5 – мультиметр для измерения тока соленоида (режим A: «200 mA», входы «COM», «mA»);
- 6 – регулируемый источник постоянного напряжения «0...+15 В»;
- 7 – катод;
- 8 – миниблок «Магнетрон» (рис. 6.6)

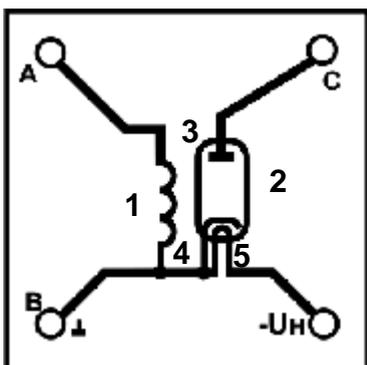


Рис. 6.6. Миниблок «Магнетрон»:

1 – соленоид, 2 – вакуумный диод, 3 – анод диода, 4 – катод диода, 5 – нагреватель катода, А, В – выводы для подключения напряжения к соленоиду, С, В – выводы для подключения анодного напряжения, $-U_{\text{н}}$ – вывод для подключения напряжения к нагревателю

Основой магнетрона является вакуумная лампа (диод) 3. На нагреватель катода 5 диода от источника подаётся постоянное напряжение $U_{\text{н}} = -15 \text{ В}$. Анод лампы 3 подключается к источнику стабилизированного постоянного напряжения $+15 \text{ В}$. 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 совпадала с осью соленоида. Соленоид подключается к регулируемому источнику постоянного напряжения. Изменение тока $I_{\text{с}}$ в обмотке соленоида, а значит и индукции магнитного поля, осуществляется с помощью кнопок на панели блока генераторов.

Выполнение работы

1. Переключатель рода работ мультиметра 2 (рис. 6.6) перевести в положение «А.» и установить предел измерения «**2 mA**», мультиметра 5 – в положение «А.» и установить предел измерения «**200 mA**»,

2. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведенной на рис. 6.7.

Внимание! На общий вход «СОМ» мультиметров 2 и 5 подаётся отрицательное напряжение («^»), на вход «mA» – положительное напряжение. Миниблок вставлять в гнезда наборного поля надписью «Магнетрон» *вверх*.

3. Кнопками «СЕТЬ» включить питание блоков генераторов напряжения и мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка».

4. Выждать некоторое время для установления анодного тока в лампе.

5. Снять зависимость анодного тока в лампе от тока в соленоиде. Для этого кнопкой D «Установка напряжения 0 ... +15 В» на блоке генераторов последовательно устанавливать по мультиметру 5 токи в соленоиде $I_{\text{с}}$, а по мультиметру 2 измерять соответствующие значения анодного тока $I_{\text{ан}}$. Первые пять-шесть значений тока соленоида $I_{\text{с}}$ от нуля устанавливать через $\sim 20\text{--}25 \text{ mA}$, а, начиная с $\sim 120 \text{ mA}$, – через $\sim 5 \text{ mA}$. Максимальный ток соленоида не должен превышать 195 mA .

6. Нажать кнопку «Исходная установка» и кнопками «СЕТЬ» выключить питание генераторов напряжения и мультиметров. Разобрать электрическую цепь.

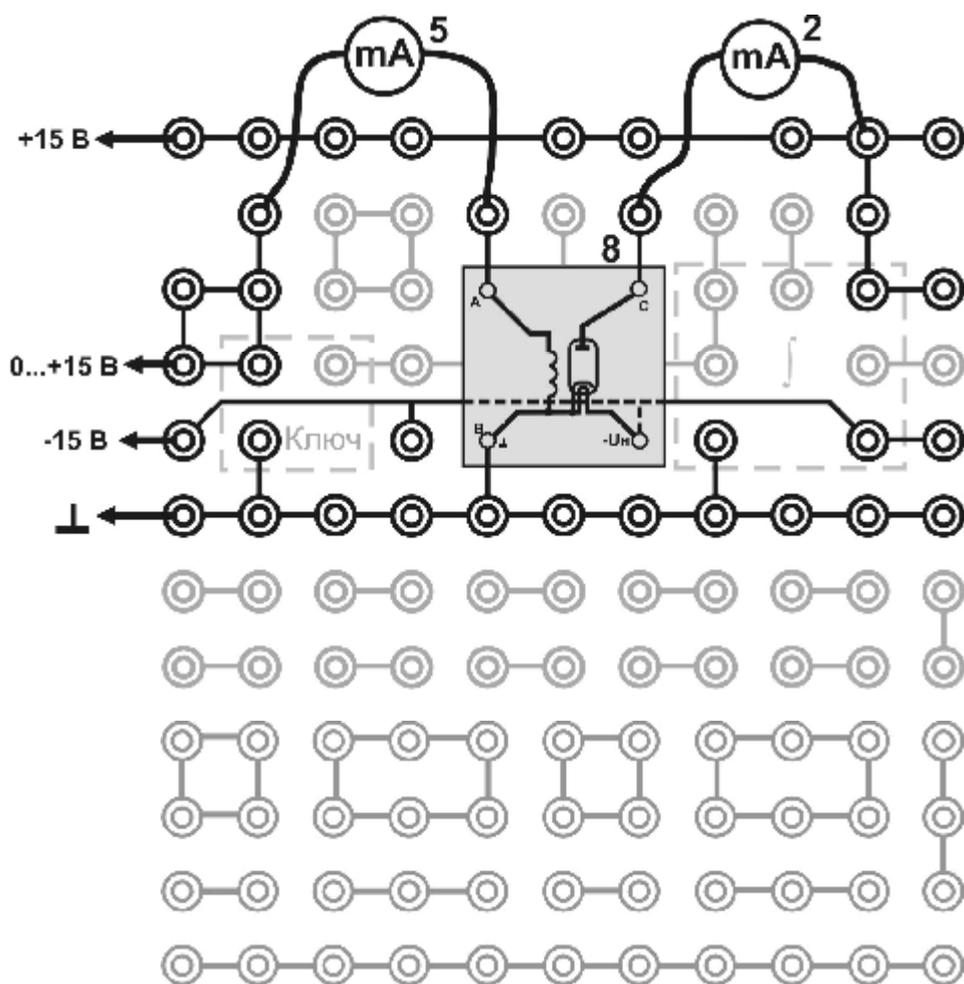


Рис. 6.7. Монтажная схема:
обозначения 2, 5, 8 – см. рис. 6.5

Обработка результатов измерений

1. Найти изменение тока в соленоиде и модуль изменения анодного тока по формулам

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

здесь $i = 1, 2, 3, \dots$ – номер измерения по табл. 6.2. Вычислить величину $(\Delta I_{ан i} / \Delta I_{c i}) \cdot 100$. Результаты записать в табл. 6.2.

2. По данным табл. 6.2, соблюдая указанный масштаб, построить на миллиметровой бумаге график зависимости $I_{ан} = f(I_c)$. На этом же графике, изменив масштаб по оси ординат, строят зависимость $(\Delta I_{ан} / \Delta I_c) \cdot 100 = g(I_c)$. По положению максимума на графике производной находят значение критического тока соленоида $I_{c,кр}$ (рис. 6.4).

3. По данным табл. 6.2 и найденному значению $I_{c,кр}$, а также по формуле (6.10) вычислить удельный заряд электрона. Единицы измерения всех величин в этой формуле должны быть взяты в системе СИ.

ОТЧЁТ
по лабораторной работе
«Определение удельного заряда электрона методом магнетрона»

Исполнитель: студент(ка) гр. _____

Цель работы: ...

Краткое описание метода исследования: ...

Расчетные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать их наименование в СИ)...

Оборудование: ...

Средства измерений и их характеристики

Таблица 6.1

Наименование прибора	Предел допускаемой основной относительной погрешности (в % от измеренного значения)
Амперметр (2)	0,8 %
Амперметр (5)	1,5 %

Результаты измерений

Таблица 6.2

Параметры магнетрона $D = 37,0 \text{ мм}, \quad L = 36,0 \text{ мм},$ $N = 2800 \text{ вит.}, \quad r_{\text{ан}} = 3,0 \text{ мм},$ $U_{\text{ан}} = 15 \text{ В}$				
$I_c, \text{ мА}$	$I_{\text{ан}}, \text{ мА}$	$\Delta I_c, \text{ мА}$	$\Delta I_{\text{ан}}, \text{ мА}$	$(\Delta I_{\text{ан} i} / \Delta I_{c i}) \cdot 100$
0	...	—	—	—
...
...

Расчёты

1. $I_{c, \text{кр}} = \dots \text{ мА}$

2. $\left(\frac{e}{m_e}\right)_{\text{эксп}} = \dots = \dots \text{ Кл/кг.}$

3. $\left(\frac{e}{m_e}\right)_{\text{табл}} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$

4. $\gamma = \frac{|(e/m_e)_{\text{эксп}} - (e/m_e)_{\text{табл}}|}{(e/m_e)_{\text{табл}}} \cdot 100\% = \dots\%$

5. Вывод.

Примечание. Построенный по данным табл. 6.2 график прилагается к отчёту. Показать на нём $I_{c, \text{кр}}$.

Написать формулу, показать расчёт и записать результат!

Лабораторная работа Э-7 ИЗУЧЕНИЕ ЭФФЕКТА ХОЛЛА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Цель работы: ознакомиться с явлением Холла, определить постоянную Холла и концентрацию электронных носителей 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 \mathbf{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 [2–4].

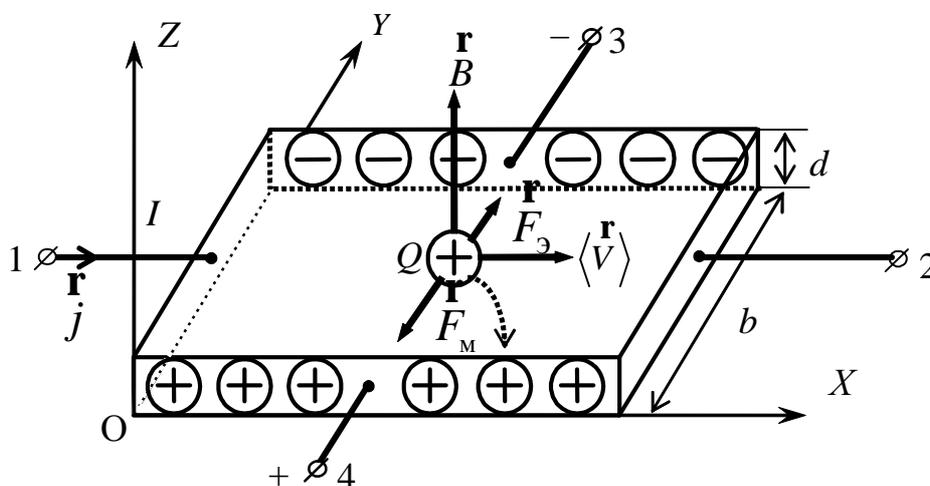


Рис. 7.1. Эффект Холла

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

$$I = JS = Q \langle v_x \rangle nbd, \quad (7.1)$$

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

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

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

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 $\dot{\mathbf{E}}$ направлен по оси ОУ. Сила, действующая на заряд Q со стороны этого поля (электрическая составляющая силы Лоренца),

$$\dot{\mathbf{F}}_3 = Q \cdot \dot{\mathbf{E}}, \quad (7.3)$$

будет направлена противоположно силе $\dot{\mathbf{F}}_M$. Разделение зарядов прекратится, когда средняя сила Лоренца, действующая на все заряды будет равна нулю, то есть

$$Q \cdot \dot{\mathbf{E}} + Q[\langle \dot{\mathbf{v}} \rangle, \dot{\mathbf{B}}] = 0. \quad (7.4)$$

Из этого уравнения находим напряжённость установившегося электрического поля

$$\dot{\mathbf{E}} = -[\langle \dot{\mathbf{v}} \rangle, \dot{\mathbf{B}}]. \quad (7.5)$$

Спроецируем вектор напряженности $\dot{\mathbf{E}}$ на ось ОУ

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

Тогда разность потенциалов между точками 3 и 4 определится как

$$\Phi_3 - \Phi_4 = -\int_0^b E_y dy = \langle v_x \rangle Bb.$$

Подставляя вместо $\langle v_x \rangle$ её значение из (7.1) и, обозначая $\Phi_3 - \Phi_4 = U_{\text{холл}}$, получим

$$U_{\text{холл}} = \frac{I}{Qnd} \cdot B = R_{\text{холл}} \cdot \frac{I}{d} \cdot B, \quad (7.7)$$

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

$$R_{\text{холл}} = \frac{r}{Qn}, \quad (7.8)$$

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 $r = 3\pi/8$.

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 (7.7), 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

$$U_{\text{ХОЛЛ}} = R_{\text{ХОЛЛ}} \cdot \frac{I}{d} \cdot B = k \cdot B, \quad (7.9)$$

то величина углового коэффициента

$$k = R_{\text{ХОЛЛ}} \cdot \frac{I}{d}. \quad (7.10)$$

Отсюда для постоянной Холла получаем

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

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

$$B = \mu_0 I_{\text{ЭМ}} \frac{N}{h}, \quad (7.12)$$

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

$$U^{\rightarrow} = U_{\text{ОМ}} - U_{\text{ХОЛЛ}}, \quad (7.13)$$

а при другом его направлении

$$U^{\leftarrow} = U_{\text{ОМ}} + U_{\text{ХОЛЛ}}. \quad (7.14)$$

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

$$U_{\text{ХОЛЛ}} = \left| \frac{U^{\rightarrow} - U^{\leftarrow}}{2} \right|. \quad (7.15)$$

Описание установки

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

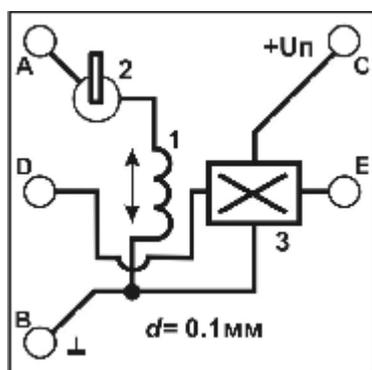


Рис. 7.2. Миниблок «Эффект Холла»:
1 – электромагнит, 2 – переключатель направления тока в обмотке электромагнита, 3 – датчик Холла. Вход В подсоединяется к земле. Вход С – к источнику напряжения «+15 В». На вход А подводится регулируемое напряжение «0 ... +15 В». С выходов DE снимается напряжение с датчика Холла

Электрическая схема установки приведена на рис. 7.3, 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.

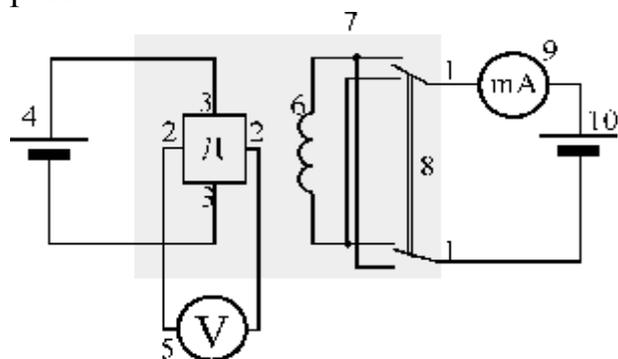


Рис. 7.3. Электрическая схема:
(1–1) цепь питания электромагнита 6: регулируемый источник постоянного напряжения 10, переключатель 8, мультиметр 9;
(2–2) – цепь измерения напряжения Холла мультиметром 5;
(3–3) – цепь питания образца Д: 4 – источник постоянного напряжения «+15 В»;
7 – миниблок «Эффект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

Выполнение работы

1. Заполнить табл. 7.2 (см. бланк отчёта).
2. Записать в табл. 7.3 (см. бланк отчёта) число витков электромагнита N , ширину зазора h и толщину датчика d (указаны на миниблоке «Эффект Холла»).
3. Переключатель рода работ мультиметра 5 (рис. 7.3) перевести в положение «V» и установить предел измерения «2 V», мультиметра 9 – в положение «mA» и установить предел измерения «200 mA»,
4. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведенной на рис. 7.4.

Внимание! На общий вход **COM** мультиметров 5 и 9 подается отрицательное напряжение (провод «←» или «^»), на входы **VW** и **mA** – положительное напряжение (провод «+»).

5. Кнопками «СЕТЬ» включить питание блоков генераторов напряжения и мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка».

6. Кнопкой **D** «Установка напряжения 0 ... 15 В» установить ток $I_{ЭМ}$ примерно 5 мА. Измерить напряжение U^{\rightarrow} . Переключателем 8 изменить направление тока (магнитного поля в зазоре) и измерить напряжение U^{\leftarrow} . Результаты записать в табл. 7.3.

7. Увеличивая ток $I_{ЭМ}$ примерно на 3–5 мА, провести ещё не менее 9 измерений напряжений U^{\rightarrow} и U^{\leftarrow} . Максимальный ток $I_{ЭМ}$ не должен превышать 40 мА. Результаты записать в табл. 7.3.

8. Нажать кнопку «Исходная установка» и кнопками «СЕТЬ» **выключить** питание генераторов напряжения и мультиметров. Разобрать электрическую цепь.

9. Измерить рабочий ток датчика Холла. Для этого необходимо собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведенной на рис. 7.5. Измерить ток I и записать в табл. 7.3.

10. **Выключить из сети** блоки питания генераторов и мультиметров.

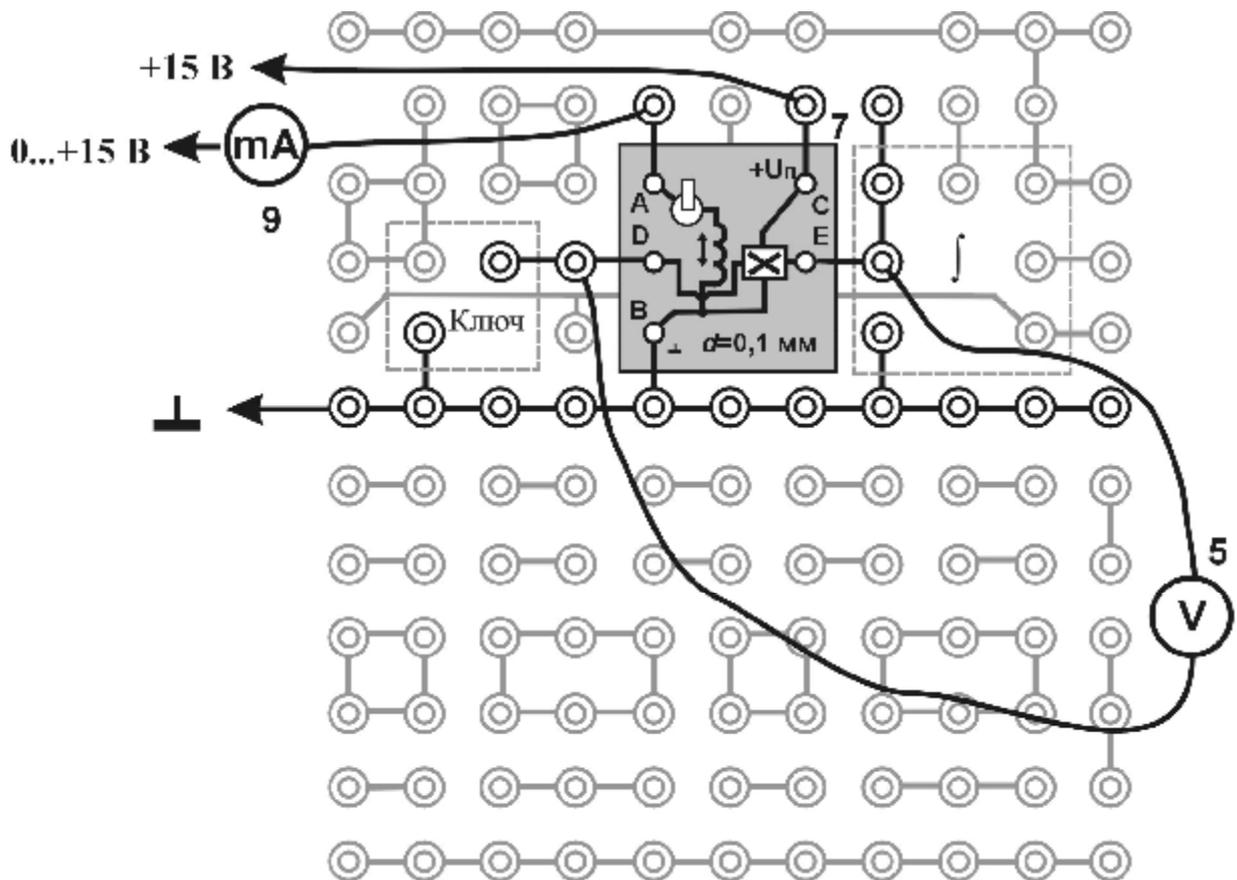


Рис. 7.4. Монтажная схема: обозначения 5, 7, 9 – см. на рис. 7.3

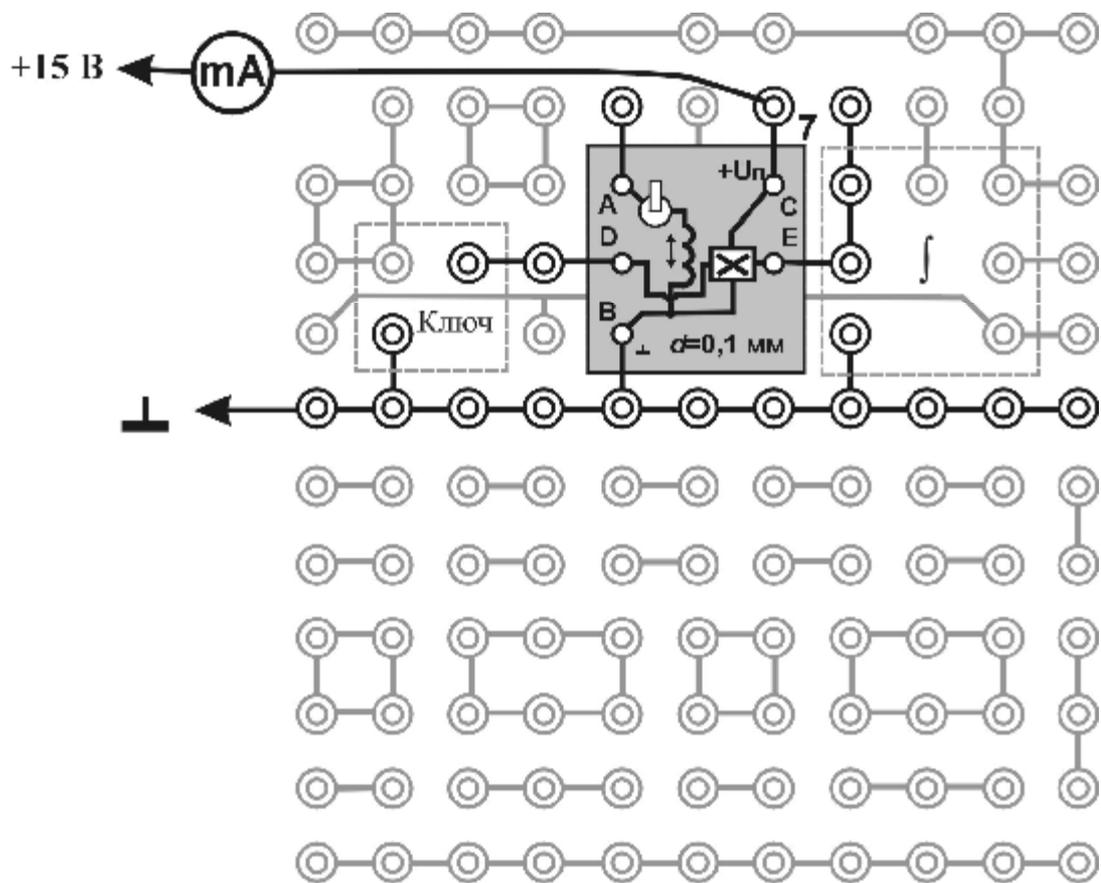


Рис. 7.5. Монтажная схема для измерения рабочего тока датчика Холла

Обработка результатов измерений

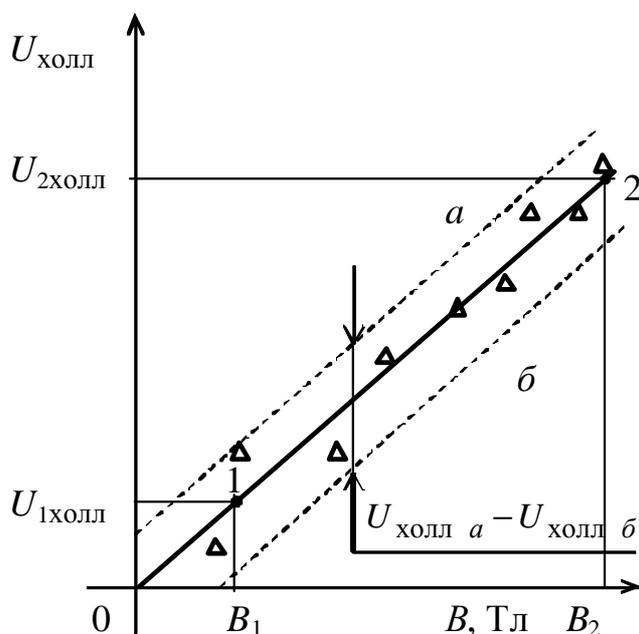


Рис. 7.6. Зависимость холловского напряжения от индукции магнитного поля

1. По формуле (7.12) рассчитать значения магнитной индукции B для каждого значения $I_{эм}$.

2. По формуле (7.15) для каждого значения B вычислить холловское напряжение $U_{холл}$. Результаты расчетов записать в табл. 7.3.

3. Построить график зависимости $U_{холл} = f(B)$. Для этого на графике отложить экспериментальные точки и провести по ним наилучшую прямую.

4. Рассчитать угловой коэффициент k этой прямой. Для этого на **концах** прямой выбрать две произвольные точки 1 и 2 и спроецировать их на координатные оси (рис. 7.6). Тогда

$$k = \frac{U_{2холл} - U_{1холл}}{B_2 - B_1}. \quad (7.16)$$

5. По формуле (7.11) рассчитать среднее значение постоянной Холла для исследуемого полупроводника.

6. Вычислить концентрацию дырок n в исследуемом полупроводнике по формуле (7.8)

$$n = \frac{r}{R_{\text{ХОЛЛ}} \cdot Q}, \quad (7.17)$$

где $Q = e$ – элементарный заряд.

Оценка погрешностей измерений

1. **Систематическая относительная** погрешность косвенных измерений постоянной Холла находится по известному правилу дифференцирования натурального логарифма исходной функции, в качестве которой в нашем случае удобно взять выражение, полученное из формул (7.9), (7.11) и (7.12)

$$R_{\text{ХОЛЛ}} = \frac{U_{\text{ХОЛЛ}} \cdot d \cdot h}{\mu_0 \cdot I \cdot I_{\text{ЭМ}} \cdot N}, \text{ м}^3/\text{Кл}, \quad (7.18)$$

где величины d, h, μ_0, N являются постоянными.

Тогда

$$\gamma = \frac{\theta R_{\text{ХОЛЛ}}}{R_{\text{ХОЛЛ}}} = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\theta U_{\text{ХОЛЛ}}}{U_{\text{ХОЛЛ}}}\right)^2 + \left(\frac{\theta I_{\text{ЭМ}}}{I_{\text{ЭМ}}}\right)^2 + \left(\frac{\theta I}{I}\right)^2}, \quad (7.19)$$

где $\frac{\theta U_{\text{ХОЛЛ}}}{U_{\text{ХОЛЛ}}}, \frac{\theta I_{\text{ЭМ}}}{I_{\text{ЭМ}}}, \frac{\theta I}{I}$, – систематические относительные погрешности мультиметров при измерении холловского напряжения, тока питания обмотки электромагнита и рабочего тока датчика Холла (см. табл. 7.2). $\frac{\theta I_{\text{ЭМ}}}{I_{\text{ЭМ}}} = \frac{\theta I}{I}$.

2. **Случайная относительная** погрешность косвенных измерений постоянной Холла определяется только случайной относительной погрешностью углового коэффициента (7.11), поскольку рабочий ток датчика Холла измеряют однократно:

$$\varepsilon = \frac{\delta R_{\text{ХОЛЛ}}}{R_{\text{ХОЛЛ}}} = \frac{\delta k}{k}, \quad (7.20)$$

где δk – доверительная граница случайной абсолютной погрешности среднего углового коэффициента. Поскольку зависимость холловского напряжения от индукции магнитного поля является линейной (7.9) и изображается прямой, то погрешность δk найдём графическим способом. Рабочей формулой в этом случае является выражение

$$\delta k = \frac{t_{P,N}(U_{\text{ХОЛЛ } a} - U_{\text{ХОЛЛ } b})}{2\sqrt{N}(B_2 - B_1)}, \quad (7.21)$$

где $t_{P,N}$ – коэффициент Стьюдента, P – доверительная вероятность, N – число измерений, $U_{\text{холл } a}$ и $U_{\text{холл } b}$ – см. на рис. 7.6. Провести параллельно экспериментальной прямой по обе стороны две прямые a и b по возможности ближе так, чтобы большинство точек, (кроме промахов) оказалось внутри.

Коэффициенты Стьюдента

Таблица 7.1

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

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

$$E = \frac{\Delta R_{\text{холл}}}{R_{\text{холл}}} = \frac{\Delta n}{n} = \sqrt{\gamma^2 + \varepsilon^2}, \quad (7.22)$$

которая, как следует из (7.17), совпадает с полной относительной погрешностью концентрации носителей тока n .

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

$$\Delta n = E \cdot n. \quad (7.23)$$

5. Оформить отчёт по работе в соответствии с прилагаемым образцом.

ОТЧЁТ

по лабораторной работе

«Изучение эффекта Холла в полупроводниках»

Исполнитель: студент(ка) гр. ____

Цель работы: ...

Краткое описание метода исследования: ...

Расчетные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать единицы их измерения в системе СИ)...

Оборудование: ...

Средства измерений и их характеристики

Таблица 7.2

Наименование прибора	Предел допускаемой относительной погрешности (в % от измеренного значения)
Вольтметр (5)	$\theta U/U = 0,5 \%$
Амперметр (9)	$\theta I/I = 1,5 \%$

Результаты измерений

Таблица 7.3

Параметры установки: $I = \dots$ мА, $N = \dots$ вит., $h = \dots$ мм, $d = \dots$ мм					
№	$I_{\text{эм}}, \text{мА}$	$U^{\rightarrow}, \text{В}$	$U^{\leftarrow}, \text{В}$	$B, \text{Тл}$	$U_{\text{холл}}, \text{В}$
1					
2					
...					
N					

Результаты расчётов

1. $B = \dots = \dots$ Тл (7.12) (любое значение из табл. 7.3);

2. $U_{\text{холл}} = \dots = \dots$ В (7.15) (любое значение из табл. 7.3);

3. $k = \dots = \dots$ В/Тл; (7.16)

4. $R_{\text{холл}} = \dots = \dots$ м³/Кл; (7.11)

5. $n = \dots = \dots$ м⁻³; (7.17)

6. $\gamma = \dots = \dots$ %; (7.19)

7. $\delta k = \dots = \dots$ В/Тл; (7.21)

8. $\varepsilon = \dots = \dots$ %; (7.20)

9. $E = \dots = \dots$ %; (7.22)

10. $\Delta n = \dots = \dots$ м⁻³; (7.23)

11. $\Delta R_{\text{холл}} = \dots = \dots$ м³/Кл;

12. Окончательные результаты:

$$R_{\text{холл}} = \dots \pm \dots, \text{ м}^3/\text{Кл}, \quad E = \dots \text{ \%}.$$

$$n = \dots \pm \dots, \text{ м}^{-3}$$

13. Вывод.

Написать формулу, показать расчёт и записать результат!

Примечание. К отчёту прилагается график, построенный по данным табл. 7.3.

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 [5]. К этому классу веществ относятся также вещества, которые называются ферримагнетики или ферриты.

Магнитное упорядочение атомов

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 антиферримагнитен. 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. 8.1, а). Такой кристалл имеет спонтанную намагниченность и доменную структуру.

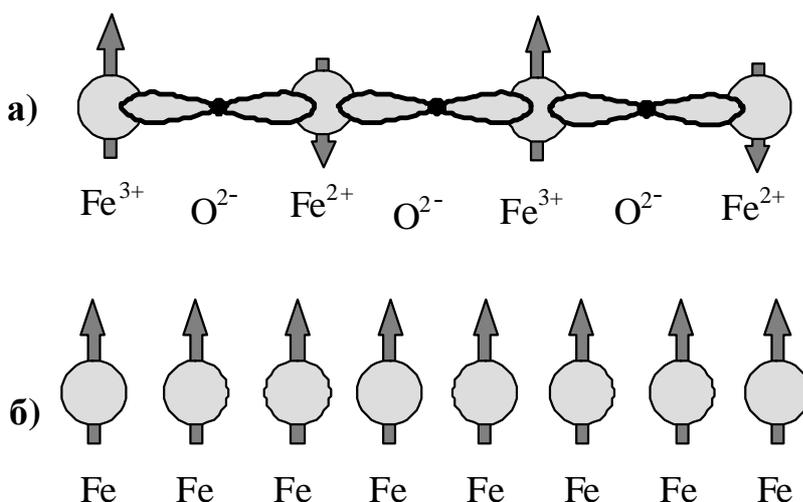


Рис. 8.1. Виды магнитного упорядочения атомов:
а) ферримагнитное упорядочение ($FeO \cdot Fe_2O_3$),
б) ферромагнитное упорядочение (Fe)

Во внешнем магнитном поле ферромагнетик намагничивается подобно ферромагнетику, в котором магнитные моменты атомов ориентированы в одну сторону (рис. 8, 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 вихревые токи в них очень маленькие, значит потери на вихревые токи в таком материале тоже маленькие, из-за чего ферриты широко применяются в высокочастотной технике.

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.

Магнитный гистерезис

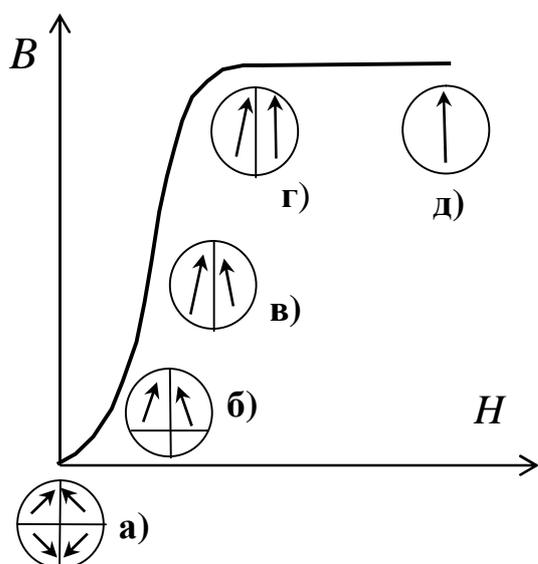


Рис. 8.2. Кривая намагничивания

Ферромагнетики обладают особыми магнитными свойствами благодаря обменно-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. 8.2, 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. Пока намагничивающее поле невелико, смещение границ доменов обратимо и точно следует за изменением поля (рис. 8.2, б). При увеличении поля смещение границ доменов становится необратимым, и энергетически невыгодные домены исчезают (рис. 8.2, в). Если поле увеличивать ещё, то происходит поворот магнитных моментов доменов (рис. 8.2, г). Наконец, в очень сильных полях магнитные моменты всех доменов устанавливаются параллельно намагничивающему полю, ферромагнетик намагничивается до насыщения (рис. 8.2, д).

Если размагниченный образец намагнитить до насыщения (т. 1 на рис. 8.3), 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 $B_{ост}$ (**остаточная индукция**). Для дальнейшего размагничивания надо изменить направление \dot{H} на противоположное. Уменьшение B пойдет по кривой 2–3, и при некотором значении $H_{коэр}$ намагниченность ферромагнетика станет равной нулю. Величину $H_{коэр}$ называют **коэрцитивной силой**.

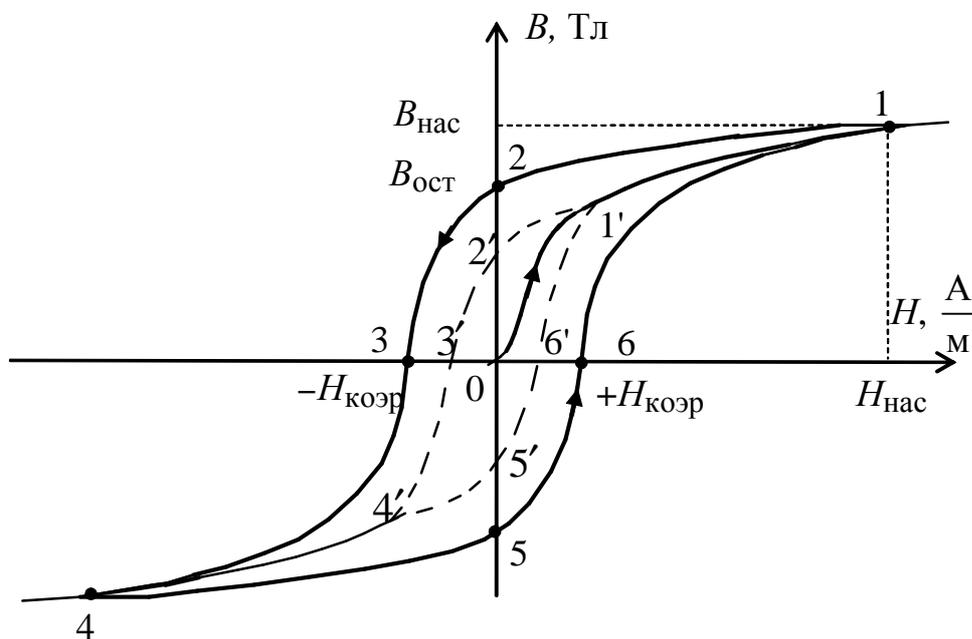


Рис. 8.3. Магнитный гистерезис

Увеличение H в том же направлении вновь приведёт к насыщению образца (т. 4 на рис. 8.3). 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).

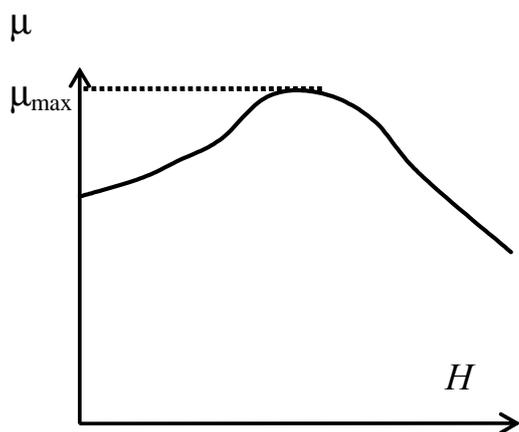


Рис. 8.4. Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от напряжённости поля

Нелинейная зависимость B от H приводит к тому, что магнитная проницаемость ферромагнетиков также зависит от напряжённости магнитного поля H (рис. 8.4).

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

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. 8.5.

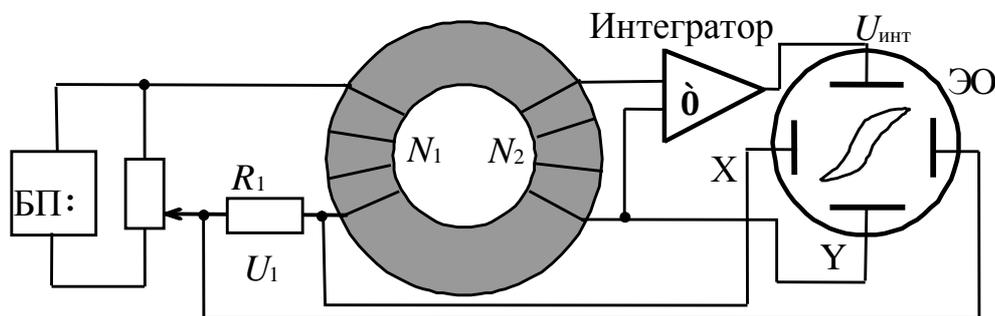


Рис. 8.5. Схема установки

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

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

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

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1}. \quad (8.3)$$

Тогда напряжённость магнитного поля будет равна

$$H = \frac{N_1}{lR_1} U_1 = n_1 \frac{U_1}{R_1}. \quad (8.4)$$

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

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

и индукционный ток

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

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:

$$U_{\text{инт}} = \frac{Q}{b} = \frac{N_2 S}{bR_2} B,$$

откуда следует

$$B = \frac{bR_2}{N_2 S} \cdot U_{\text{инт}} = k \cdot U_{\text{инт}}, \quad k = \frac{bR_2}{N_2 S}, \quad (8.8)$$

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), осциллограф, мультиметр, миниблоки «Сопротивление 100 Ом», «Интегратор тока», «Ферромагнетик».

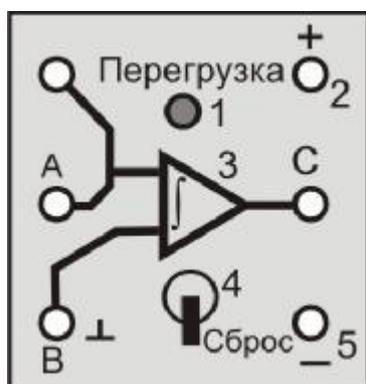


Рис. 8.6. Миниблок «Интегратор тока». Входы: А «+», В «^» или «-»; 1 – индикатор перегрузки; 3 – интегратор; 2 – питание интегратора «+15 В»; С – выход на вольтметр; 4 – демпферный ключ; 5 – питание интегратора «-15 В»

Этот миниблок 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».

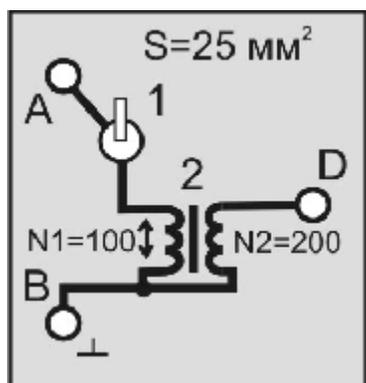


Рис. 8.7. Миниблок «Ферромагнетик»:

1 – переключатель направления тока в первичной обмотке, 2 – кольцевой ферромагнитный сердечник с первичной обмоткой N_1 (выводы АВ) и вторичной обмоткой N_2 (выводы ВD)

Этот миниблок предназначен для изучения магнитных свойств ферромагнетика.

На рис. 8.8 приведена электрическая схема установки.

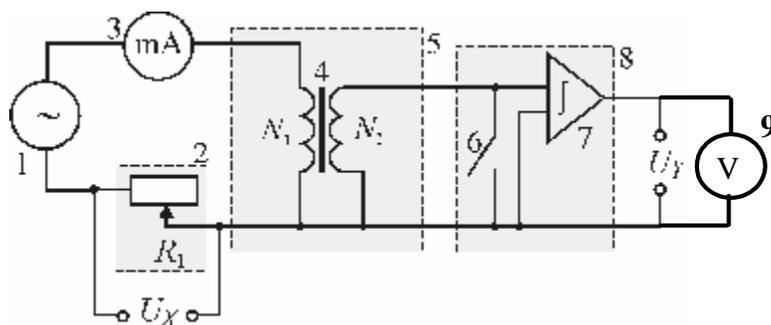


Рис. 8.8. 1 – ГССФ, 2 – миниблок «Сопротивление» 100 Ом, 3 – миллиамперметр, 5 – миниблок «Ферромагнетик» 8 – миниблок «Интегратор тока», U_x , U_y – напряжения, подаваемые на входы X и Y осциллографа; 9 – вольтметр

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.

Выполнение работы

1. Заполнить табл. 8.1 (см. бланк отчёта) и записать постоянные установки в табл. 8.2.
2. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 8.9.

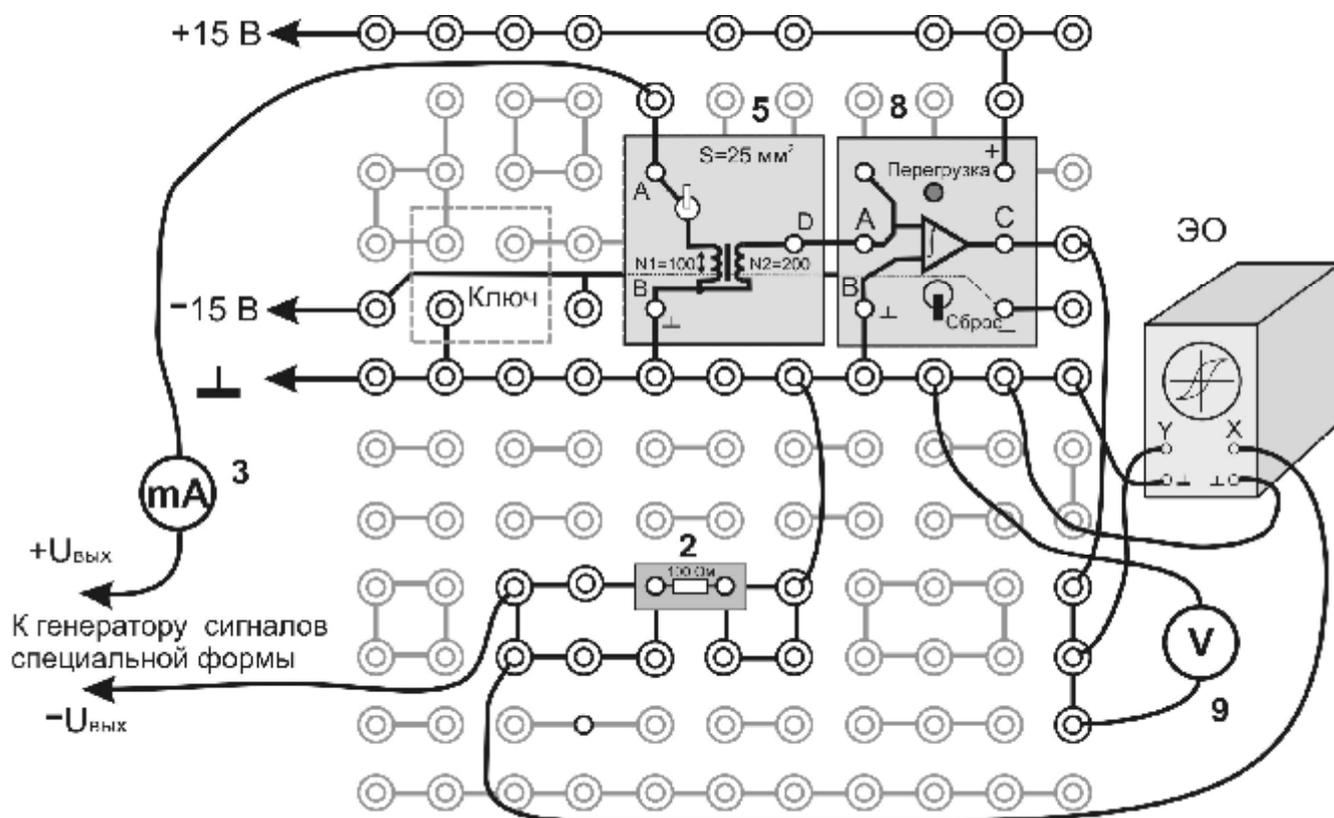


Рис. 8.9. Монтажная схема:

ЭО – электронный осциллограф; обозначения 2, 3, 5, 8, 9 – см. рис. 8.8

3. Переключатель рода работ мультиметра 3 (рис. 8.9) перевести в положение «A~» и установить предел измерения «200 mA», а мультиметра 9 – в положение «V~» и установить предел измерения «2 V».

4. Коаксиальный кабель подключить к входу осциллографа «CH2 (Y)», красный штекер кабеля соединить через наборное поле с выходом интегратора С, а синий – с шиной наборного поля «⊥» («земля»). Второй кабель подключить к входу «CH1 (X)» осциллографа, красный штекер кабеля соединить с входом А миниблока «Сопrotивление», а синий – с шиной наборного поля «⊥» («земля»).

5. Установить переключатели и регуляторы, расположенные на лицевой панели осциллографа, в положения, указанные в табл. 8.4 на рис. 8.11, если используется осциллограф «MOS-620», или в табл. 8.5 на рис. 8.12, если используется осциллограф «GOS-625».

6. Кнопками «СЕТЬ» включить питание блоков генераторов напряжений и мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка». Установить режим синусоидального напряжения. Установить в положение «Сброс» демпферный ключ миниблока «Интегратор тока». Кнопками «Установка частоты 0,2 – 20 кГц» на ГССФ установить частоту 0,5 кГц.

7. Включить кнопку «POWER» («СЕТЬ»), расположенную на панели осциллографа под экраном, при этом должен зажечься светодиодный индикатор. При помощи регуляторов «INTEN» и «FOCUS», расположенных там же, установить соответственно оптимальную яркость и фокусировку луча.

Внимание! Для предотвращения повреждения люминофора электронно-лучевой трубки не устанавливайте чрезмерную яркость луча и не оставляйте без необходимости длительное время неподвижное пятно на экране.

С помощью регуляторов «< POSITION >» и «POSITION $\frac{D}{\bar{N}}$ » вывести электронный луч в центр координатной сетки экрана.

8. Кнопкой D «Установка уровня выхода 0 ... 15 В» генератора сигналов специальной формы увеличивать ток I_1 в первичной обмотке до получения на экране осциллографа изображения *предельной* петли гистерезиса. Петля считается предельной, если у неё появляются «усы» и рост тока не приводит к увеличению её площади. Для ферромагнетиков, используемых в работе, ток $I_1^{\text{пред}}$ равен примерно 55-60 мА. Измерить по мультиметрам ток $I_1^{\text{пред}}$ и напряжение $U_{\text{инт}}^{\text{пред}}$. Результаты записать в табл. 8.2.

9. Медленно вращая по часовой стрелке регулятор 15 «VOLTS/DIV» (MOS-620) или 11 «VAR» (GOS-625) на панели осциллографа, увеличить вертикальный размер петли примерно до 8 больших делений масштабной сетки экрана.

10. Медленно вращая по часовой стрелке регулятор 6 «VOLTS/DIV» (MOS-620) или 7 «VAR» (GOS-625) на панели осциллографа, увеличить горизонтальный размер петли примерно до 10 больших делений масштабной сетки экрана.

11. Регуляторами осциллографа «< POSITION >» и «POSITION $\frac{D}{N}$ » установить петлю симметрично относительно центра координатных осей X-Y.

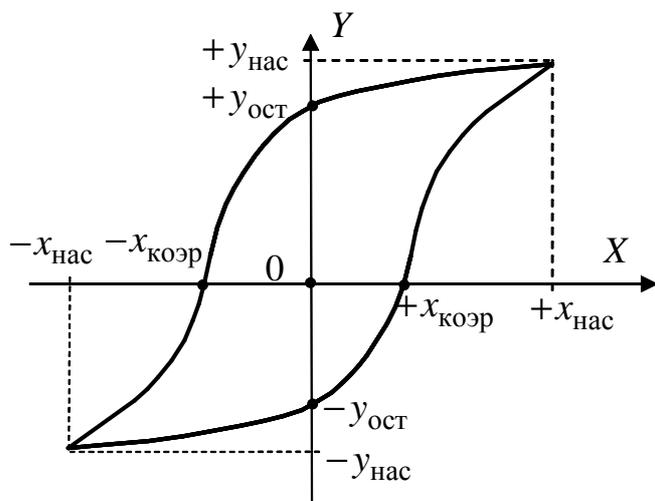


Рис. 8.10. Предельная петля гистерезиса

более 25 мА с шагом примерно 5-10 мА до 100 мА, 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 $U_{\text{инт}}$. Результаты измерений занести в табл. 8.3.

12. По координатной сетке экрана или линейкой по рисунку 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. 8.10).

13. Размагнитить образец. Для этого, постепенно уменьшая ток I_1 , довести его до нуля. При этом площадь петли уменьшится до размеров точки.

14. 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 100 мА, 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 $U_{\text{инт}}$. Результаты измерений занести в табл. 8.3.

15. Нажать кнопку «Исходная установка» и кнопками «СЕТЬ» и «POWER» выключить питание блоков генераторов напряжения, мультиметров и осциллографа. Разобрать электрическую цепь установки.

Обработка результатов измерений

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

$$H_{\text{коэр}} = H_{\text{нас}} \frac{x_{\text{к}}}{x_{\text{нас}}}, \quad B_{\text{ост}} = B_{\text{нас}} \frac{y_{\text{ост}}}{y_{\text{нас}}}. \quad (8.12)$$

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

3. Результаты расчетов занести в таблицы 8.2 и 8.3 и построить графики зависимостей $B = f(H)$ и $\mu = g(H)$.

Оценка погрешностей

1. **Систематические относительные** погрешности косвенных измерений магнитной индукции, напряжённости магнитного поля и магнитной проницаемости, рассчитанные по формулам (8.9), (8.10) и (8.1) могут быть оценены по формулам:

$$\gamma_B = \frac{\theta U_{\text{инт}}}{U_{\text{инт}}}, \quad \gamma_H = \frac{\theta I_1}{I_1}, \quad \gamma_\mu = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\theta U_{\text{инт}}}{U_{\text{инт}}}\right)^2 + \left(\frac{\theta I_1}{I_1}\right)^2}, \quad (8.13)$$

где $\frac{\theta U_{\text{инт}}}{U_{\text{инт}}}$, $\frac{\theta I_1}{I_1}$ – **систематические относительные** погрешности прямых измерений напряжения $U_{\text{инт}}$ и тока I_1 (см. табл. 8.1 отчёта).

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

ОТЧЁТ

по лабораторной работе

«Изучение свойств ферромагнетика с помощью петли гистерезиса»

Исполнитель: студент(ка) гр. _____

Цель работы:

Краткое описание метода исследования:

Расчетные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать их наименование в СИ)....

Оборудование:

Средства измерений и их характеристики

Таблица 8.1

Наименование прибора	Предел допускаемой относительной погрешности (в % от измеренного значения)	Абсолютная погрешность
Амперметр (3)	$\theta I_1 / I_1 = 1,0 \%$	—
Вольтметр (9)	$\theta U_{\text{инт}} / U_{\text{инт}} = 0,8 \%$	—
Линейка	—	$\theta l = 0,5 \text{ мм}$

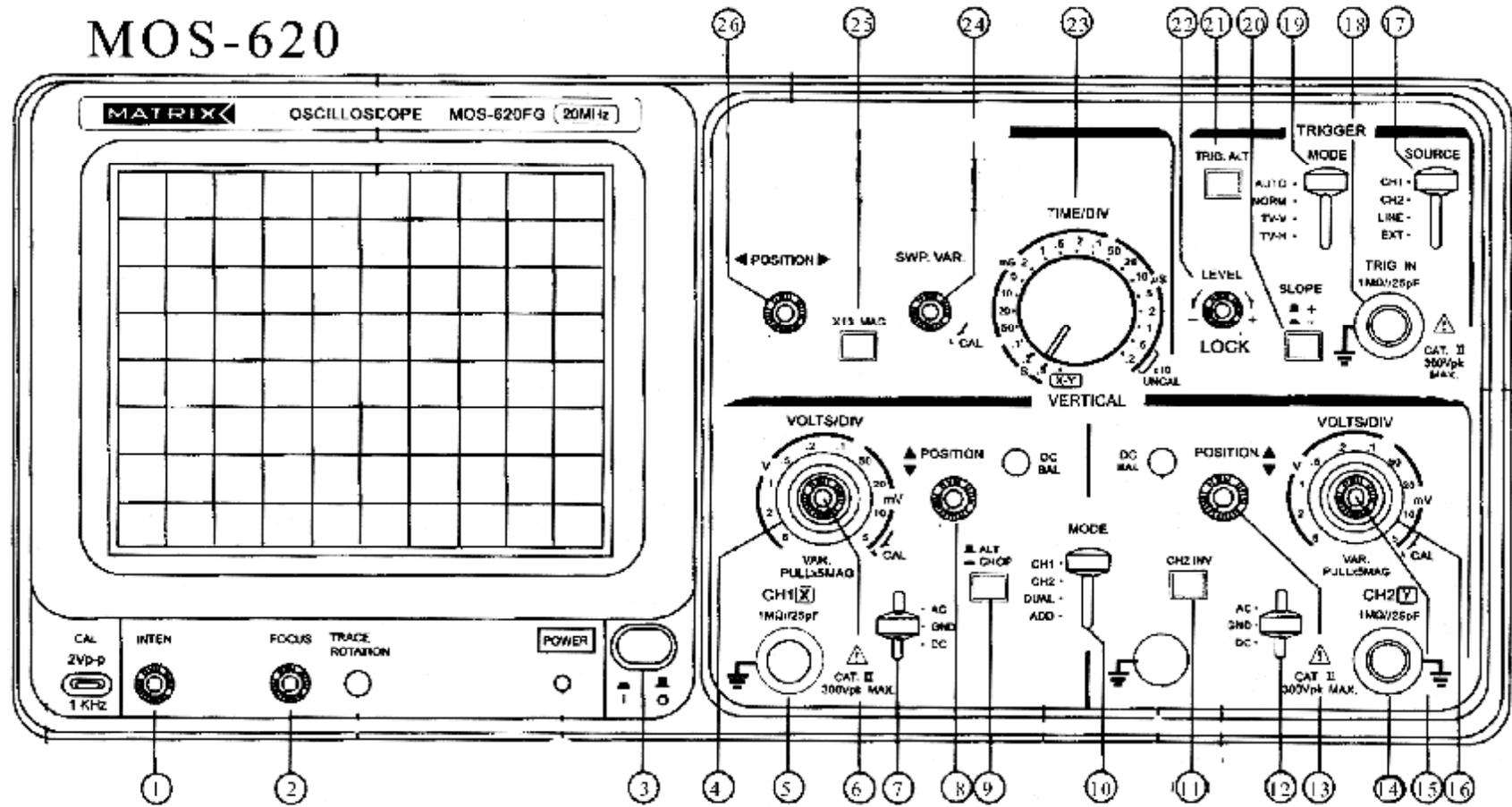


Рис. 8.11. Передняя панель осциллографа MOS-620 и таблица положений органов управления

Таблица 8.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
*	*	+	1v	X	/	AC	*	-	CH2	-	AC	*	Y	/	0,2v	н	н	н	н	н	н	XY	/	-	*

«+» – нажать, «-» – отжать, «*» – среднее положение, «/» – против часовой стрелки до упора, «н» – не используется

GOS-625

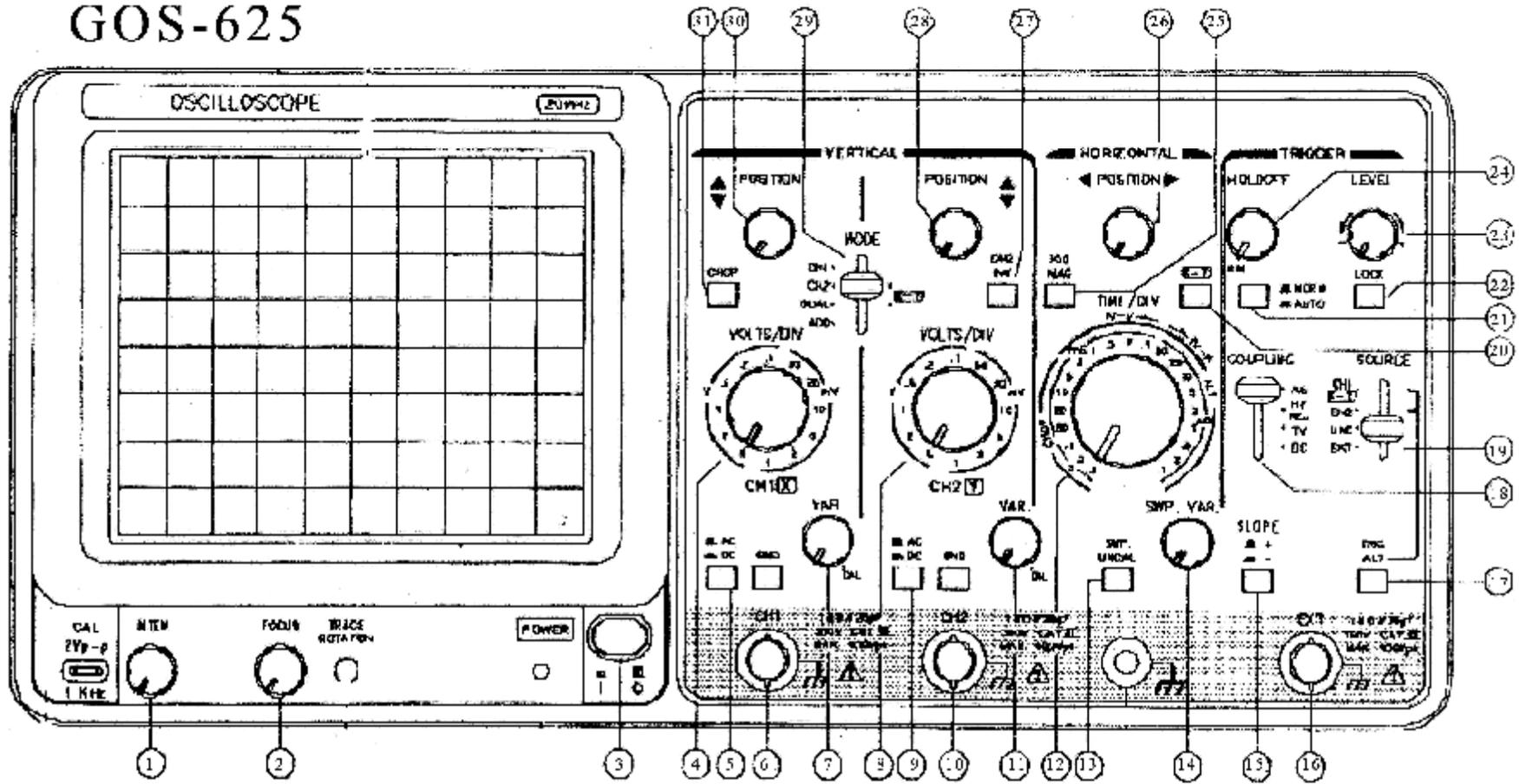


Рис. 8.12. Передняя панель осциллографа GOS-625 и таблица положений органов управления

Таблица 8.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	25	26	27	28	29	30	31
*	*	+	1v	-	X	/	1v	-	Y	/	н	-	/	-	н	-	н	XY	+	-	*	-	*	CH2	*	-

«+» – нажать, «-» – отжать, «*» – среднее положение, «/» – против часовой стрелки до упора, «н» – не используется

Лабораторная работа Э-9 ПОСТРОЕНИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКА МЕТОДОМ СТОЛЕТОВА

Цель работы: построение основной кривой намагничивания $B = f(H)$ и графика зависимости магнитной проницаемости от напряжённости магнитного поля ферромагнетика $\mu = g(H)$.

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

Описание метода исследования

Впервые полное экспериментальное исследование зависимости $B = f(H)$ 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 кольце 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

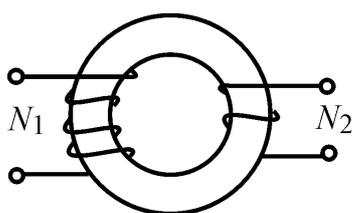


Рис. 9.1. Трансформатор

$$\Phi = BS. \quad (9.2)$$

При его изменении во вторичной обмотке возникает ЭДС индукции

$$e_i = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (9.3)$$

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

$$\Delta\Phi = -2\Phi = -2BS. \quad (9.4)$$

Если цепь вторичной обмотки замкнуть, то в ней потечёт ток

$$I_2 = \frac{e_i}{R} = -\frac{N_2}{R} \frac{d\Phi}{dt}, \quad (9.5)$$

где R – сопротивление цепи вторичной обмотки.

При протекании индукционного тока I_2 в этой цепи протекает заряд Q , величину которого можно рассчитать, используя формулы (9.4), (9.5):

$$Q = \int_0^t I_2 dt = \int_{+\Phi}^{-\Phi} \left(-\frac{N_2}{R} \frac{d\Phi}{dt} \right) dt = -\frac{N_2}{R} \Delta\Phi = 2 \frac{N_2}{R} BS. \quad (9.6)$$

Выражая из этого равенства индукцию магнитного поля, получим

$$B = \frac{QR}{2N_2S}. \quad (9.7)$$

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 $U_{\text{инт}}$

$$Q = b \cdot U_{\text{инт}}, \quad (9.8)$$

где b – постоянная интегратора; $U_{\text{инт}}$ – отсчёт по вольтметру.

Используя выражения (9.7) и (9.8), можно получить расчётную формулу для индукции магнитного поля в исследуемом кольцевом сердечнике:

$$B = \frac{bR}{2N_2S} \cdot U_{\text{инт}} = k \cdot U_{\text{инт}}, \quad k = \frac{bR}{2N_2S} \quad (9.9)$$

Описание установки

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

Электрическая схема установки показана на рис. 9.2, монтажная – на рис. 9.3.

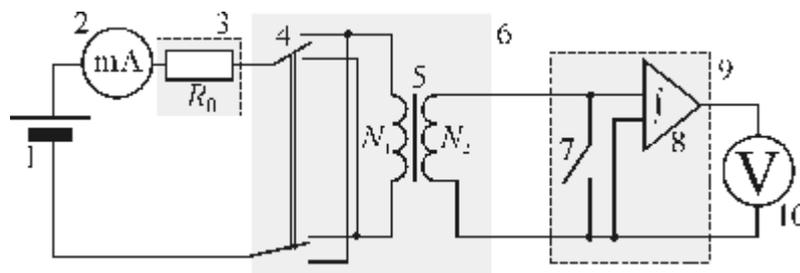


Рис. 9.2. Электрическая схема:

1 – источник постоянного регулируемого напряжения 0...15 В; 2 – амперметр; 3 – блок «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

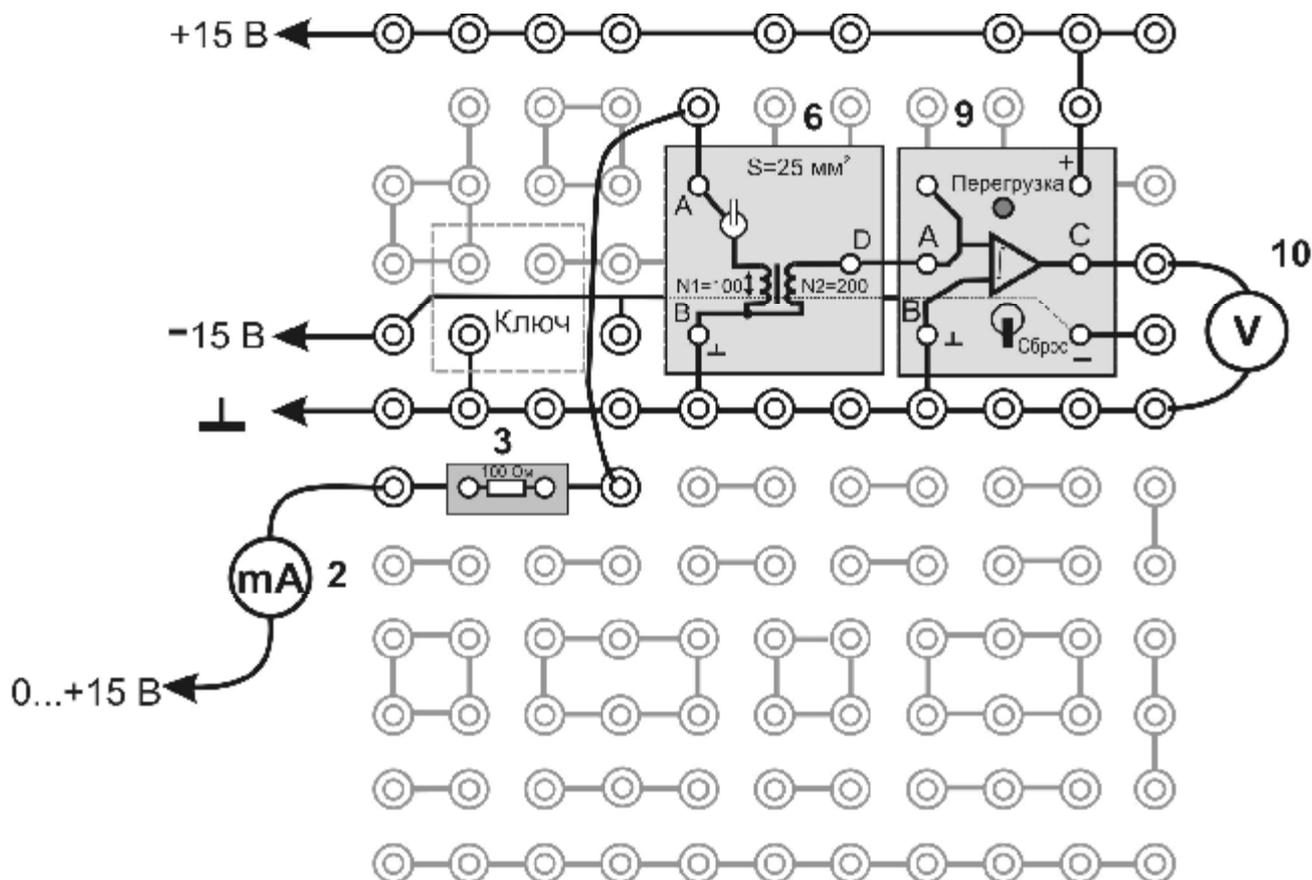


Рис. 9.3. Монтажная схема: позиции 2, 3, 6, 9, 10 – см. рис. 9.2

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 обмотке.

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 $B_{ост}$, то для получения основной кривой намагничивания нет необходимости проводить предварительное размагничивание сердечника.

Выполнение работы

1. Заполнить табл. 9.1 (см. бланк отчёта).
2. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 9.3.

Внимание! На общий вход **COM** мультиметров 2 и 10 подаётся отрицательное напряжение (провод «-» или «^»), на входы **VW** и **mA** – положительное напряжение (провод «+»).

3. Переключатель рода работ мультиметра 2 (рис. 9.3) перевести в положение «A:~» и установить предел измерения «200 mA», а мультиметра 10 – в положение «V:~» и установить предел измерения «20 V».

4. Включить в сеть блоки питания генераторов напряжения и мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка». Демпферный ключ 7 «Интегратора тока» установить в положение «Сброс».

5. Кнопками «Установка напряжения 0 ... +15 В» источника постоянного напряжения установить в первичной обмотке ток $I_1 = 6$ мА.

6. Разомкнуть демпфирующий ключ 7. Переключатель 4 перевести в *верхнее* положение, отмечая одновременно максимальное показание $U_{1\text{ инт}}$ вольтметра. Записать его в табл. 9.2 (см. бланк отчёта). Перевести ключ 7 в положение «Сброс».

7. Разомкнуть демпфирующий ключ 7. Переключатель 4 перевести в *нижнее* положение, отмечая одновременно максимальное показание $U_{2\text{ инт}}$ вольтметра. Записать его в табл. 9.2. Перевести ключ 7 в положение «Сброс».

8. Последовательно задавая значения тока с шагом 2-3 мА до 20 мА, а затем с шагом 5-10 мА до 100 мА, измерить по пп. 5, 6 для каждого тока максимальные показания вольтметра $U_{1\text{ инт}}$ и $U_{2\text{ инт}}$. Результаты занести в табл. 9.2.

9. **Выключить из сети** блоки питания генераторов напряжений и мультиметров.

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать среднее значение $\langle U_{\text{инт}} \rangle$ для каждого тока.

2. Рассчитать константы n_1 и k , необходимые для вычислений величин H и B по формулам (9.1) и (9.9), используя значения параметров установки и исследуемого образца.

3. Для каждого значения тока рассчитать величины H и B по формулам (9.1) и (9.9).

4. Вычислить магнитную проницаемость μ по формуле $\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$ ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м) для каждого значения H . Результаты расчетов записать в табл. 9.2.

5. По данным табл. 9.2 построить основную кривую намагничивания $B = f(H)$ и график зависимости $\mu = g(H)$.

6. В выводе по работе отразить особенности формы опытных кривых:

а) сопоставить ход кривой намагничивания с положением максимума на графике $\mu = g(H)$;

б) сравнить полученные кривые с известными теоретическими и экспериментальными зависимостями.

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

ОТЧЁТ
по лабораторной работе
«Построение кривой намагничивания ферромагнетика методом Столетова»

Исполнитель: студент(ка) гр. _____

Цель работы:

Краткое описание метода исследования:

Расчётные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать их наименование в СИ)

Оборудование:

Средства измерений и их характеристики

Таблица 9.1

Наименование прибора	Предел допускаемой относительной погрешности (в % от измеренного значения)
Амперметр (2)	1,5%
Вольтметр (10)	0,5 %

Результаты измерений

Таблица 9.2

Параметры установки: $b = 2,4 \cdot 10^{-7}$ Кл/В, $R = 2,5$ кОм, $N_1 = 100$ вит., $N_2 = 200$ вит., $l = 5$ см, $S = 25$ мм ²							
№	I_1 , мА	$U_{1 \text{ инт}}$, В	$U_{2 \text{ инт}}$, В	$\langle U_{\text{инт}} \rangle$, В	B , Тл	H , А/м	μ
1							
2							
...							
N							

Результаты расчётов

1. $n_1 = \dots = \dots \text{ м}^{-1}$;

2. $k = \dots = \dots \frac{\text{Кл} \times \text{Ом}}{\text{В} \times \text{м}^2}$;

3. $H = \dots = \dots \text{ А/м}$;

4. $B = \dots = \dots \text{ Тл}$;

5. $\mu = \dots = \dots$

6. Вывод.

Написать формулу, показать расчёт и записать результат!

Расчёты п. 3, 4, 5 показать для одного любого значения из табл. 9.2.

Примечание. Построенные согласно табл. 9.2 графики $B = f(H)$ и $\mu = g(H)$ прилагаются к отчёту.

Лабораторная работа Э-10

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРОМАГНЕТИКА ОТ НАПРЯЖЁННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Цель работы: построение графика зависимости магнитной проницаемости ферромагнетика от напряжённости магнитного поля $\mu = f(H)$ и основной кривой намагничивания $B = f(H)$.

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

Рассмотрим замкнутую тороидальную катушку, имеющую ферромагнитный сердечник. По причине, указанной выше, те характеристики катушки, которые связаны с магнитной проницаемостью сердечника, будут зависеть от значения H .

К таким характеристикам относятся, например, индуктивность катушки

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l} \quad (10.1)$$

и её индуктивное сопротивление переменному току

$$X_L = \omega L, \quad (10.2)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; N – число витков, S – площадь поперечного сечения сердечника; l – длина средней осевой линии сердечника; ω – циклическая частота переменного тока.

Описание метода исследования

В данной работе измерение магнитной проницаемости сердечника μ основано, согласно формуле (10.1), на измерениях индуктивности L катушки и её геометрических параметров N , l и S . Для определения индуктивности достаточно измерить индуктивное сопротивление катушки переменному току известной частоты ω . Полное сопротивление катушки переменному току

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} \approx \omega L, \quad (10.3)$$

так как на частоте свыше 200 Гц обычно $R \ll X_L$, и активным сопротивлением катушки R можно пренебречь.

Закон Ома позволяет определить величину Z путём измерений тока I и напряжения U на участке цепи, содержащем катушку

$$Z = \frac{U}{I}. \quad (10.4)$$

Расчётная формула для определения магнитной проницаемости, полученная с использованием выражений (10.1), (10.3), (10.4), имеет следующий вид:

$$\mu = \frac{Ll}{\mu_0 N^2 S} = \frac{Ul}{I \omega \mu_0 N^2 S} = b \frac{U}{I}, \quad (10.5)$$

где $b = \frac{l}{\omega \mu_0 N^2 S}$ – постоянная установки.

Напряжённость магнитного поля, которое создаётся в кольцевом сердечнике при протекании по обмотке тока I , можно рассчитать по формуле

$$H = \frac{NI}{l}. \quad (10.6)$$

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

$$B = \mu_0 \mu H. \quad (10.7)$$

Определяя величины H , μ и B при различных токах, можно экспериментально установить следующие зависимости:

а) $B = f(H)$ – зависимость магнитной индукции от напряжённости магнитного поля (основная кривая намагничивания ферромагнетика);

б) $\mu = f(H)$ – зависимость магнитной проницаемости сердечника от напряжённости магнитного поля.

Описание установки

Оборудование: миниблоки «Ферромагнетик», «Сопротивление», генератор сигналов специальной формы, мультиметры.

Электрическая схема установки показана на рис. 10.1, монтажная – на рис. 10.2.

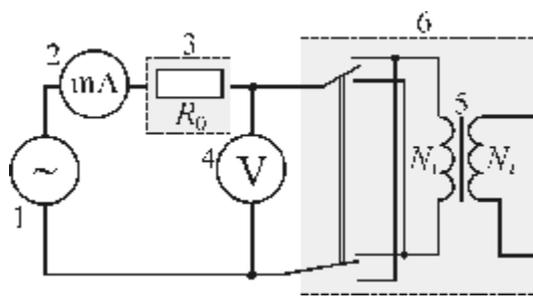


Рис. 10.1. Электрическая схема:

1 – генератор сигналов специальной формы; 2 – мультиметр (режим $A \sim 200 \text{ mA}$, входы COM, A); 3 – блок «Сопротивление», $R_0 = 100 \text{ Ом}$; 4 – мультиметр (режим $V \sim 2 \text{ V}$, входы COM, VW); 5 – кольцевой сердечник с обмотками N_1 и N_2 ; 6 – блок «Ферромагнетик»

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. По параметрам обмотки определяют напряжённость H намагничивающего поля. Генератор напряжений специальной формы 1 позволяет изменять напряжение U , и ток I в обмотке тороида. Эти величины измеряют соответственно вольтметром 4 и миллиамперметром 2.

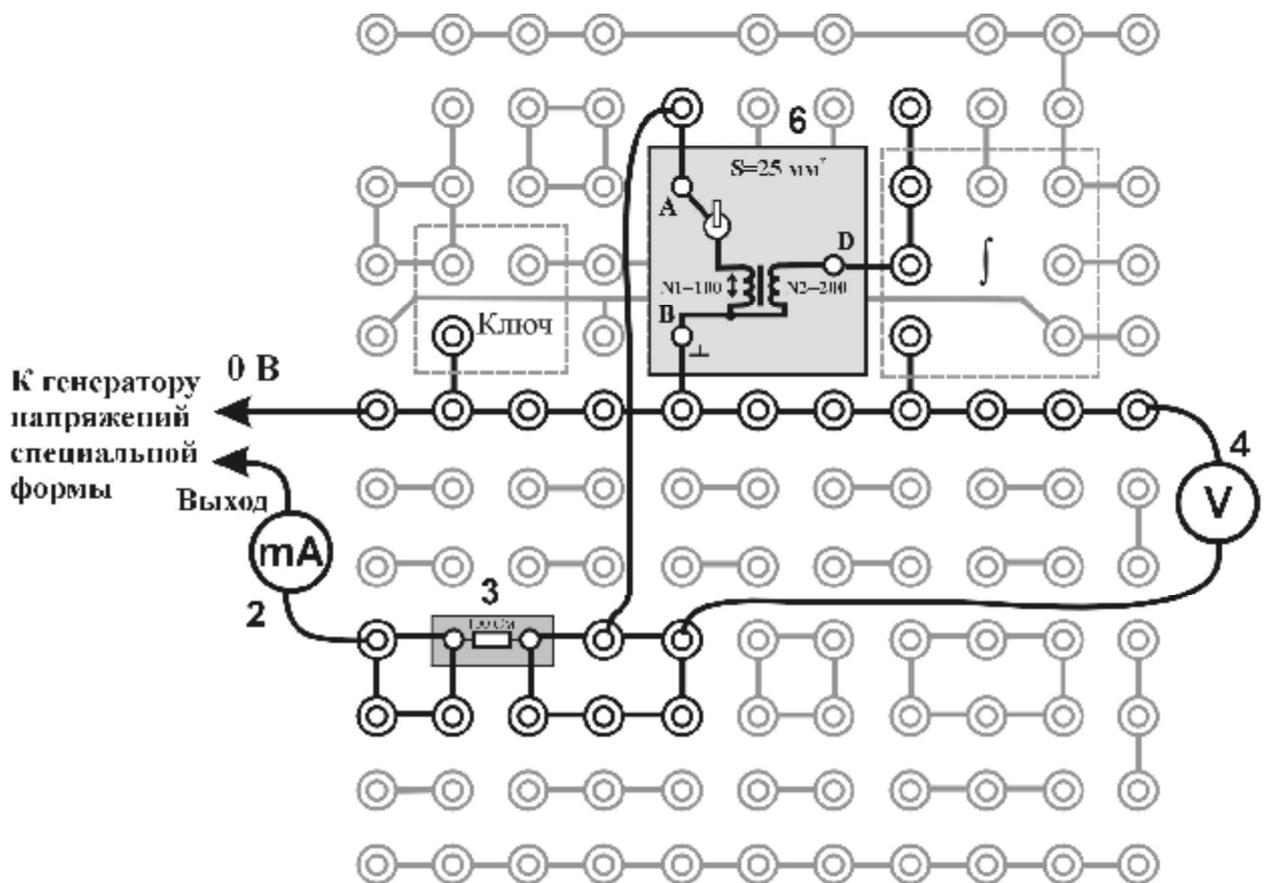


Рис. 10.2. Монтажная схема:
обозначения 2, 3, 4, 6 – см. рис. 10.1

Выполнение работы

1. Заполнить табл. 10.1 (см. бланк отчёта).
2. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 10.2. Включить в сеть блоки питания генераторов напряжений и мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка».
3. Кнопками «Установка частоты 0,2 – 20 кГц» установить любую частоту ν от 200 Гц до 500 Гц. Записать значение ν в табл. 10.2.
4. Кнопками «Установка уровня выхода 0 ... 15 В» генератора сигналов установить в обмотке тороида указанные в табл. 10.2 токи I и измерить для каждого из них значение напряжения U . Результаты записать в табл. 10.2 (см. бланк отчёта). Рекомендуется проводить измерения с шагом 2–3 мА при токах I до 10 мА и с шагом 5–10 мА при токах I свыше 10 мА.
5. **Выключить из сети** блоки питания генераторов напряжений и мультиметров.

Обработка результатов измерений

1. Вычислить по формуле (10.5) постоянную установки b .
2. По формулам (10.5), (10.6) и (10.7) для каждого значения тока рассчитать величины H , μ и B . Результаты расчётов записать в табл. 10.2.
3. По данным табл. 10.2 построить основную кривую намагничивания $B = f(H)$ и график зависимости $\mu = f(H)$.

4. В выводе по работе отразить особенности формы опытных кривых:
- сопоставьте ход кривой намагничивания с положением максимума на графике $\mu = f(H)$.
 - сравните полученные кривые с известными теоретическими и экспериментальными зависимостями.
5. Оформить отчёт о выполнении работы в соответствии с прилагаемым образцом.

ОТЧЁТ
по лабораторной работе
«Изучение зависимости магнитной проницаемости ферромагнетика от напряжённости магнитного поля»

Исполнитель: студент(ка) гр. _____

Цель работы:

Краткое описание метода исследования:

Расчётные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать их наименование в СИ)

Оборудование:

Средства измерений и их характеристики

Таблица 10.1

Наименование прибора	Предел допускаемой основной относительной погрешности (в % от измеренного значения)
Амперметр (2)	1,8%
Вольтметр (4)	0,8 %

Результаты измерений

Таблица 10.2

$N = 100$ вит., $l = 5$ см, $S = 25$ мм², $\nu = \dots$ Гц, $\omega = 2\pi\nu = \dots$ с⁻¹, $b = \dots$ А/В

№	I_1 , мА	U , В	H , А/м	B , Тл	μ
1					
...					
N					

Расчёты

- $b = \dots = \dots$ А/В;
- $\mu = \dots = \dots$;
- $H = \dots = \dots$ А/м;
- $B = \dots = \dots$ Тл.
- Вывод.

Написать формулу, показать расчёт и записать результат!

Расчёты п. 2, 3, 4 показать для одного любого значения из табл. 10.2.

Примечание. Построенные согласно табл. 10.2 графики $B = f(H)$ и $\mu = f(H)$ прилагаются к отчёту.

Лабораторная работа Э-11 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ ФЕРРИМАГНЕТИКА

Цель работы: наблюдение за петлёй гистерезиса в процессе нагревания ферримагнетика, исследование температурной зависимости индукции магнитного поля ферримагнетика, определение его точки Кюри.

Внимание: Для подготовки и выполнения работы необходимо использовать описание работы Э-8.

Ферримагнетики (ферриты) обладают особыми магнитными свойствами благодаря упорядочению магнитных моментов ионов, в результате которого возникают области спонтанного намагничивания – домены. В пределах каждого домена феррит намагничен до насыщения.

При нагревании ферримагнетика выше температуры Кюри (точки Кюри) тепловое движение разрушает его доменную структуру и вместе с этим исчезают все особенности ферримагнитного состояния: вещество переходит в парамагнитное состояние.

Описание метода исследования

Определить точку Кюри феррита можно по изменению предельной петли магнитного гистерезиса в процессе нагрева. Электрическая схема установки изображена на рис. 11.1.

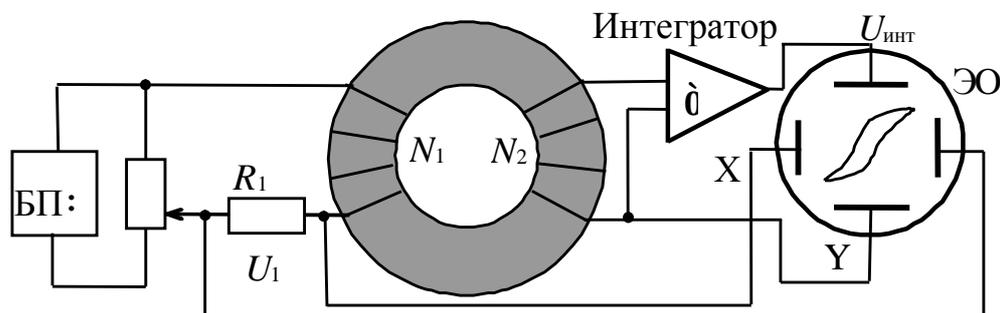


Рис. 11.1. Схема установки

На ферритовый 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.

В работе Э-8 описан метод определения индукции магнитного поля в ферромагнетике с помощью предельной петли гистерезиса, и получена формула для магнитной индукции насыщения в вершине петли гистерезиса

$$B_{\text{нас}} = kU_{\text{инт}}\sqrt{2}, \quad (11.1)$$

где

$$k = \frac{b \cdot R_2}{N_2 \cdot S} \quad (11.2)$$

– коэффициент, зависящий от параметров установки, $U_{\text{инт}}$ – действующее значение выходного напряжения интегратора.

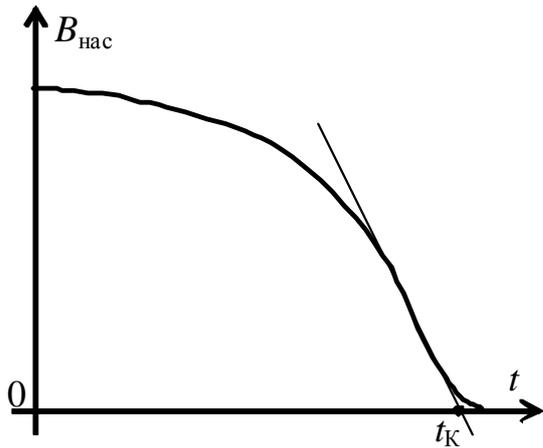


Рис. 11.2. Зависимость индукции насыщения ферромагнетика от температуры

данного феррита путём экстраполяции. Если температура феррита приближается к точке Кюри, то $B_{\text{нас}} \rightarrow 0$.

Описание установки

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

Электрическая схема цепи представлена на рис. 11.3, монтажная – на рис. 11.4.

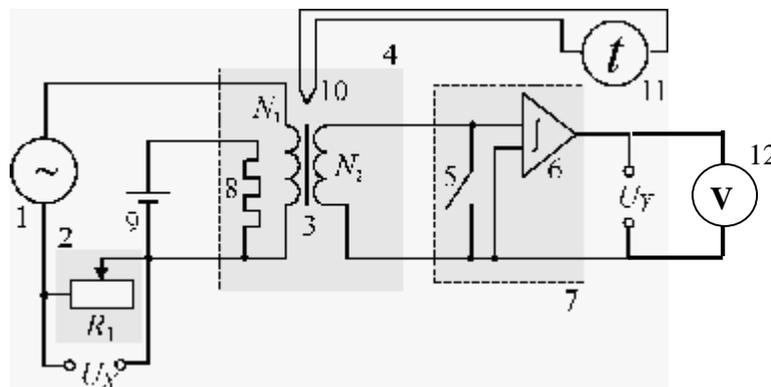


Рис. 11.3. Электрическая схема:

1 – генератор сигналов специальной формы; 2 – миниблок «Сопротивление» 100 Ом; 3 – тороид с первичной N_1 и вторичной N_2 обмотками; 4 – миниблок «Точка Кюри»; 5 – демпферный ключ; 6 – интегратор; 7 – миниблок «Интегратор тока» (положение тумблера «Сброс»); 8 – электронагреватель; 9 – источник регулируемого постоянного напряжения 0 ... +15 В; 10 – термопара; 11 – мультиметр (режим °С, входы ТЕМР); U_X – напряжение на входе X осциллографа; $U_{\text{инт}} = U_Y$ – напряжение на входе Y осциллографа; 12 – мультиметр (режим V~ 2, входы СОМ, V W)

Первичная N_1 и вторичная N_2 обмотки намотаны на ферритовой кольцевой сердечник **3**. Первичную обмотку, по которой протекает переменный ток, используют для намагничивания ферромагнетика. Вторичная обмотка предназначена для измерения индукции B магнитного поля в сердечнике. Для этого напряжение $U_{\text{инт}}$ с интегратора тока **7** измеряется вольтметром **12** и подаётся на вход Y осциллографа для наблюдения петли гистерезиса на его экране. Электронагреватель **8** нагревает исследуемый феррит. Рядом с ним расположена термопара **10**, предназначенная для измерения температуры образца с помощью мультиметра **11**.

Выполнение работы

1. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 11.4.
2. Переключатель рода работ мультиметра **12** перевести в положение « $V\sim$ » и установить предел измерения « 2 V », а мультиметр **11** – в режим « $^{\circ}\text{C}$ ».
3. Коаксиальный кабель подключить к входу осциллографа «CH2 (Y)», красный штекер кабеля соединить через наборное поле с выходом интегратора C , а синий – с шиной наборного поля « \perp » («земля»). Второй кабель подключить к входу «CH1 (X)» осциллографа, красный штекер кабеля соединить с сопротивлением 100 Ом , а синий – с шиной наборного поля « \perp » («земля»).
4. Установить переключатель развёртки, расположенный на лицевой панели осциллографа, в положение $X\text{-}Y$. Все настройки осциллографа такие же, как в лабораторной работе № Э-8.
5. Кнопками «СЕТЬ» включить питание блоков генераторов напряжений и мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка». Установить режим синусоидального напряжения. Установить в положение «Сброс» демпферный ключ миниблока «Интегратор тока». Кнопками «Установка частоты $0,2 - 20\text{ кГц}$ » на ГССФ установить частоту **$0,5\text{ кГц}$ (500 Гц)**.
6. Включить кнопку «POWER» («СЕТЬ»), расположенную на панели осциллографа под экраном, при этом должен зажечься светодиодный индикатор. При помощи регуляторов «INTEN» и «FOCUS», расположенных там же, установить соответственно оптимальную яркость и фокусировку луча.

Внимание! Для предотвращения повреждения люминофора электронно-лучевой трубки не устанавливайте чрезмерную яркость луча и не оставляйте без необходимости длительное время неподвижное пятно на экране.

С помощью регуляторов «< POSITION >» и «POSITION $\frac{D}{N}$ » вывести электронный луч в центр координатной сетки экрана.

7. Кнопкой D «Установка уровня выхода $0 \dots 15\text{ В}$ » генератора сигналов специальной формы увеличивать ток I_1 в первичной обмотке до получения на экране осциллографа изображения **предельной** петли гистерезиса. Петля считается предельной, если у неё появляются «усы» и рост тока не приводит к увеличению её площади.

8. Медленно вращая по часовой стрелке регулятор «VOLTS/DIV» (MOS-620) или «VAR» (GOS-625) на панели осциллографа, увеличить вертикальный размер петли примерно до 8 больших делений масштабной сетки экрана.

9. Медленно вращая по часовой стрелке регулятор «VOLTS/DIV» (MOS-620) или «VAR» (GOS-625) на панели осциллографа, увеличить горизонтальный размер петли примерно до 10 больших делений масштабной сетки экрана.

10. Регуляторами осциллографа «< POSITION >» и «POSITION $\frac{D}{N}$ » установить петлю симметрично относительно центра координатных осей X-Y.

11. Измерить температуру t °С сердечника и напряжение на выходе интегратора U , соответствующие магнитной индукции насыщения $B_{\text{нас}}$. Результаты измерений записать в табл. 11.2 (см. бланк отчёта).

12. Кнопками «Установка напряжения 0 ... +15 В» регулируемого источника постоянного напряжения выставить по световому индикатору среднее значение. Если нагрев будет происходить слишком медленно, то можно увеличить напряжение на нагревателе.

13. По мере нагревания образца через каждые 5° С, измерять температуру t , °С и напряжение $U_{\text{инт}}$ до тех пор, пока петля гистерезиса не превратится в прямую линию. Для повышения точности можно растягивать изображение по вертикали по мере необходимости. Результаты измерений записать в табл. 11.2.

14. **Выключить из сети** блоки питания генераторов напряжений и мультиметров.

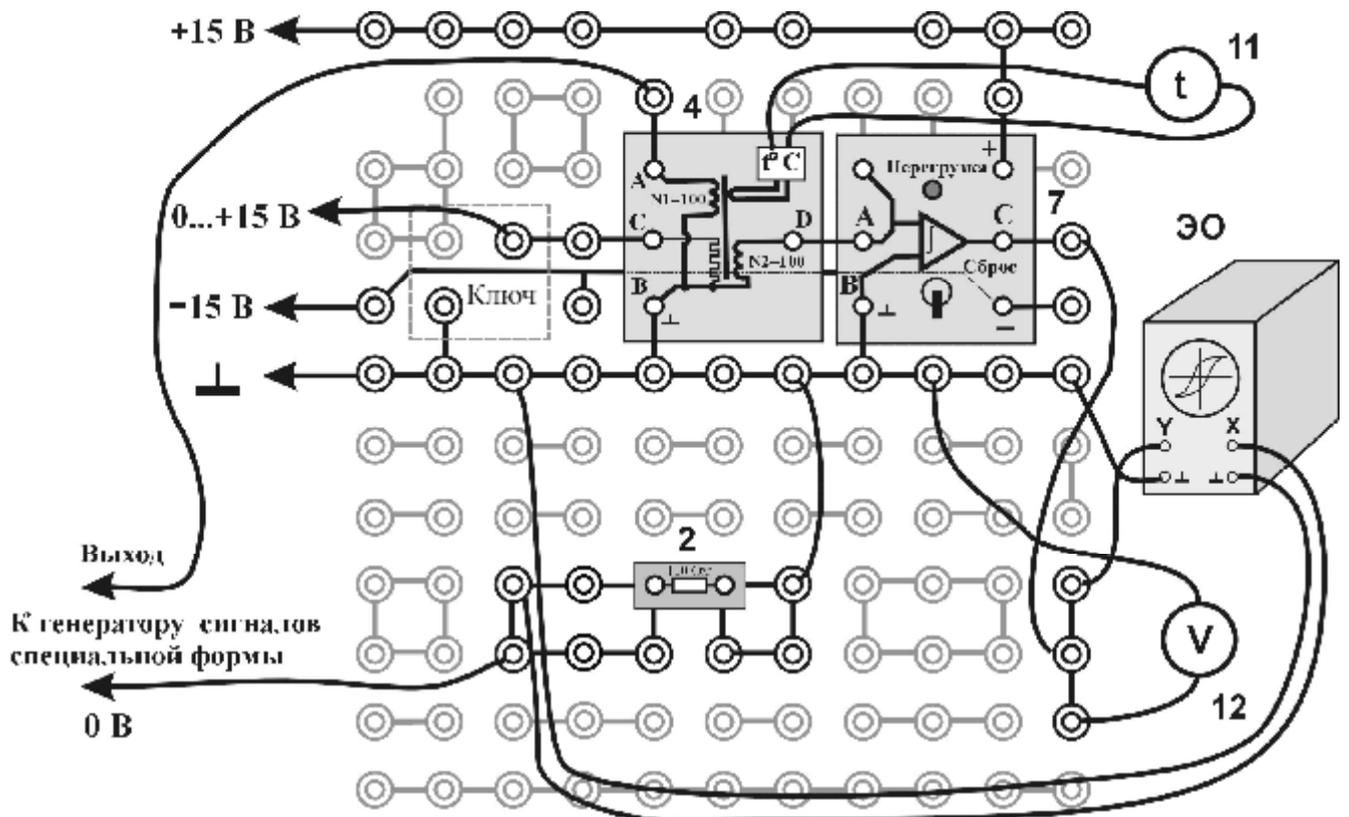


Рис. 11.4. Монтажная схема:
ЭО – электронный осциллограф; 2, 4, 7, 11, 12 – см. рис. 11.3

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать по формуле (11.2) коэффициент k , зависящий от параметров установки.
2. По данным табл. 11.2 рассчитать по формуле (11.1) значения магнитной индукции насыщения $B_{\text{нас}}$ для каждой температуры.
3. Используя результаты расчетов табл. 11.2, построить график зависимости $B_{\text{нас}} = f(t)$.
4. По графику определить температуру Кюри путём экстраполяции.

Отчёт по лабораторной работе «Определение точки Кюри ферромагнетика»

Исполнитель: студент(ка) _____
группа _____

Цель работы:

Краткое описание метода исследования:

Расчётные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать их наименование в СИ)....

Оборудование:

Средства измерений и их характеристики

Таблица 11.1

Наименование прибора	Предел допускаемой относительной погрешности (в % от измеренного значения)
Мультиметр (11)	0,8 %
Вольтметр (12)	1,0%

Результаты измерений

Таблица 11.2

$b = 23,7 \times 10^{-8}$ Кл/В, $R_2 = 2,5$ кОм, $N_1 = 100$ вит., $N_2 = 100$ вит., $S = 25$ мм ²			
№	$t, ^\circ\text{C}$	$U_{\text{инт}}, \text{В}$	$B_{\text{нас}}, \text{Тл}$
1	Комнатная		
2			
...			
N			

Расчёты

1. $k = \dots = \dots$ с/м²;
2. $B_{\text{нас}} = \dots = \dots$ Тл; (для одного любого значения)
3. $t_K = \dots$ °С. Оценить погрешность t_K графически.
4. Сделать вывод.

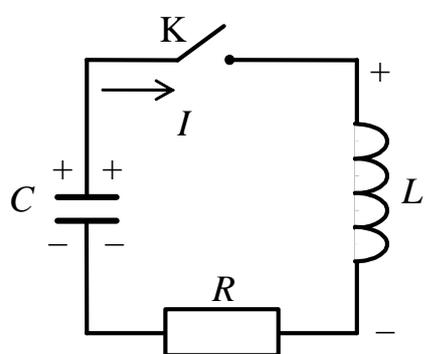
Примечание. График зависимости $B_{\text{нас}} = f(t)$, построенный согласно данным табл. 2.2, прилагается к отчету. На графике показать t_K .

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



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

Рис. 12.1. Колебательный контур

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.

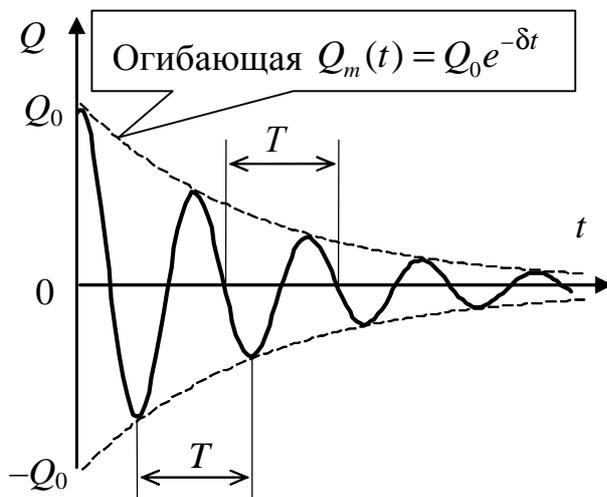


Рис. 12.2. Затухающие колебания

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)*

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

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

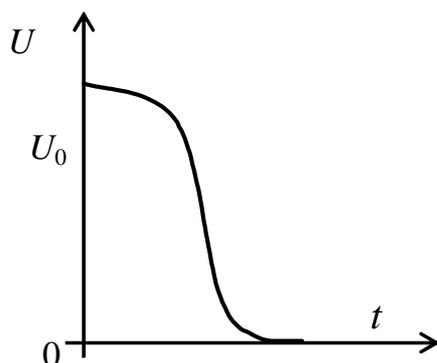


Рис. 12.3. Апериодический процесс

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

обращается в бесконечность. Это значит, что колебания в контуре не возникают. Наступает апериодический 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.

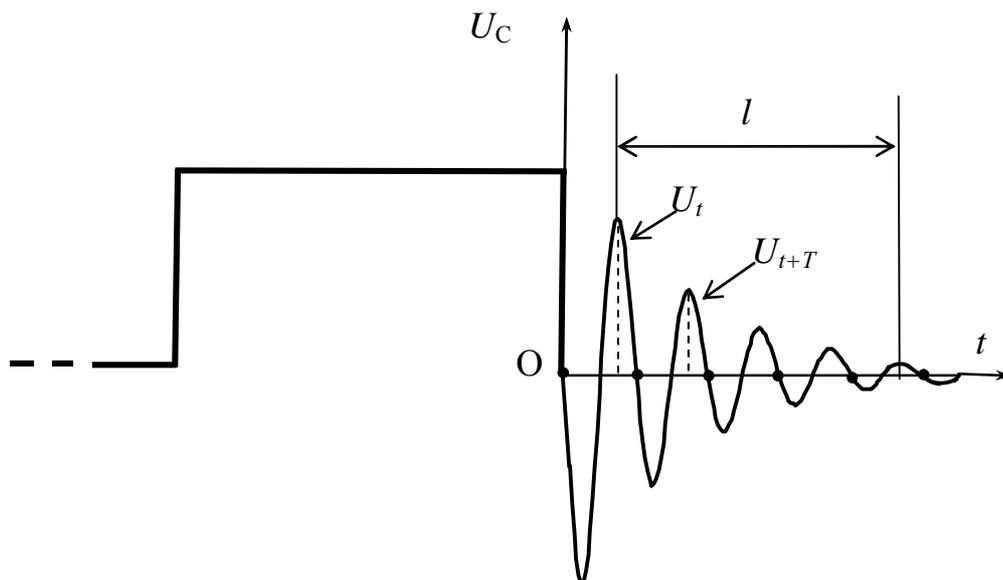


Рис. 12.4. Затухающие колебания напряжения на пластинах конденсатора

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 апериодического 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), миниблоки «Реостат», «Конденсатор», «Катушка», осциллограф, мультиметр.



Рис. 12.5. Миниблок «Реостат»

Маркировка на блоке указывает сопротивление между А и С. Сопротивление между входами А и В постоянно и равно 1,0 кОм. Предназначен для регулирования сопротивления между входами АС и ВС.

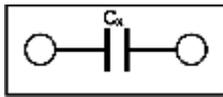


Рис. 12.6. Миниблок «Конденсатор».
Значение электроёмкости которой указано на блоке

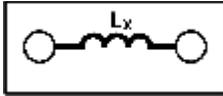


Рис. 12.7. Миниблок «Катушка».
Значение индуктивности катушки указано на блоке

На рис. 12.12 и 12.13 изображены лицевые панели используемых в работе двух типов осциллографов (MOS-620 или GOS-625) и таблицы соответствующих положений их переключателей и регуляторов. На рис. 12.8 приведена электрическая схема установки.

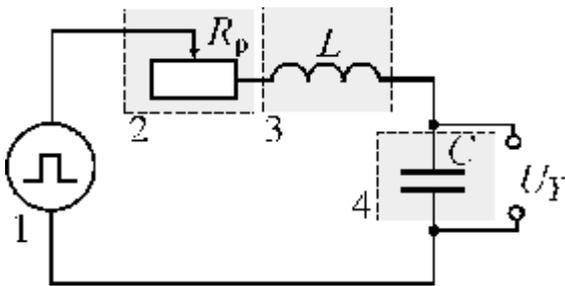


Рис. 12.8.

1 – ГССФ (форма сигнала « \square »),
2 – миниблок «Реостат», 3 – миниблок «Катушка», 4 – миниблок «Конденсатор»

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.

Выполнение работы

1. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 12.9. Коаксиальный кабель подключить к входу осциллографа «CH2 (Y)», красный штекер кабеля соединить по схеме с колебательным контуром, а синий – через наборное поле к гнезду « $-U_{\text{ВЫХ}}$ » на панели генератора сигналов специальной формы. Второй кабель подключить к входу «ТРИГ IN» или «EXT» осциллографа, красный штекер кабеля соединить с гнездом «СИНХР.» на панели ГССФ, а синий – через наборное поле к его гнезду « $-U_{\text{ВЫХ}}$ ».

2. Переключатели и регуляторы, расположенные на лицевой панели осциллографа, установить в положения, указанные в табл. 12.3 на рис. 12.12 для осциллографа «MOS-620», или в табл. 12.4 на рис. 12.13, если используется осциллограф «GOS-625».

3. Установить сопротивление реостата R_p равным «0 кОм». Для этого повернуть ручку реостата против часовой стрелки до упора.

4. Записать параметры установки табл. 12.2.

5. Включить кнопку «POWER» расположенную на панели осциллографа под экраном, при этом должен зажегаться светодиодный индикатор. При помощи регуляторов «INTEN» и «FOCUS», расположенных там же, установить соответственно оптимальную яркость и фокусировку луча.

Внимание! Для предотвращения повреждения люминофора электронно-лучевой трубки не устанавливайте чрезмерную яркость луча и не оставляйте без необходимости длительное время неподвижное пятно на экране.

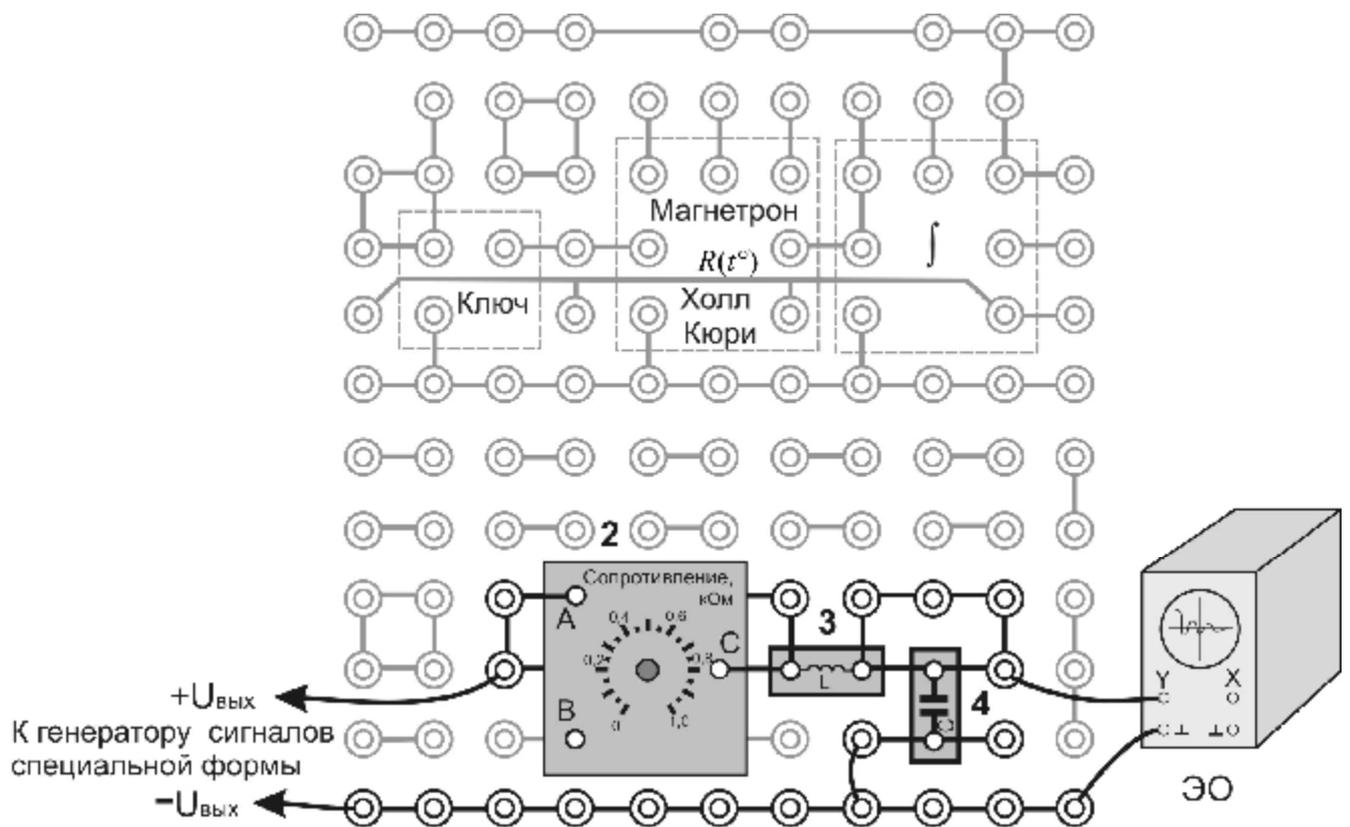


Рис. 12.9. Монтажная схема:
 ЭО – электронный осциллограф; обозначения 2, 3, 4 – см. рис. 12.8

6. Регуляторами «< POSITION >» и «POSITION $\frac{D}{\tilde{N}}$ » совместить горизонтальную развёртку электронного луча с центральной горизонтальной линией экрана.
7. Кнопкой «СЕТЬ» включить питание блоков генераторов напряжений и мультиметров. Нажать на панели генератора кнопку с формой импульса « \square ». Кнопками «Установка частоты 0...20 кГц» установить частоту **0,2 кГц**.
8. С помощью кнопки **D** «Установка уровня выхода 0...15 В» генератора получить на экране изображение осциллограммы затухающих колебаний (рис. 12.10). При этом максимальная амплитуда колебаний не должна превышать 7 больших делений масштабной сетки экрана. С помощью регуляторов «< POSITION >» и «POSITION $\frac{D}{\tilde{N}}$ » вывести осциллограмму в центр экрана и скопировать или сфотографировать её.
9. По сетке экрана определить в больших делениях шкалы величины h_t и h_{t+T} , расстояние l , на котором укладывается максимальное число **полных** колебаний N . Результаты измерений занести в табл. 12.2.
10. Медленно увеличивать сопротивление реостата до тех пор, пока осциллограмма не примет вид, изображенный на рис. 12.11.

11. Измерить величины R_k и R_p . Для этого нажать кнопку «Исходная установка» и кнопками «СЕТЬ» и «POWER» **выключить** питание генераторов напряжения и осциллографа. Отключить провода, соединяющие наборное поле с осциллографом и ГССН. Переключатель рода работ одного из мультиметров перевести в положение « Ω » и установить предел измерения «2К». Подключить к его входам «СОМ» и «VW» сначала миниблок «Катушка», а затем, с помощью проводов, клеммы А и С миниблока «Реостат». Результаты измерений записать в табл. 12.2.

12. Кнопкой «СЕТЬ» выключить питание мультиметров и разобрать электрическую цепь.

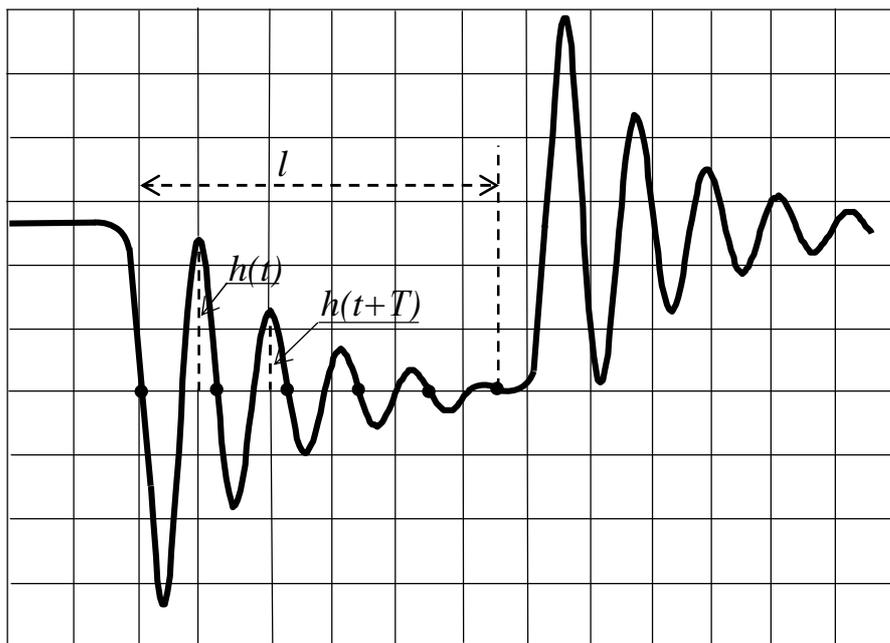


Рис. 12.10. Осциллограмма затухающих колебаний

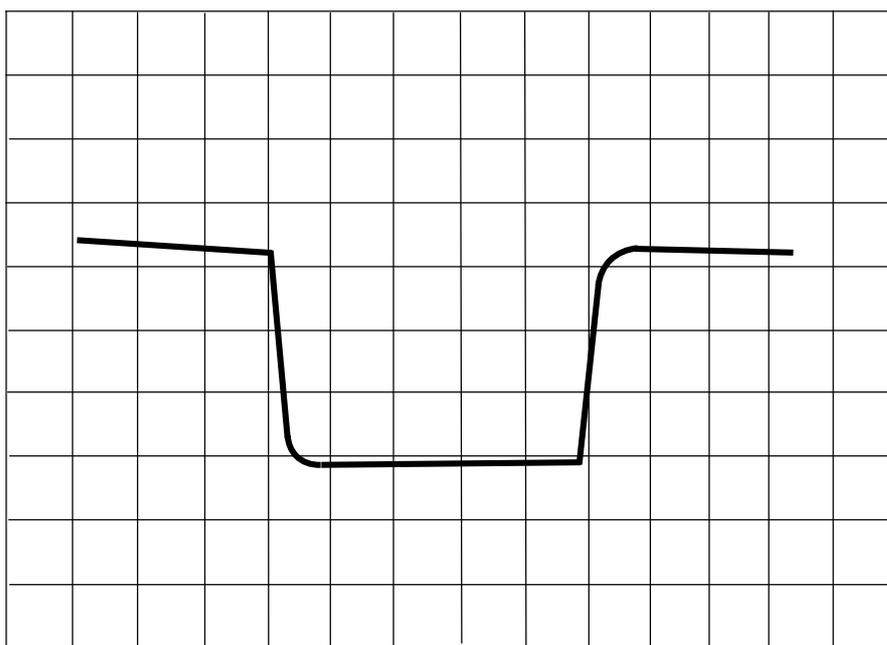


Рис. 12.11. Осциллограмма аperiodического процесса

Обработка результатов измерений

1. По данным табл. 12.2 вычислить экспериментальное $T_{\text{эксп}}$ (12.13) и теоретическое значение периода колебаний $T_{\text{теор}}$ (12.8) ($R=R_k$), а также относительное отклонение γ_T' экспериментального и теоретического значения

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

2. Вычислить экспериментальное $\theta_{\text{эксп}}$ (12.9) ($U_t = k_Y h_t$ и $U_{t+T} = k_Y h_{t+T}$) и теоретическое значение логарифмического декремента затухания $\theta_{\text{теор}}$ (12.10) ($R=R_k$), 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

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

Оценка погрешностей измерений

1. **Систематическая относительная** погрешность косвенных измерений периода затухающих колебаний, вычисляемого по формуле (12.13), определяется как

$$\gamma_T = \frac{\theta T_{\text{эксп}}}{T_{\text{эксп}}} \cdot 100\% = \frac{\theta l}{l} \cdot 100\%, \quad (12.20)$$

где $\frac{\theta l}{l}$ – систематическая относительная погрешность измерения длины l с помощью масштабной сетки экрана осциллографа или линейки (см. табл. 12.1 бланка отчёта).

2. **Систематическая абсолютная** погрешность измерений периода затухающих колебаний находится из её связи с относительной

$$\theta T_{\text{эксп}} = \gamma_T \cdot T_{\text{эксп}} / 100\%. \quad (12.21)$$

3. **Систематическая абсолютная** погрешность косвенных однократных измерений логарифмического декремента затухания, рассчитанного по формуле (12.9), определяется выражением

$$\theta(\theta_{\text{эксп}}) = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\theta U_t}{U_t}\right)^2 + \left(\frac{\theta U_{t+T}}{U_{t+T}}\right)^2} = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\theta h_t}{h_t}\right)^2 + \left(\frac{\theta h_{t+T}}{h_{t+T}}\right)^2}, \quad (12.19)$$

где $\theta h_t = \theta h_{t+T} = \theta h$ – систематическая абсолютная погрешность прямых измерений амплитуд затухающих колебаний с помощью масштабной сетки экрана или линейки (см. табл. 12.1 бланка отчёта).

4. **Систематическая относительная** погрешность прямых однократных измерениях $\theta_{\text{эксп}}$ находится по формуле

$$\gamma_{\theta} = \frac{\theta(\theta_{\text{эксп}})}{\theta_{\text{эксп}}} \cdot 100\%. \quad (12.20)$$

5. Оценку погрешности определения критического сопротивления $\theta R_{\text{крит}}$ колебательного контура провести самостоятельно.

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

ОТЧЁТ

по лабораторной работе

«Изучение электромагнитных затухающих колебаний»

Исполнитель: студент(ка) гр. _____

Цель работы: ...

Краткое описание метода исследования: ...

Расчётные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать единицы их измерения в системе СИ).

Оборудование: ...

Средства измерений и их характеристики

Таблица 12.1

Наименование прибора	Предел допускаемой относительной погрешности (в % от измеренного значения)	Абсолютная погрешность
Шкала осциллографа	—	$\theta l = \theta h = \dots$ (оценивается как половина цены деления)
Омметр	$\theta R/R = 0,8\%$	—

Результаты измерений

Таблица 12.2

Параметры установки:							
$L =$		мГн,		$C =$		мкФ,	
				$k_x = 0,5$ мс/дел.,		$k_Y = 0,5$ В/дел.	
N	l , дел.	h_t , дел.	h_{t+T} , дел.	U_t , В	U_{t+T} , В	R_p , Ом	R_k , Ом

Расчёты

1. $T_{\text{эксп}} = \dots = \dots = \dots$ с;
 $T_{\text{теор}} = \dots = \dots = \dots$ с;
 $\gamma_T' = \dots = \dots = \dots$ %;

Написать формулу, показать расчёт и записать результат!

2. $\theta_{\text{эксп}} = \dots = \dots = \dots$;
 $\theta_{\text{теор}} = \dots = \dots = \dots$;
 $\gamma_{\theta}' = \dots = \dots = \dots$ %;

3. $R_{\text{кр}}^{\text{эксп}} = \dots = \dots = \dots$ Ом;
 $R_{\text{кр}}^{\text{теор}} = \dots = \dots = \dots$ Ом;
 $\gamma_R' = \dots = \dots = \dots$ %;

4. $\gamma_T = \dots = \dots = \dots$;
 $\theta T_{\text{эксп}} = \dots = \dots = \dots$ с;

5. $\frac{\theta h_t}{h_t} = \dots = \dots$; $\frac{\theta h_{t+T}}{h_{t+T}} = \dots = \dots$;
 $\theta(\theta_{\text{эксп}}) = \dots = \dots = \dots$;
 $\gamma_{\theta} = \dots = \dots = \dots$;

6. $\theta R_{\text{кр}} = \dots$ Ом;
 $\gamma_{R_{\text{кр}}} = \dots = \dots = \dots$;

7. Окончательный результат:

$$T_{\text{эксп}} = \dots \pm \dots \text{ с}, \quad \gamma_T = \dots \%,$$

$$\theta_{\text{эксп}} = \dots \pm \dots, \quad \gamma_{\theta} = \dots \%,$$

$$R_{\text{крит}}^{\text{эксп}} = \dots \pm \dots \text{ Ом}, \quad \gamma_{R_{\text{кр}}} = \dots \%.$$

8. Вывод.

Примечание. Рисунок или фотография осциллограммы затухающих колебаний прилагается к отчёту.

MOS-620

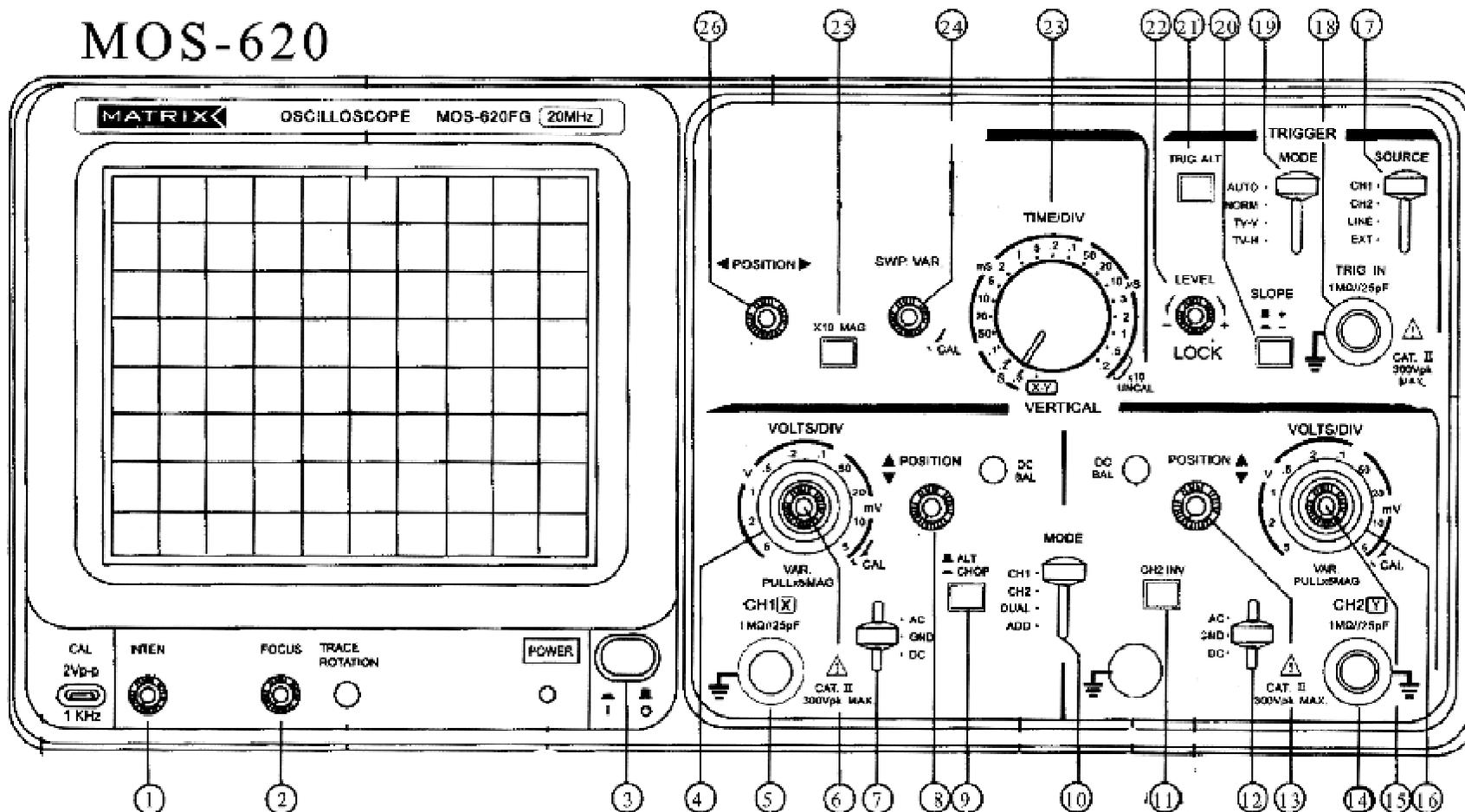


Рис. 12.12. Передняя панель осциллографа MOS-620 и таблица положений органов управления

Таблица 12.3

1	2	3	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
*	*	+	CH2	-	AC	*	Y	/	0,5v	EXT	синх	AUTO	-	-	/	0,5	/	-	*

«+» - нажать «-» - отжать «*» - среднее положение «/» - по часовой до упора

GOS-625

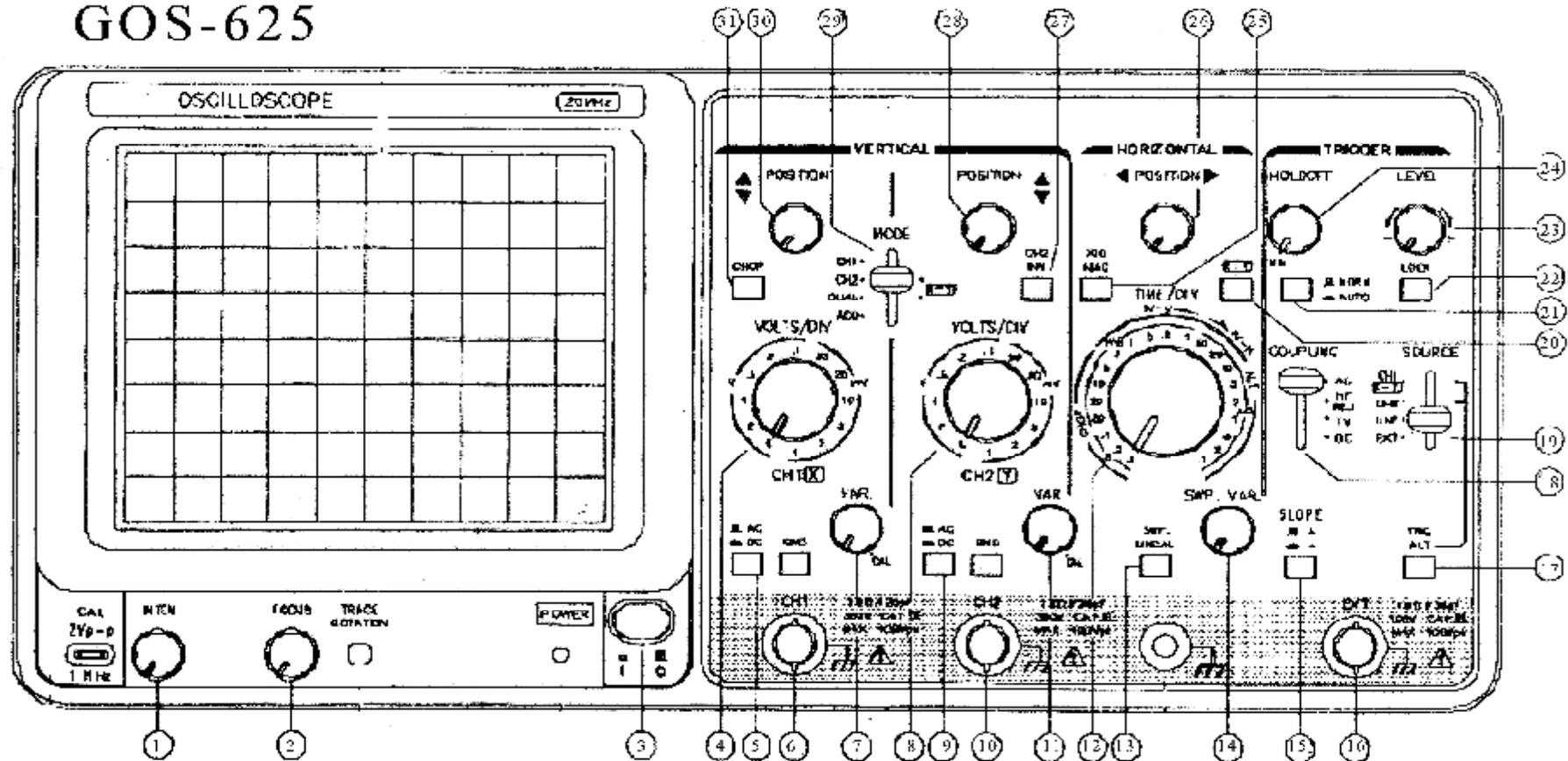


Рис. 12.13. Передняя панель осциллографа GOS-625 и таблица положений органов управления

Таблица 12.4

1	2	3	8	9	10	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
*	*	+	0,5	-	Y	0,5	-	/	-	EXT	EXT	AC	EXT	-	-	-	*	*	-	*	-	*	CH2	*	-

«+» - нажать «-» - отжать «*» - среднее положение «/» - по часовой до упора

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.

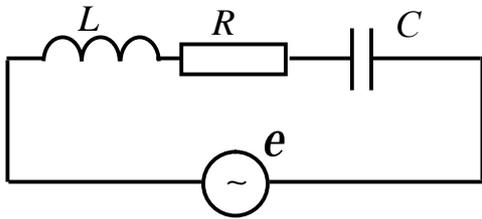


Рис. 13.1. Цепь переменного тока

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 второму правилу Кирхгофа

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

где IR – падение напряжения на резисторе; $U_C = Q/C$ – напряжение 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

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

Из теории вынужденных колебаний известно, что такое уравнение в случае установившихся колебаний имеет решение

$$I = I_m \sin(\omega t - \varphi), \quad (13.3)$$

где

$$I_m = \frac{\varepsilon_m}{Z} = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad (13.4)$$

где φ – сдвиг фаз между ЭДС и током.

Формулу (13.4) называют **законом Ома для переменного тока**. Величины Z , R и $X = \omega L - 1/\omega C$ называются соответственно **полным**, **активным** и **реактивным** сопротивлениями цепи для переменного тока: $\omega L = X_L$ – реактивное **индуктивное** сопротивление, $1/\omega C = X_C$ – реактивное **ёмкостное** сопротивление. Все эти величины измеряются в омах.

Сдвиг фаз φ между внешней ЭДС и током определяется соотношением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (13.5)$$

Как следует из формул (13.4) и (13.5), обе этих величины – амплитуда тока и фазовый сдвиг – зависят от частоты колебаний ω . Если $\omega \rightarrow 0$, то $1/\omega C \rightarrow \infty$. Тогда сопротивление Z обращается в бесконечность, а амплитуда тока I_m становится равной нулю. При увеличении ω реактивное X и полное Z сопротивления сначала уменьшаются, а амплитуда тока I_m увеличивается. При частоте $\omega = \omega_0$, определяемой условием

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (13.6)$$

реактивное сопротивление обращается в нуль, полное сопротивление цепи становится наименьшим ($Z_{\min} = R$), а амплитуда тока – максимальной. При значениях $\omega > \omega_0$ реактивное сопротивление X вновь отлично от нуля и с возрастанием ω увеличивается. В соответствии с этим полное сопротивление Z цепи увеличивается, а амплитуда тока I_m уменьшается, асимптотически приближаясь к нулю.

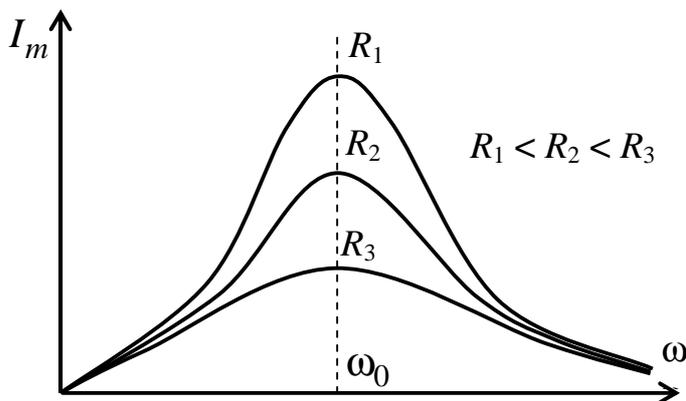


Рис. 13.2. Резонансные кривые

напряжением равен нулю. Этот важный случай вынужденных колебаний называется **резонансом**.

Напряжение на резисторе R равно

$$U_R = IR = U_{mR} \sin(\omega t - \varphi), \quad (13.7)$$

где $U_{mR} = I_m R$ – амплитуда напряжения. Таким образом, резонансная кривая для амплитуды напряжения на резисторе отличается от резонансной кривой для амплитуды тока в нём лишь множителем R , то есть максимальное значение $U_{mR \text{ рез}}$ достигается при частоте ω_0 (рис. 13.3).

Графики зависимости амплитуды тока I_m от ω для различных активных сопротивлений контура R приведены на рис. 13.2. Чем меньше R , тем больше при прочих равных условиях амплитуда тока, и тем острее максимумы кривых.

Итак, случай, когда частота ω генератора ЭДС равна частоте ω_0 , представляет особый интерес: амплитуда тока достигает максимального значения, а сдвиг фаз между током и

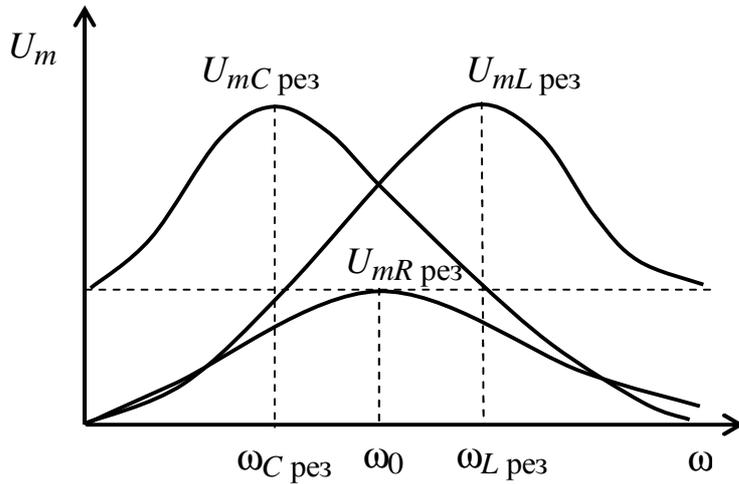


Рис. 13.3. Зависимость амплитуды напряжения на конденсаторе, катушке индуктивности и резисторе от частоты

С изменением частоты внешней ЭДС изменяется напряжение на конденсаторе и на катушке индуктивности. Напряжение на конденсаторе определяется формулой

$$U_C = \frac{Q}{C} = \frac{\int I dt}{C}, \quad (13.8)$$

где $I = I_m \sin(\omega t - \varphi)$.

После подстановки (13.3) в (13.8) и интегрирования $I(t)$ по t получим

$$U_C = -\frac{1}{\omega C} I_m \cos(\omega t - \varphi) = U_{mC} \sin(\omega t - \varphi - \pi/2), \quad (13.9)$$

здесь $U_{mC} = \frac{I_m}{\omega C}$ – амплитудное значение напряжения. Из (13.9) видно, что напряжение на конденсаторе отстаёт по фазе от тока на $\pi/2$. График зависимости U_{mC} от частоты приведён на рис. 13.3. Максимальное значение амплитуды напряжения на конденсаторе достигается при частоте

$$\omega_{C \text{ рез}} = \omega_0 \sqrt{1 - 2 \left(\frac{\delta}{\omega_0} \right)^2} < \omega_0, \quad (13.10)$$

где $\delta = \frac{R}{2L}$ – коэффициент затухания.

Напряжение на катушке индуктивности можно найти, применяя закон Ома для участка цепи

$$U_L = I \cdot r - \mathcal{E}_s, \quad (13.11)$$

где r – активное сопротивление катушки, которое в данном случае считается равным нулю, а \mathcal{E}_s – ЭДС самоиндукции в катушке, которое определяется по формуле

$$\mathcal{E}_s = -L \cdot \frac{dI}{dt}. \quad (13.12)$$

Подставляя (13.3) и (13.12) в (13.11), получаем

$$U_L = -\mathcal{E}_s = L \frac{dI}{dt} = L \omega I_m \cos(\omega t - \varphi) = U_{mL} \sin(\omega t - \varphi + \pi/2), \quad (13.13)$$

где $U_{mL} = I_m \omega L$ – амплитудное значение напряжения. Видно, что напряжение на катушке опережает по фазе ток на $\pi/2$. График зависимости U_{mL} от частоты приведён на рис. 13.3. Максимальное значение амплитуды напряжения на индуктивности достигается при частоте

$$\omega_{L \text{ рез}} = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 - 2\left(\frac{\delta}{\omega_0}\right)^2}} > \omega_0. \quad (13.14)$$

Найдём резонансные значения $U_{mC \text{ рез}}$ и $U_{mL \text{ рез}}$. Амплитуда тока (13.4) при частоте ω_0 (13.6) достигает максимума

$$I_{m \text{ рез}} = \frac{\varepsilon_m}{R}. \quad (13.15)$$

Из формул (13.9) и (13.13) следует

$$U_{mC \text{ рез}} \approx X_C I_{m \text{ рез}} = \frac{\varepsilon_m}{\omega_0 C R} = \varepsilon_m \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = Q \cdot \varepsilon_m; \quad (13.16)$$

$$U_{mL \text{ рез}} \approx X_L I_{m \text{ рез}} = \frac{\varepsilon_m}{R} \omega_0 L = \varepsilon_m \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = Q \cdot \varepsilon_m. \quad (13.17)$$

Величину $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ называют **добротностью контура**. Её значение всегда больше единицы, следовательно, амплитуды этих напряжений превышают амплитудное значение внешней ЭДС ε_m в Q раз (рис. 13.3). Поэтому явление резонанса в последовательном контуре называют **резонансом напряжений**.

Таким образом, при резонансе амплитудные значения напряжения на конденсаторе $U_{mC \text{ рез}}$ и катушке индуктивности $U_{mL \text{ рез}}$ должны быть равны. Как следует из вышеизложенного, сдвиг фаз между этими напряжениями равен π , значит их сумма равна нулю и в контуре остаются только колебания напряжения на резисторе с амплитудой $U_{mR \text{ рез}}$.

Рассмотрим теперь случай, когда в замкнутой электрической цепи конденсатор C и катушка индуктивности L соединяются параллельно (рис. 13.4). Для упрощения задачи полагаем, что активное сопротивление контура $R = 0$. Согласно выражению (13.3), по участку, содержащему конденсатор, течёт ток

$$I_C = I_{mC} \sin(\omega t - \varphi_C). \quad (13.18)$$

Амплитуду этого тока можно найти из уравнения (13.4) при условии $R = 0$ и $L = 0$:

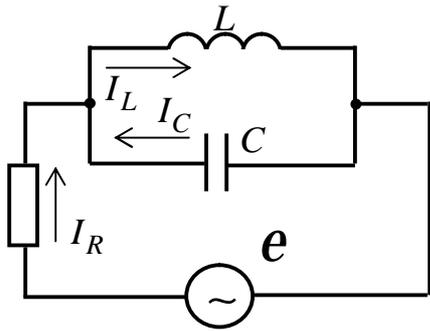


Рис. 13.4. Параллельное соединение катушки и конденсатора

$$I_{mC} = \frac{\varepsilon_m}{\frac{1}{\omega C}} = \omega C \cdot \varepsilon_m. \quad (13.19)$$

Начальная фаза этого тока определяется из выражения (13.5) по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_C = -\infty, \quad \varphi_C = -\pi/2. \quad (13.20)$$

Аналогично определяется сила тока, протекающего по участку цепи, содержащему катушку индуктивности:

$$I_L = I_{mL} \sin(\omega t - \varphi_L). \quad (13.21)$$

Его амплитуда определяется из уравнения (13.4) при условии $R = 0$ и $C = \infty$:

$$I_{mL} = \frac{\varepsilon_m}{\omega L}. \quad (13.22)$$

Начальная фаза этого тока определяется из выражения (13.5) по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_L = +\infty, \quad \varphi_L = +\pi/2. \quad (13.23)$$

Из сравнения выражений (13.20) и (13.23), следует, что разность фаз токов, текущих по параллельным участкам цепи, равна π , то есть эти токи находятся в противофазе. Амплитуда тока в неразветвленной части цепи

$$I_{mR} = |I_{mC} - I_{mL}| = \varepsilon_m \left| \omega C - \frac{1}{\omega L} \right|. \quad (13.24)$$

Если $\omega = \omega_0$ (13.6), то, согласно (13.19) и (13.22), $I_{mC} = I_{mL}$ и $I_{mR} = 0$. Явление резкого уменьшения амплитуды силы тока во внешней цепи, питающей параллельно включенные конденсатор и катушку индуктивности, при $\omega \rightarrow \omega_0$ называется **резонансом токов**.

Если учесть активное сопротивление цепи R , то разность фаз токов не будет равна π . Поэтому при резонансе токов амплитуда силы тока I_{mR} будет отлична от нуля, но примет наименьшее значение. Значит, падение напряжения U_{mR} на резисторе R в этот момент также будет минимальным. В то же время токи I_{mC} и I_{mL} при резонансе могут значительно превышать ток I_{mR} .

Описание метода исследования

На колебательный контур подают синусоидальное внешнее напряжение с контролируемой частотой ω , измеряют напряжение на его элементах при различных частотах и строят графики зависимости амплитуды соответствующих напряжений от частоты $U_m = f(\omega)$.

В случае последовательного соединения конденсатора и катушки индуктивности на резонансной частоте ω_0 должны наблюдаться максимумы U_{mR} , U_{mL} ,

U_{mC} . При параллельном соединении конденсатора и катушки индуктивности резонанс в контуре обнаруживают по минимальному напряжению U_{mR} на резисторе R и по максимальному напряжению на конденсаторе и катушке U_{mLC} .

Описание установки

Оборудование: генератор напряжений специальной формы (ГССФ), миниблоки «Индуктивность L_x », «Конденсатор $C=1$ мкФ», «Сопротивление $R=100$ Ом», мультиметр.

Для исследования явления резонанса используют электрические цепи, приведённые на рис. 13.5. Цепь с последовательно соединёнными элементами L и C (рис. 13.5, а) предназначена для изучения резонанса напряжений, а цепь с параллельным соединением L и C (рис. 13.5, б) – для резонанса токов. Действующие значения напряжения (они в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудных, однако для наших целей это различие несущественно) измеряют мультиметром 2. В качестве источника внешнего переменного напряжения используют генератор напряжений специальной формы 1. На рис. 13.6 приведена монтажная схема для изучения резонанса напряжений, а на рис. 13.7 – для изучения резонанса токов.

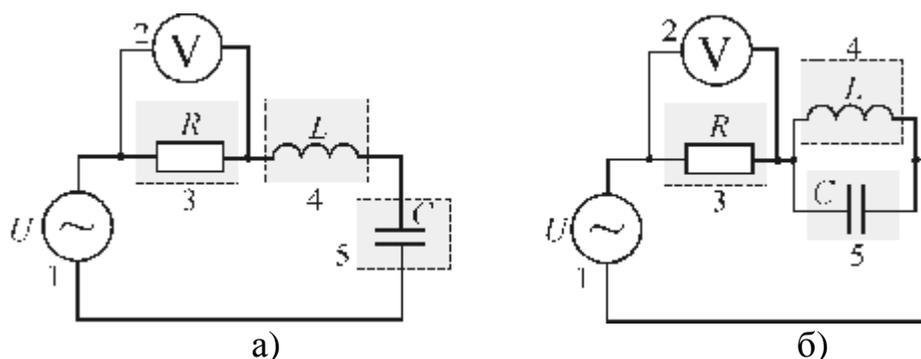


Рис. 13.5. Электрическая схема:

1 – генератор напряжений специальной формы (он содержит также частотомер); 2 – мультиметр (режим $V \sim 2$ В, входы COM, VW); 3 – миниблок «Сопротивление» сопротивлением $R=100$ Ом; 4 – миниблок «Индуктивность» содержит катушку индуктивности L ; 5 – миниблок «Конденсатор» ёмкостью C .

Выполнение работы

1. Последовательное соединение конденсатора и катушки.

1.1. Собрать по монтажной схеме, приведённой на рис. 13.6, электрическую цепь, состоящую из последовательно соединённых конденсатора C , катушки L и резистора R (см. рис. 13.5, а).

1.2. Включить в сеть блоки генераторов напряжения и мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка». 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 $\mathcal{E} = 1,0 \pm 0,1$ В. В дальнейшем необходимо контролировать выходное напряжение генератора с по-

мощью мультиметра 6, подключённого к клеммам А и Н на рис. 13.6, чтобы оно не изменялось. Значение \mathcal{E} записать в табл. 13.2.

1.3. Увеличивая частоту ν выходного сигнала генератора, найти резонансное (*максимальное*) напряжение на резисторе $U_{R \text{ рез}}$ и соответствующую ему частоту ν_0 . Результаты измерений записать в табл. 13.2 (см. бланк отчёта).

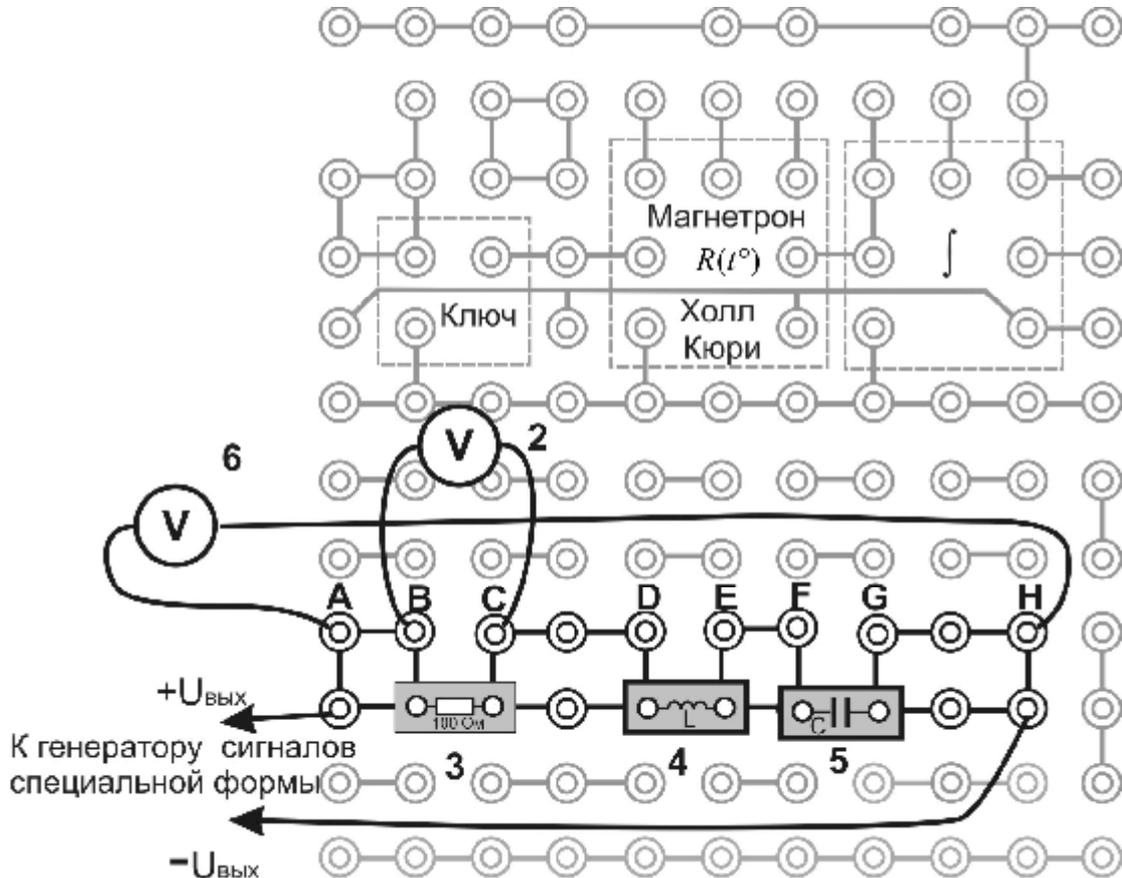


Рис. 13.6. Монтажная схема.

Обозначения 2, 3, 4, 5 – см. рис. 13.5, а

1.4. 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. Результаты измерений записать в табл. 13.2 (см. бланк отчёта). Количество измерений должно быть не меньше 10 – 15.

1.5. Подключая мультиметр 2 поочередно к катушке (клеммы D и E) и конденсатору (клеммы F и G), провести измерения напряжений U_L и U_C по п. 1.3, 1.4. Результаты записать в табл. 13.2. Нажать кнопку «Исходная установка».

2. Параллельное соединение катушки и конденсатора.

2.1. Собрать по монтажной схеме, приведённой на рис. 13.7, электрическую цепь, состоящую из параллельно соединённых конденсатора C , катушки L и резистора R (рис. 13.5, б).

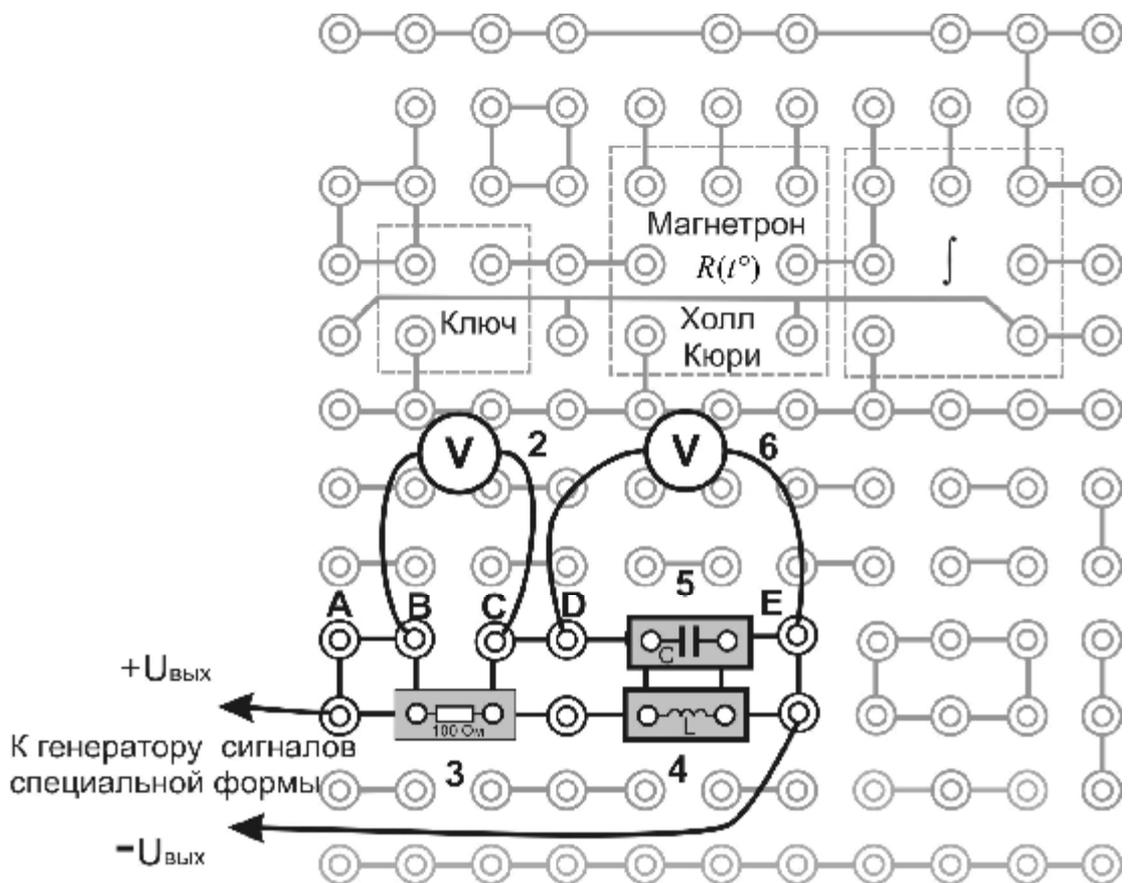


Рис. 13.7. Монтажная схема.
 Обозначения 2, 3, 4, 5 – см. рис. 13.5, б

2.2. Установить выходное напряжение генератора такое же, какое оно было в предыдущих измерениях. Это можно сделать с помощью мультиметра, подключённого к клеммам А и Е.

2.3. Подключить мультиметр 2 к резистору R (клеммы В и С), а мультиметр 6 – к конденсатору и катушке (клеммы D и E). Провести измерения напряжений U_R и U_{LC} . Изменяя частоту ν выходного сигнала генератора, найти резонансное (**минимальное**) напряжение на резисторе $U_{R \text{ рез}}$ и соответствующую ему частоту ν_0 . Согласно теоретическим предсказаниям, при резонансе напряжение U_{LC} должно быть **максимальным**. Результаты записать в табл. 13.3.

2.4. Провести измерения $U_R(\nu)$ и $U_{LC}(\nu)$. Измерения производить в том диапазоне частот, в пределах которого напряжение U_R возрастает до значения, соизмеримого с напряжением генератора переменного напряжения, измеренным с помощью мультиметра вначале. Интервал между измерениями можно варьировать. Вблизи резонанса, в области крутого подъема и спада кривой, интервал следует уменьшить. Результаты измерений записать в табл. 13.3 (см. бланк отчёта). Количество измерений должно быть не меньше 10 – 15.

2.5. **Выключить** блоки генераторов напряжений и мультиметров.

Обработка результатов измерений

1. По данным табл. 13.2 построить на одном графике три резонансных кривых: $U_R(\nu)$, $U_L(\nu)$ и $U_C(\nu)$ 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),

$$L_x = \frac{1}{C \cdot (2\pi\nu_0)^2}. \quad (13.25)$$

3. Рассчитать коэффициент затухания δ , а также резонансные циклические частоты $\omega_{C\text{рез}}$ (13.10) и $\omega_{L\text{рез}}$ (13.14). Учитывая, что $\nu = \omega/2\pi$, рассчитать теоретические значения резонансных частот для катушки и конденсатора $\nu_{L\text{рез}}^{\text{теор}}$ и $\nu_{C\text{рез}}^{\text{теор}}$. Сравнить их с экспериментальными значениями $\nu_{L\text{рез}}^{\text{эксп}}$ и $\nu_{C\text{рез}}^{\text{эксп}}$. Результаты записать в табл. 13.4.

4. Определить теоретическую добротность контура по формуле (13.16):

$$Q_{\text{теор}} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (13.26)$$

и сравнить её с экспериментальными значениями

$$Q_{L\text{эксп}} = U_{L\text{рез}}/\mathcal{E}, \quad Q_{C\text{эксп}} = U_{C\text{рез}}/\mathcal{E}. \quad (13.27)$$

Результаты записать в табл. 13.4.

5. На другом графике по данным табл. 13.3 построить резонансные кривые $U_R(\nu)$ и $U_{LC}(\nu)$ для контура с параллельно соединёнными конденсатором C и катушкой L_x . Определить резонансную частоту $\nu_{0\text{рез}}^{\text{эксп}}$ при последовательном соединении, записать в табл. 13.4, и сравнить с ν_0 .

Оценка погрешностей измерений

1. Систематическая относительная погрешность косвенных измерений индуктивности на основе формулы (13.25) определяется выражением

$$\gamma_L = \frac{\theta L_x}{L_x} = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\theta C}{C}\right)^2 + 4 \left(\frac{\theta \omega_0}{\omega_0}\right)^2}, \quad \% \quad (13.28)$$

где $\frac{\theta C}{C}$, $\frac{\theta \omega_0}{\omega_0}$ – относительные систематические погрешности прямых измерений ёмкости и резонансной частоты.

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

$$\theta L_x = \gamma_L \cdot L_x / 100\%. \quad (13.29)$$

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

ОТЧЁТ
по лабораторной работе
«Исследование явления резонанса
в электрических цепях переменного тока»

Исполнитель: студент(ка) гр. _____

Цель работы:

Краткое описание метода исследования:

Расчётные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать их наименование в СИ)....

Оборудование:

Средства измерений и их характеристики

Таблица 13.1

Наименование прибора	Предел допускаемой основной относительной погрешности (в % от измеренного значения)
Вольтметр	$\theta U/U = 0,5 \%$
Частотомер в ГССФ	$\theta \omega_0/\omega_0 = 1,0 \%$

Результаты измерений

Таблица 13.2

Последовательное соединение L_x и C $\mathcal{E} = \dots \text{ В}, \quad C = \dots \text{ мкФ}, \quad \theta C/C = \dots \%, \quad R = \dots \text{ Ом}$					
$\nu_0 =$... кГц	$U_{R \text{ рез}} =$... В	$\nu_{L \text{ рез}}^{\text{эксп}} =$... кГц	$U_{L \text{ рез}} =$... В	$\nu_{C \text{ рез}}^{\text{эксп}} =$... кГц	$U_{C \text{ рез}} =$... В
$\nu, \text{ кГц}$	$U_R, \text{ В}$	$\nu, \text{ кГц}$	$U_L, \text{ В}$	$\nu, \text{ кГц}$	$U_C, \text{ В}$
...

Таблица 13.3

Параллельное соединение L_x и C $\mathcal{E} = \dots \text{ В}$		
$\nu_{0 \text{ рез}}^{\text{эксп}} = \dots \text{ кГц}$	$U_{R \text{ рез}} = \dots \text{ В}$	$U_{LC \text{ рез}} = \dots \text{ В}$
$\nu, \text{ кГц}$	$U_R, \text{ В}$	$U_{LC}, \text{ В}$
...

Таблица 13.4

v_0 , кГц	$v_{Lрез}^{теор}$, кГц	$v_{Lрез}^{эксп}$, кГц	$v_{Cрез}^{теор}$, кГц	$v_{Cрез}^{эксп}$, кГц	$v_{0рез}^{эксп}$, кГц	δ , c^{-1}	$Q_{теор}$	$Q_{Lэксп}$	$Q_{Cэксп}$

Расчёты

- $L_x = \dots = \dots = \dots$ мГн;
- $\gamma_L = \dots = \dots = \dots$ %;
- $\theta L_x = \dots = \dots = \dots$ мГн;
- $\delta = \dots = \dots = \dots$ c^{-1} ;
- $v_{Lрез}^{теор} = \dots = \dots = \dots$ Гц;
 $v_{Lрез}^{эксп} = \dots$ Гц;
- $v_{Cрез}^{теор} = \dots = \dots = \dots$ Гц;
 $v_{Cрез}^{эксп} = \dots$ Гц;
- $Q_{теор} = \dots = \dots = \dots$;
- $Q_{Lэксп} = \dots = \dots = \dots$;
- $Q_{Cэксп} = \dots = \dots = \dots$.
- Вывод.

Написать формулу, показать расчёт и записать результат!

Примечание. К отчёту прилагаются графики с резонансными кривыми, построенными по данным табл. 13.2 и 13.3.

Лабораторная работа Э-14
ИЗУЧЕНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ
В КОНТУРЕ, СОДЕРЖАЩЕМ КАТУШКУ ИНДУКТИВНОСТИ
С ФЕРРИТОВЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Цель работы: исследовать зависимости электрического сопротивления и индуктивности контура от частоты и величины переменного тока.

Вынужденные электрические колебания происходят в контуре под действием переменного напряжения. Если в электрическую цепь, содержащую катушку индуктивности L , включить переменную ЭДС

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \cos \omega t, \quad (14.1)$$

то в цепи, кроме \mathcal{E} , будет наводиться ЭДС самоиндукции

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt}. \quad (14.2)$$

Ток в таком контуре колеблется с той же частотой ω , что и приложенная ЭДС, но отстаёт от неё по фазе на φ

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi). \quad (14.3)$$

Амплитуда тока I_m пропорциональна амплитуде ЭДС

$$I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{Z} = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}, \quad (14.4)$$

где Z – полное сопротивление контура переменному току (импеданс контура), R – активное сопротивление цепи, $X_L = \omega L$ – индуктивное сопротивление цепи, L – индуктивность соленоида, $\omega = 2\pi\nu$ – циклическая частота переменного тока, ν – частота тока.

Индуктивность контура характеризует свойство контура создавать собственное потокосцепление и численно равна магнитному потоку Φ , сцепленному с контуром, при единичном токе в нём

$$\Phi = L \cdot I. \quad (14.5)$$

Она зависит от размеров и формы контура, а также от магнитной проницаемости среды μ , окружающей контур. Например, величина индуктивности длинного соленоида

$$L = \mu_0 \mu \frac{N^2 S}{l}, \quad (14.6)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; N – число витков соленоида; S – площадь сечения сердечника соленоида; l – длина средней осевой линии сердечника.

Индуктивность соленоида с ферритовым сердечником зависит ещё и от тока I , протекающего в обмотке. Это следует из того, что магнитная проницаемость ферритов μ зависит от напряжённости H магнитного поля, которая определяется током в соленоиде

$$H = I \frac{N}{l}. \quad (14.7)$$

Описание метода исследования

В данной работе измерение полного сопротивления цепи Z основано на измерении действующих значений переменного тока I и напряжения U . Согласно закону Ома (14.4),

$$Z = \frac{U}{I}. \quad (14.8)$$

Как следует из формулы (14.4),

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (14.9)$$

В случае малого значения активного сопротивления (как правило, $R \ll Z$) полное сопротивление соленоида совпадает с индуктивным сопротивлением

$$Z \approx \omega L. \quad (14.10)$$

Это позволяет определить индуктивность по формуле

$$L = \frac{Z}{\omega} = \frac{Z}{2\pi\nu}, \quad (14.11)$$

измеряя сопротивление катушки переменному току известной частоты ν .

Напряжение, измеренное на обмотке соленоида, в соответствии с выражениями (14.8) и (14.10) зависит от частоты переменного тока:

$$U(\omega) = I \cdot Z(\omega) = I \cdot L\omega = I \cdot L \cdot 2\pi\nu. \quad (14.12)$$

Зависимость $U(\omega)$, полученная при фиксированном значении тока I , по форме совпадает с зависимостью $Z(\omega)$ и является линейной, если индуктивность соленоида L постоянна (не зависит от частоты). Согласно формуле (14.6), это соответствует постоянному значению магнитной проницаемости μ , что характерно для пара- и диамагнитных сред.

Для соленоида с ферритовым сердечником, как было отмечено, индуктивность зависит от силы тока, протекающего в обмотке, т.е. зависимость (14.12) перестаёт быть линейной. Вид этой зависимости можно установить экспериментально, определяя индуктивное сопротивление соленоида при различных токах.

Таким образом, измеряя напряжение на обмотке соленоида при протекании переменного тока различной частоты (при фиксированной величине действующего значения I), можно экспериментально определить индуктивность соленоида и её частотную зависимость, а также её зависимость от величины переменного тока.

Описание установки

Оборудование: миниблок «Катушка с сердечником», генератор сигналов специальной формы, мультиметры.

Электрическая схема установки показана на рис. 14.1, монтажная – на рис. 14.2. Миниблок «Катушка с сердечником» представляет собой каркас, на который намотано N витков провода. В каркас может вставляться сердечник. Катушку 4, имеющую индуктивность L и сопротивление R , и мультиметр 2, соединённые последовательно, подключают к генератору напряжений специальной формы 1. Напряжение на катушке измеряют мультиметром 3 с большим входным сопротивлением.

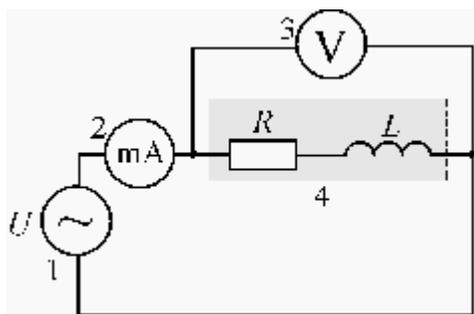


Рис. 14.1. Электрическая схема:
1 – генератор сигналов специальной формы;
2 – мультиметр (режим $A \sim 20 \text{ mA}$, входы COM , mA); 3 – мультиметр (режим $V \sim 20 \text{ В}$, входы COM , VW); 4 – миниблок «Катушка с сердечником» с индуктивностью L , сопротивлением R

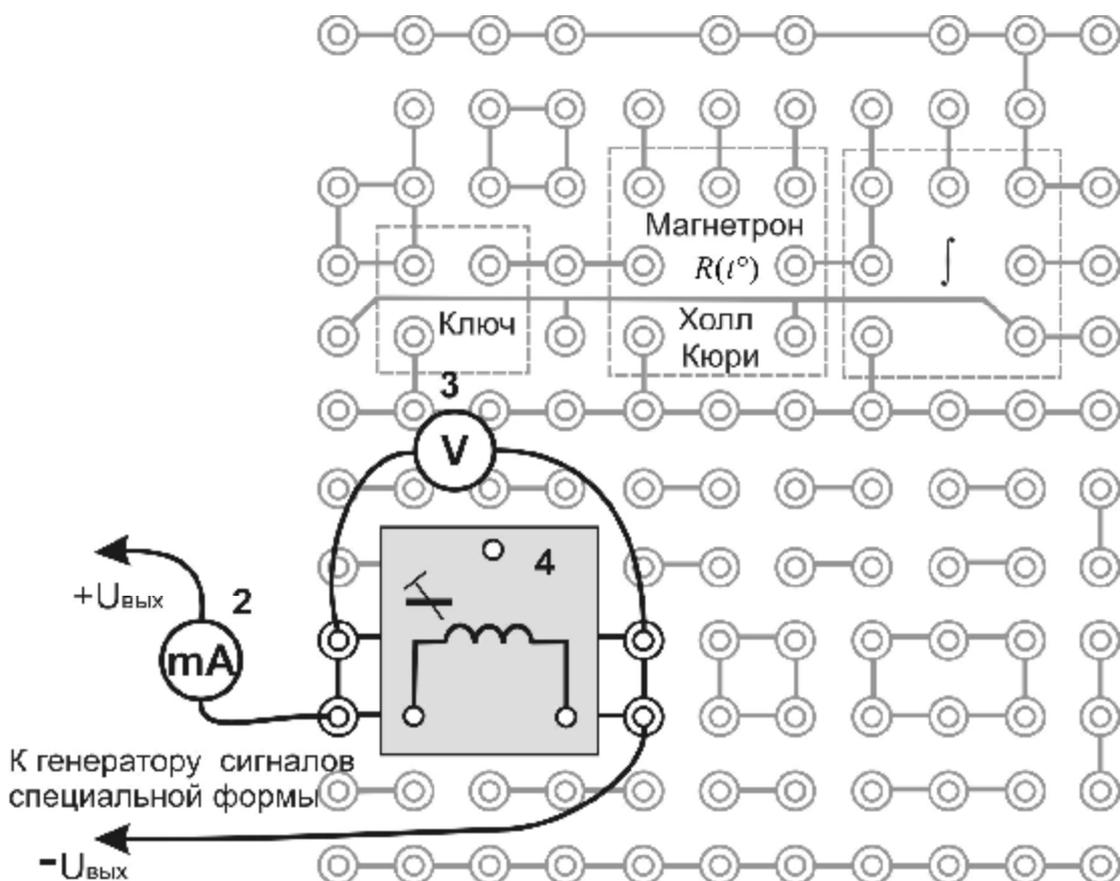


Рис. 14.2. Монтажная схема:
обозначения 2, 3, 4 – см. рис. 14.1

Выполнение работы

Задание 1

Исследование зависимости индуктивности катушки с ферритовым сердечником от частоты

1. С помощью мультиметра 2 измерить сопротивление R катушки и записать его в табл. 14.2 (см. бланк отчёта).
2. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 14.2, подключив катушку с сердечником. Установить режимы работы мультиметров (рис. 14.1).
3. Включить в сеть блоки генераторов напряжения и мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка».
4. Кнопками «Установка частоты 0,2 – 20 кГц» установить частоту 0,2 кГц. С помощью кнопок «Установка уровня выхода 0 ... +15 В» установить значение тока в цепи в пределах от 2 до 5 мА. При этом фиксированном значении тока, увеличивая частоту тока, измерить и записать в табл. 14.2 для каждого значения ν напряжение U на катушке. Измерения производить до тех пор, пока напряжение не увеличится в 2 – 3 раза.

Внимание. По мере изменения частоты следует поддерживать заданный ток I , регулируя его величину кнопками «Установка уровня выхода 0 ... +15 В», а для большей точности поддержания тока можно немного варьировать частотой относительно выбранного значения.

Задание 2

Исследование зависимости индуктивности катушки с ферритовым сердечником от тока

1. Использовать ту же электрическую цепь, что и в задании 1.
2. Установить частоту в диапазоне 0,2 – 0,3 кГц.
3. Изменяя ток кнопками «Установка уровня выхода 0 ... +15 В» от 1 мА до 5 мА, для каждого тока записать в табл. 14.3 (см. бланк отчёта) напряжение U на катушке. Число измерений должно быть не менее 15 – 20.
4. **Выключить** блоки генераторов напряжения и мультиметров.

Обработка результатов измерений

1. Вычислить полное сопротивление переменному току Z по формуле (14.8) и индуктивность L по формуле (14.11). Сравнивая R и Z , убедитесь в справедливости приближения $R \ll Z$.
2. Построить график зависимости $Z = f(\nu)$. Провести прямую наилучшего соответствия.
3. Построить график зависимости $L = f(I)$. Сделать выводы о зависимости индуктивности катушки с сердечником от частоты и величины переменного тока.
4. Оформить отчёт о выполнении работы в соответствии с прилагаемым образцом.

ОТЧЁТ

по лабораторной работе

«Изучение вынужденных электрических колебаний в контуре, содержащем катушку индуктивности с ферритовым сердечником»

Исполнитель: студент(ка) гр. _____

Цель работы:

Краткое описание метода исследования:

Расчётные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать их наименование в СИ)....

Оборудование:

Средства измерений и их характеристики

Таблица 14.1

Прибор	Относительная погрешность (в % от измеренного значения)
Амперметр (2)	1,0 %
Вольтметр (3)	1,0 %

Результаты измерений

Таблица 14.2

$R = \dots \text{ Ом} \quad I = \dots \text{ мА}$			
ν , кГц	U , В	Z , Ом	L , Гн
0,20			
...
			$L_{\text{ср}} = \dots \text{ Гн}$

Таблица 14.3

$\nu = \dots \text{ кГц}$			
I , мА	U , В	Z , Ом	L , Гн
1,0			
...

Расчеты

1. $Z = \dots = \dots = \dots \text{ Ом}$. (Показать один расчёт)

2. $L = \dots = \dots = \dots \text{ Гн}$.

3. Вывод.

**Написать формулу,
показать расчёт
и записать результат!**

Примечание. Построенные согласно табл. 14.2 и 14.3 графики зависимостей $Z = f(\nu)$ и $L = f(I)$ прилагаются к отчёту.

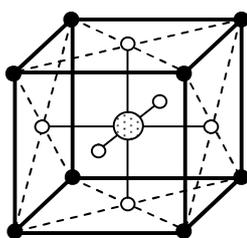
Лабораторная работа Э-15 ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: по предельной петле гистерезиса ознакомиться с методом измерения основных характеристик сегнетоэлектриков, исследовать зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряжённости электрического поля.

Сегнетоэлектрики – группа кристаллических диэлектриков, у которых в некотором интервале температур в отсутствие внешнего электрического поля существует спонтанная (самопроизвольная) поляризованность \vec{P}_s .

Примерами сегнетоэлектриков являются сегнетова соль $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, давшая название этому классу вещества, титанат бария BaTiO_3 , триглицинсульфат $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{SO}_4$ и др. Сегнетоэлектрики имеют важное практическое применение. Например, приготовляя сложные диэлектрики на основе сегнетоэлектриков и добавляя к ним различные примеси, можно получить высококачественные конденсаторы большой ёмкости при их малых размерах.

Сегнетоэлектриками могут быть только кристаллические тела, у которых решётка не имеет центра симметрии. Например, кристаллическая решётка титаната бария состоит как бы из трёх встроенных друг в друга кубических подрешёток: одна образована положительными ионами бария, другая – отрицательными ионами титана, третья – отрицательными ионами кислорода (рис. 15.1). Минимум энергии взаимодействия между положительными ионами титана и отрицательными ионами кислорода достигается, если они смещаются навстречу друг другу, нарушая тем самым симметрию элементарной кристаллической ячейки. Если такое смещение происходит во всех элементарных ячейках кристалла, то сегнетоэлектрик приобретает очень большой электрический дипольный момент в направлении этого смещения. В результате сильного электрического взаимодействия между отдельными поляризованными ячейками они располагаются так, что их дипольные моменты параллельны друг другу. Такое расположение дипольных моментов возможно даже в отсутствие внешнего электрического поля. Это и есть **спонтанная поляризованность** \vec{P}_s .



○ – Ti^{4+} , ● – Ba^{2+} , ○ – O^{2-}

Рис. 15.1. Элементарная ячейка титаната бария

Сегнетоэлектрики отличаются от остальных диэлектриков рядом особенностей:

1. Аномально большое значение диэлектрической проницаемости ϵ ($\sim 10^5$), в то время как у большинства обычных диэлектриков она составляет несколько единиц.

2. Нелинейная зависимость поляризованности P от напряжённости электрического поля E . Это приводит к тому, что диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектрика тоже зависит от напряжённости поля. Для обычных диэлектриков эта величина не зависит от поля и является характеристикой вещества.

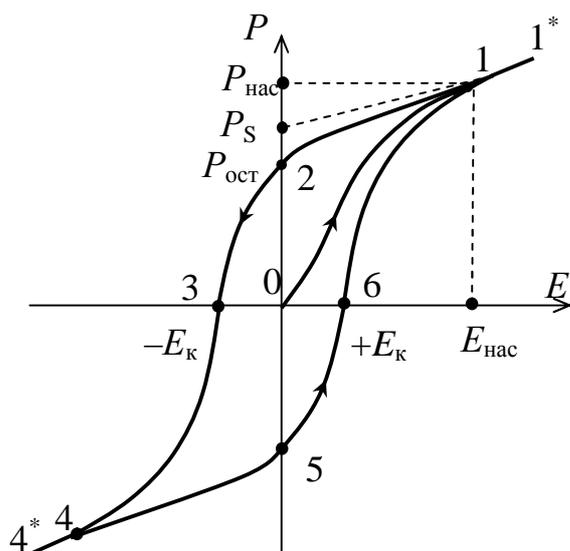


Рис. 15.2. Диэлектрический гистерезис

этом спонтанную поляризованность \dot{P}_S . Это осуществляется путём разделения макроскопического объёма сегнетоэлектрика на малые области – **домены**, каждый из которых характеризуется вектором спонтанной поляризованности \dot{P}_S (рис. 15.3). Размеры доменов порядка десятков тысяч ангстрем (порядка микрометра) В пределах одного домена \dot{P}_S всех элементарных ячеек ориентирован в одну сторону, но в разных доменах он ориентирован произвольно, поэтому средняя поляризованность всего сегнетоэлектрика равна нулю (точка 0 на рис. 15.2 и рис. 15.3, а).

При наложении электрического поля поляризованность сегнетоэлектрика будет складываться из спонтанной поляризованности, не зависящей от поля, и индуцированной, вызванной этим полем

$$\dot{P} = \dot{P}_S + \dot{P}_{\text{инд}}. \quad (15.1)$$

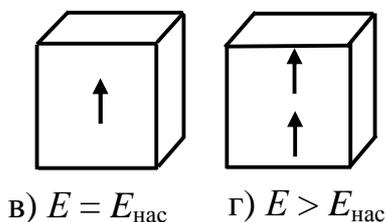
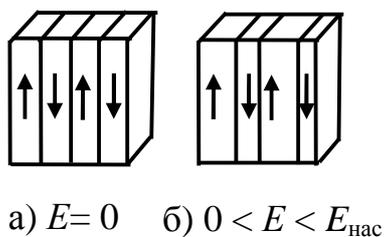


Рис. 15.3. Доменная структура сегнетоэлектрика

Первоначальное увеличение поляризованности происходит из-за роста доменов, с «выгодной» ориентацией за счет доменов с «менее выгодной» ориентацией (рис. 15.3, б). «Выгодной» считается такая ориентация дипольных моментов, которая образует острый угол с направлением внешнего электрического поля. Наиболее интенсивно этот процесс протекает для среднего участка кривой 0-1. В точке 1 поляризованность всех доменов оказывается ориентированной вдоль поля \dot{E} и сегнетоэлектрик превращается в однодоменный кристалл (рис. 15.3, в). Он находится в состоянии насыщения и характеризуется напряжённостью $E_{\text{нас}}$ и поляризованностью $P_{\text{нас}}$ насыщения. Дальнейшее увеличение E приводит к незначительному возрастанию поляризованности и кривая 0-1 переходит в линей-

3. Диэлектрический **гистерезис** («запаздывание»). Рассмотрим поведение сегнетоэлектрика при циклическом изменении внешнего электрического поля (рис. 15.2). При $E = 0$ в сегнетоэлектрике существует только спонтанная поляризованность \dot{P}_S . Если макроскопический объём сегнетоэлектрика спонтанно поляризован, то он является источником сильного электрического поля. С этим полем связана большая энергия. Следовательно, такое состояние является энергетически невыгодным. Система из такого состояния стремится перейти к состоянию с меньшей энергией, сохраняя при этом спонтанную поляризованность \dot{P}_S .

ный участок 1-1* (рис. 15.3, г). Увеличение поляризованности на этом участке происходит за счет индуцированной поляризованности, которая линейно зависит от электрического поля E

$$\dot{P}_{\text{инд}} = \epsilon_0(\epsilon - 1)\dot{E}, \quad (15.2)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная. Так как при достижении состояния насыщения поляризованность равна сумме спонтанной и индуцированной поляризованности, то для определения максимальной спонтанной поляризованности P_s необходимо экстраполировать прямую 1-1* до пересечения с осью P . При уменьшении (из точки 1) поля кривая зависимости P от E не совпадет с первоначальной и пойдет несколько выше (кривая 1-2). При $E = 0$ сегнетоэлектрик не возвращается в неполяризованное состояние, а сохраняет остаточную поляризованность $P_{\text{ост}}$ (отрезок 0-2). Это явление называется диэлектрическим *гистерезисом*. Таким образом, поляризованность \dot{P} не определяется однозначно полем \dot{E} , а зависит также от предшествующей истории сегнетоэлектрика.

Для деполяризации сегнетоэлектрика, т. е. сведения к нулю остаточной поляризованности, необходимо приложить некоторое поле E_k обратного направления. Напряжённость E_k (отрезок 0-3) называется *коэрцитивной силой (коэрцитивным полем)*. При дальнейшем увеличении поля того же направления поляризованность кристалла меняет свое направление и с ростом поля достигает насыщения в точке 4. Дальнейший рост (от точки 4 до 4*) обусловлен действием индуцированной поляризованности. Если вновь изменять напряжённость от $-E_{\text{нас}}$ до $+E_{\text{нас}}$, то электрическое состояние сегнетоэлектрика будет изменяться вдоль ветви 4*-4-5-6-1-1*. Значение остаточной поляризованности для этой ветви определяется отрезком 0-5, а коэрцитивной силы – отрезком 0-6. Замкнутая кривая 1*-1-2-3-4-4*-5-6-1-1* называется *петлей гистерезиса*.

При изменении напряжённости поля от $-E$ до $+E$ и последующем возвращении от $+E$ до $-E$, где E – любое значение напряжённости поля, удовлетворяющее условию $0 < E < E_{\text{нас}}$, будет также получаться петля гистерезиса, называемая *частной петлей (частным циклом)*. Этих циклов может быть бесчисленное множество, при этом вершины частных петель лежат на основной кривой 0-1.

Описание метода исследования

Получить и наблюдать петлю диэлектрического гистерезиса можно с помощью электрической схемы, приведенной на рис. 15.4. Два конденсатора C_1 и C_2 соединены последовательно и подключены к регулируемому источнику переменного напряжения. Конденсатор C_2 заполнен обычным «линейным» диэлектриком с постоянной диэлектрической проницаемостью, а конденсатор C_1 – сегнетоэлектриком. Параллельно этой цепочке конденсаторов включены два резистора. Резистор R_1 обладает эквивалентным омическим сопротивлением исследуемого сегнетоэлектрика, а резистор R_2 служит для подбора равенства фаз напряжений, подаваемых на вход осциллографа (ЭО).

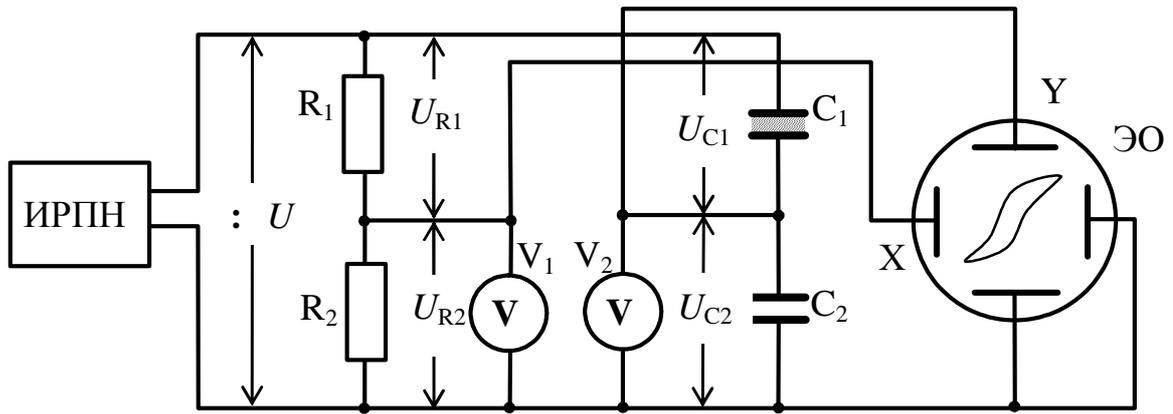


Рис. 15.4. Электрическая схема:

ИРПН – источник регулируемого переменного напряжения, R_1 , R_2 – резисторы, C_1 – конденсатор с изолятором из сегнетоэлектрика, C_2 – конденсатор с изолятором из обычного диэлектрика, V_1 и V_2 – вольтметры, ЭО – осциллограф

Ёмкость конденсатора C_1 и напряжённость электрического поля E внутри сегнетоэлектрика рассчитываются по формулам

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (15.3)$$

$$E = \frac{U_{C1}}{d}, \quad (15.4)$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость, S – площадь обкладок, d – расстояние между ними, U_{C1} – напряжение между обкладками. Так как конденсаторы соединены между собой последовательно, то заряды на их обкладках будут одинаковыми

$$Q = C_1 U_{C1} = C_2 U_{C2}. \quad (15.5)$$

Отсюда

$$U_{C1} = \frac{C_2}{C_1} U_{C2}, \quad (15.6)$$

или, учитывая (15.3), получаем

$$U_{C1} = \frac{C_2 d}{\epsilon_0 \epsilon S} U_{C2}. \quad (15.7)$$

Подставим (15.7) в (15.4), получим

$$E = U_{C2} \frac{C_2}{\epsilon_0 \epsilon S}. \quad (15.8)$$

Из соотношения (15.2) с учетом того, что для сегнетоэлектрика $\epsilon \gg 1$, следует

$$E = \frac{P}{\epsilon_0 \epsilon}. \quad (15.9)$$

Тогда уравнение (15.8) примет вид

$$\frac{P}{\epsilon_0 \epsilon} = U_{C2} \frac{C_2}{\epsilon_0 \epsilon S}, \quad (15.10)$$

откуда следует, что

$$U_{C2} = \frac{S}{C_2} P = U_y, \quad (15.11)$$

то есть напряжение на конденсаторе C_2 пропорционально поляризованности сегнетоэлектрика. Это напряжение подают на вход Y осциллографа.

Найдём напряжение U_{R2} на резисторе R_2 . Ток, текущий через этот резистор, по закону Ома равен

$$I = \frac{U_{R2}}{R_2}. \quad (15.12)$$

Такой же ток протекает и по участку цепи с сопротивлением $(R_1 + R_2)$

$$I = \frac{U_{R1} + U_{R2}}{R_1 + R_2}, \quad (15.13)$$

где U_{R1} – падение напряжения на резисторе R_1 . Из сравнения уравнений (15.12) и (15.13) получим

$$\frac{U_{R2}}{R_2} = \frac{U}{R_1 + R_2}, \quad (15.14)$$

где $U_{R1} + U_{R2} = U_{C1} + U_{C2} = U$ – напряжение, подаваемое на вход схемы (рис. 15.3). Полагаем, что $C_2 \ll C_1$. Тогда из (15.6) следует, что $U_{C1} \ll U_{C2}$, и $U \approx U_{C1}$. Полагаем также, что $R_1 \ll R_2$. Тогда из (15.14) следует

$$\frac{U_{R2}}{R_2} = \frac{U_{C1}}{R_1}, \quad (15.15)$$

откуда с учётом равенства (15.4), получаем уравнение

$$U_{R2} = \frac{R_2 d}{R_1} E = U_x, \quad (15.16)$$

то есть напряжение на резисторе R_2 пропорционально напряжённости внешнего электрического поля. Это напряжение подают на вход X осциллографа.

Таким образом, из уравнений (15.11) и (15.16) видно, что если напряжение U_{C2} подать на вход вертикальной развёртки осциллографа (Y), а напряжение U_{R2} – на вход горизонтальной развёртки (X), то электронный луч в направлении оси Y будет отклоняться пропорционально поляризованности P сегнетоэлектрика, а в направлении оси X – пропорционально напряжённости внешнего электрического поля E . За один период синусоидального изменения напряжения электронный луч на экране опишет полную петлю гистерезиса, и за каждый последующий период в точности повторит её. Поэтому на экране будет наблюдаться неподвижная петля.

Описание установки

Оборудование: генератор сигналов специальной формы (ГССФ), мини-блок «Сегнетоэлектрик», два мультиметра, осциллограф.

Установка для исследования свойств сегнетоэлектриков состоит из ГССФ, миниблока «Сегнетоэлектрик» (рис. 15.5), двух вольтметров и осциллографа. В качестве исследуемого образца используется изолятор многослойного конденсатора C_1 , который изготовлен из керамики $BaTiO_3$ с добавкой олова и стронция. Электрическая и монтажная схемы установки приведены на рис. 15.4 и 15.6.

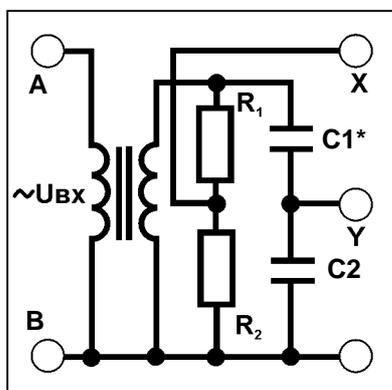


Рис. 15.5. Миниблок «Сегнетоэлектрик»

: $U_{вх}$ – регулируемое напряжение, R_1, R_2 – резисторы, C_1, C_2 – конденсаторы, X, Y – выходы напряжений U_x , и U_y на измерительные приборы и осциллограф, * – конденсатор с сегнетоэлектриком

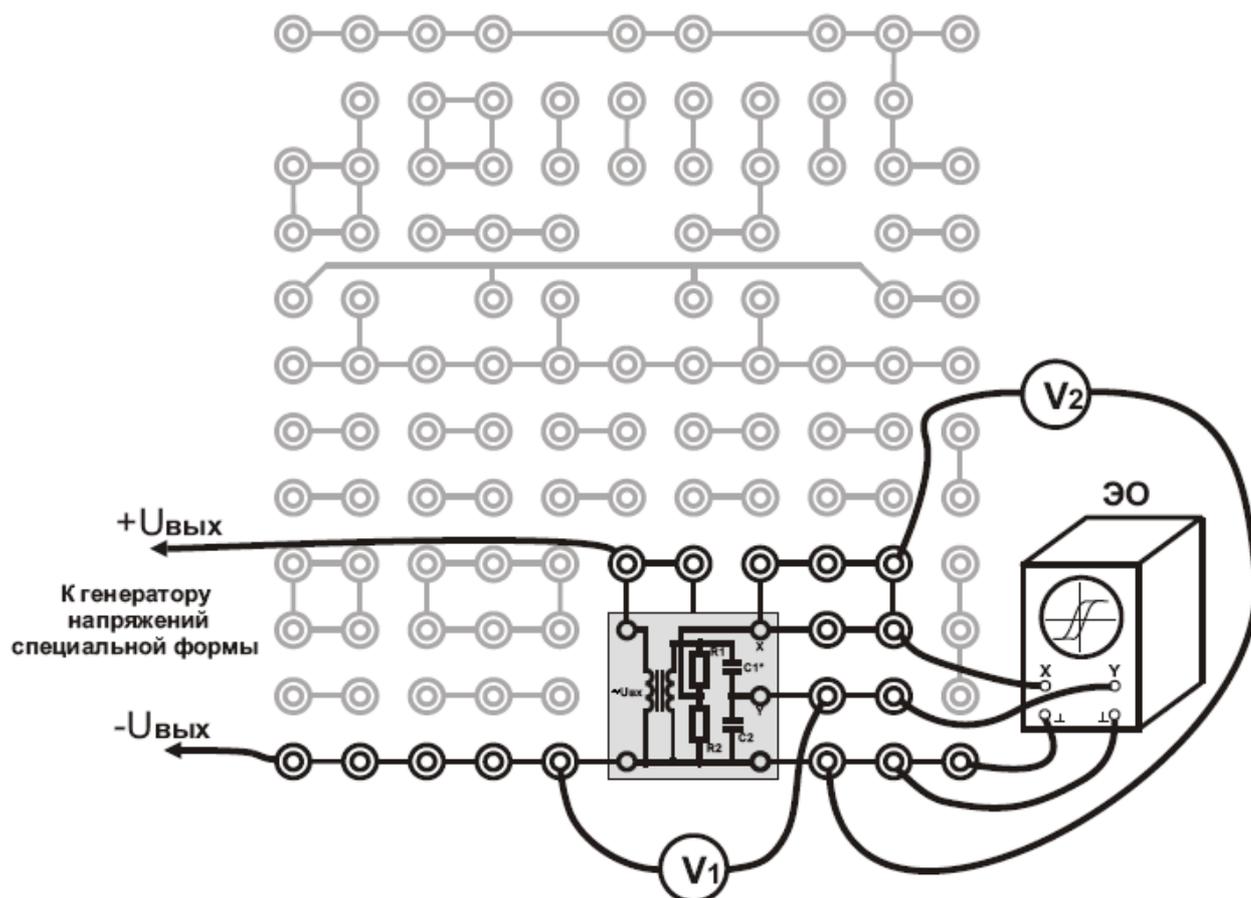


Рис. 15.6. Монтажная схема установки: Миниблок «Сегнетоэлектрик», V_1, V_2 – мультиметры, ЭО – осциллограф

Выполнение работы

1. Заполнить табл. 15.1 (см. бланк отчёта).

2. Переключатели рода работ обоих мультиметров перевести в положение «V~» и установить предел измерения «20 В».

3. Собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведённой на рис. 15.6. Коаксиальный кабель подключить к входу осциллографа «CH2 (Y)», красный штекер кабеля соединить через наборное поле с выходом Y миниблока «Сегнетоэлектрик», а синий – через наборное поле с гнездом «– $U_{\text{ВЫХ}}$ » генератора сигналов специальной формы. Второй кабель подключить к входу «CH1 (X)» осциллографа, красный штекер кабеля соединить с выходом X миниблока «Сегнетоэлектрик» а синий – через наборное поле с гнездом «– $U_{\text{ВЫХ}}$ » генератора сигналов специальной формы.

4. Установить переключатели и регуляторы, расположенные на лицевой панели осциллографа, в положения, указанные в табл. 15.4 на рис. 15.8, если используется осциллограф «MOS-620», или в табл. 15.5 на рис. 15.9, если используется осциллограф «GOS-625».

5. Записать параметры установки в табл. 15.2.

6. Кнопками «СЕТЬ» включить питание блоков генераторов напряжений и мультиметров. Нажать кнопку «Исходная установка». Кнопками «Установка частоты 0,2 – 20 кГц» установить **частоту 50 Гц**.

7. Включить кнопку «POWER» («СЕТЬ»), расположенную на панели осциллографа под экраном, при этом должен зажечься светодиодный индикатор. При помощи регуляторов «INTEN» и «FOCUS», расположенных там же, установить соответственно оптимальную яркость и фокусировку луча.

Внимание! Для предотвращения повреждения люминофора электронно-лучевой трубки не устанавливайте чрезмерную яркость луча и не оставляйте без необходимости длительное время неподвижное пятно на экране.

С помощью регуляторов «< POSITION >» и «POSITION $\frac{D}{\bar{N}}$ » вывести электронный луч в центр координатной сетки экрана.

8. Кнопкой D «Установка уровня выхода 0 ... 15 В» увеличивая напряжение U_y примерно до 4 В, получить изображение петли гистерезиса при насыщении сегнетоэлектрика. Признаком насыщения являются «усы» на петле и её площадь при росте напряжения не увеличивается. Измерить мультиметрами действующие напряжения $U_y^{\text{нас}}$ и $U_x^{\text{нас}}$ Результаты записать в табл. 15.2.

9. Плавно вращая по часовой стрелке регулятор 15 «VOLTS/DIV» (MOS-620) или 11 «VAR» (GOS-625) на панели осциллографа, увеличить вертикальный размер петли примерно до 8 больших делений масштабной сетки экрана.

10. Плавно вращая по часовой стрелке регулятор 6 «VOLTS/DIV» (MOS-620) или 7 «VAR» (GOS-625) на панели осциллографа, увеличить горизонтальный размер петли примерно до 10 больших делений масштабной сетки экрана.

11. Регуляторами осциллографа «< POSITION >» и «POSITION $\frac{D}{\bar{N}}$ » установить петлю симметрично относительно центра координатных осей X-Y.

12. Измерить по масштабной сетке экрана осциллографа координаты пяти характерных точек петли: x_k , $x_{\text{нас}}$, $y_{\text{ост}}$, y_s , $y_{\text{нас}}$ (рис. 15.7). Результаты измерений занести в табл. 15.2. Петлю гистерезиса зарисовать или сфотографировать.

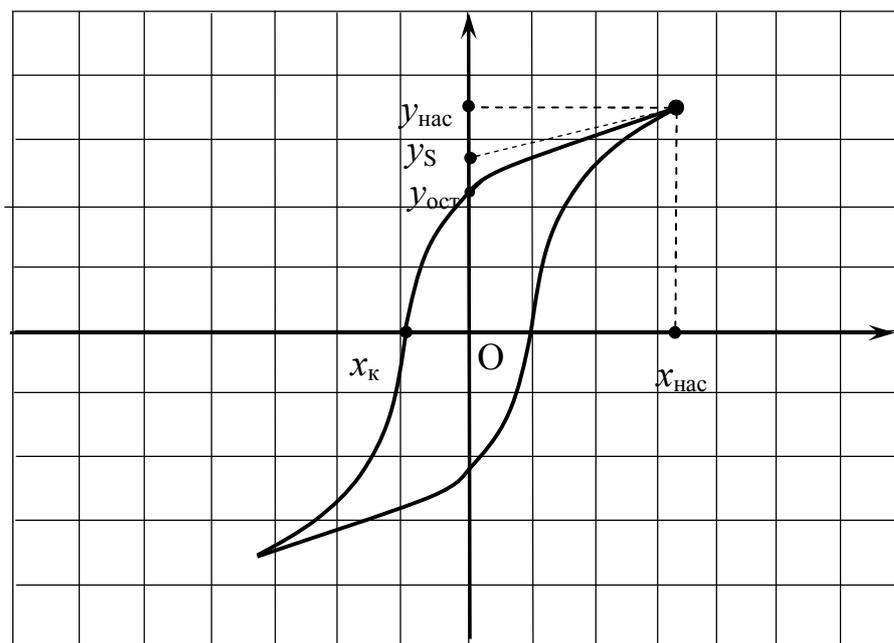


Рис. 15.7. Осциллограмма диэлектрического гистерезиса

13. Деполяризовать образец. Для этого, постепенно уменьшая напряжение U_y , довести его до нуля. При этом площадь петли уменьшится до размеров точки.

14. Устанавливая последовательно значения U_y от 0 до $U_y^{\text{нас}}$ с шагом примерно 0,4 В, измерить соответствующие значения напряжения U_x . Результаты измерений занести в табл. 15.3.

14. Нажать кнопку «Исходная установка» и кнопками «СЕТЬ» и «POWER» выключить питание генераторов напряжения, мультиметров и осциллографа. Разобрать электрическую цепь установки.

Обработка результатов измерений

1. По формулам

$$P_{\text{нас}} = \frac{C_2}{S} U_y^{\text{нас}} \cdot \sqrt{2}, \quad E_{\text{нас}} = \frac{R_1}{R_2 d} U_x^{\text{нас}} \cdot \sqrt{2} \quad (15.17)$$

полученным из (15.11) и (15.16), и данным табл. 15.2 рассчитать поляризованность и напряжённость поля при насыщении сегнетоэлектрика. Мультиметры измеряют действующие напряжения U_x и U_y , поэтому их значения необходимо умножить на $\sqrt{2}$, чтобы получить амплитудные значения напряжений.

2. Спонтанную P_s , остаточную поляризованность $P_{\text{ост}}$ и коэрцитивную силу E_k найти по формулам

$$P_S = P_{\text{нас}} \frac{y_S}{y_{\text{нас}}}, \quad P_{\text{ост}} = P_{\text{нас}} \frac{y_{\text{ост}}}{y_{\text{нас}}}, \quad E_K = E_{\text{нас}} \frac{x_K}{x_{\text{нас}}}. \quad (15.18)$$

Результаты расчётов занести в табл. 15.2.

3. По формулам

$$P = \frac{C_2}{S} U_y, \quad E = \frac{R_1}{R_2 d} U_x, \quad \varepsilon = \frac{P}{\varepsilon_0 E} \quad (15.19)$$

и данным табл. 15.3 рассчитать значения поляризованности, напряжённости и диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика. Результаты расчётов занести в табл. 15.3.

4. Систематические относительные погрешности косвенных измерений величин, выражаемых формулами (15.19), определяются так:

$$\gamma_P = \frac{\theta U_y}{U_y} \cdot 100\%, \quad \gamma_E = \frac{\theta U_x}{U_x} \cdot 100\%, \quad \gamma_\varepsilon = 1,1 \sqrt{(\gamma_P)^2 + (\gamma_E)^2}, \quad (15.20)$$

где $\frac{\theta U_x}{U_x}$, $\frac{\theta U_y}{U_y}$ – **систематические относительные** погрешности прямых измерений напряжений U_x и U_y (табл. 15.1 отчёта).

5. Оформить отчёт в соответствии с прилагаемым образцом.

ОТЧЁТ

по лабораторной работе

“Изучение свойств сегнетоэлектриков”

Исполнитель: студент(ка) гр. _____

Цель работы: ...

Краткое описание метода исследования: ...

Расчётные формулы: (объяснить входящие в формулы физические величины и указать их наименование в “СИ”).

Оборудование:

Средства измерений и их характеристики

Таблица 15.1

Наименование прибора	Предел допускаемой основной относительной погрешности (в % от измеренного значения)	Абсолютная погрешность
Вольтметр	$\theta U/U = 0,8 \%$	—
Линейка или шкала осциллографа	—	$\theta l = \dots$

Результаты измерений и вычислений

Таблица 15.2

Параметры установки:				
$C_2 = \dots$ мкФ, $d = 3,2 \cdot 10^{-3}$ м, $S = 1,23 \cdot 10^{-3}$ м ² , $R_1 = \dots$ Ом, $R_2 = \dots$ Ом				
$U_x^{\text{нас}} = \dots$ В	$U_y^{\text{нас}} = \dots$ В	$E_{\text{нас}} = \dots$ В/м	$P_{\text{нас}} = \dots$ Кл/м ²	
$x_{\text{нас}} = \dots$ мм	$x_{\text{к}} = \dots$ мм	$y_{\text{нас}} = \dots$ мм	$y_{\text{с}} = \dots$ мм	$y_{\text{ост}} = \dots$ мм
$E_{\text{к}} = \dots$ В/м		$P_{\text{с}} = \dots$ Кл/м ²		$P_{\text{ост}} = \dots$ Кл/м ²

Таблица 15.3

$U_x, \text{В (V}_1\text{)}$	$U_y, \text{В (V}_2\text{)}$	$E, \text{В/м}$	$P, \text{Кл/м}^2$	ϵ
...

Расчёты

1. $E_{\text{нас}} = \dots = \dots = \dots$ В/м;
2. $P_{\text{нас}} = \dots = \dots = \dots$ Кл/м²;
3. $E_{\text{к}} = \dots = \dots = \dots$ В/м;
4. $P_{\text{с}} = \dots = \dots = \dots$ Кл/м²;
5. $P_{\text{ост}} = \dots = \dots = \dots$ Кл/м²;
6. $E = \dots = \dots = \dots$ В/м;
7. $P = \dots = \dots = \dots$ Кл/м²;
8. $\epsilon = \dots = \dots = \dots$;
9. $\gamma_P = \dots = \dots = \dots$ %;
10. $\gamma_E = \dots = \dots = \dots$ %;
11. $\gamma_\epsilon = \dots = \dots = \dots$ %;
12. Вывод.

Написать формулу, показать расчёт и записать результат!

Расчёт E и P для одного любого значения из табл.15.3

Примечание. Построенные согласно табл.15.3 графики $P = f(E)$ и $\epsilon = g(E)$, а также изображение петли гистерезиса прилагаются к отчёту.

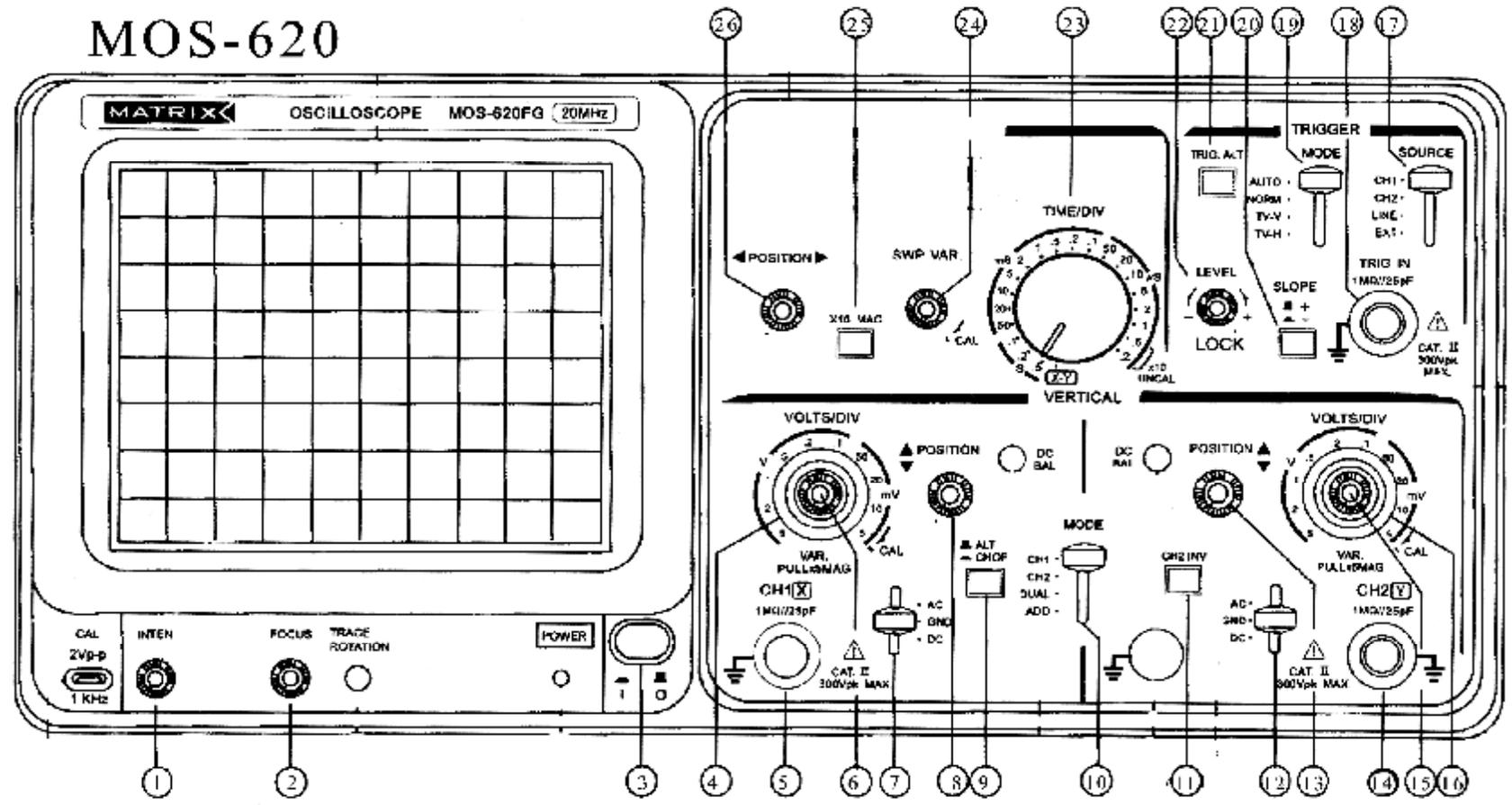


Рис. 15.8. Передняя панель осциллографа MOS-620 и таблица положений органов управления

Таблица 15.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
*	*	+	1v	X	/	AC	*	-	CH2	-	AC	*	Y	/	1v	н	н	н	н	н	н	XY	/	-	*

«+» – нажать, «-» – отжать, «*» – среднее положение, «/» – против часовой стрелки до упора,
«н» – не используется

GOS-625

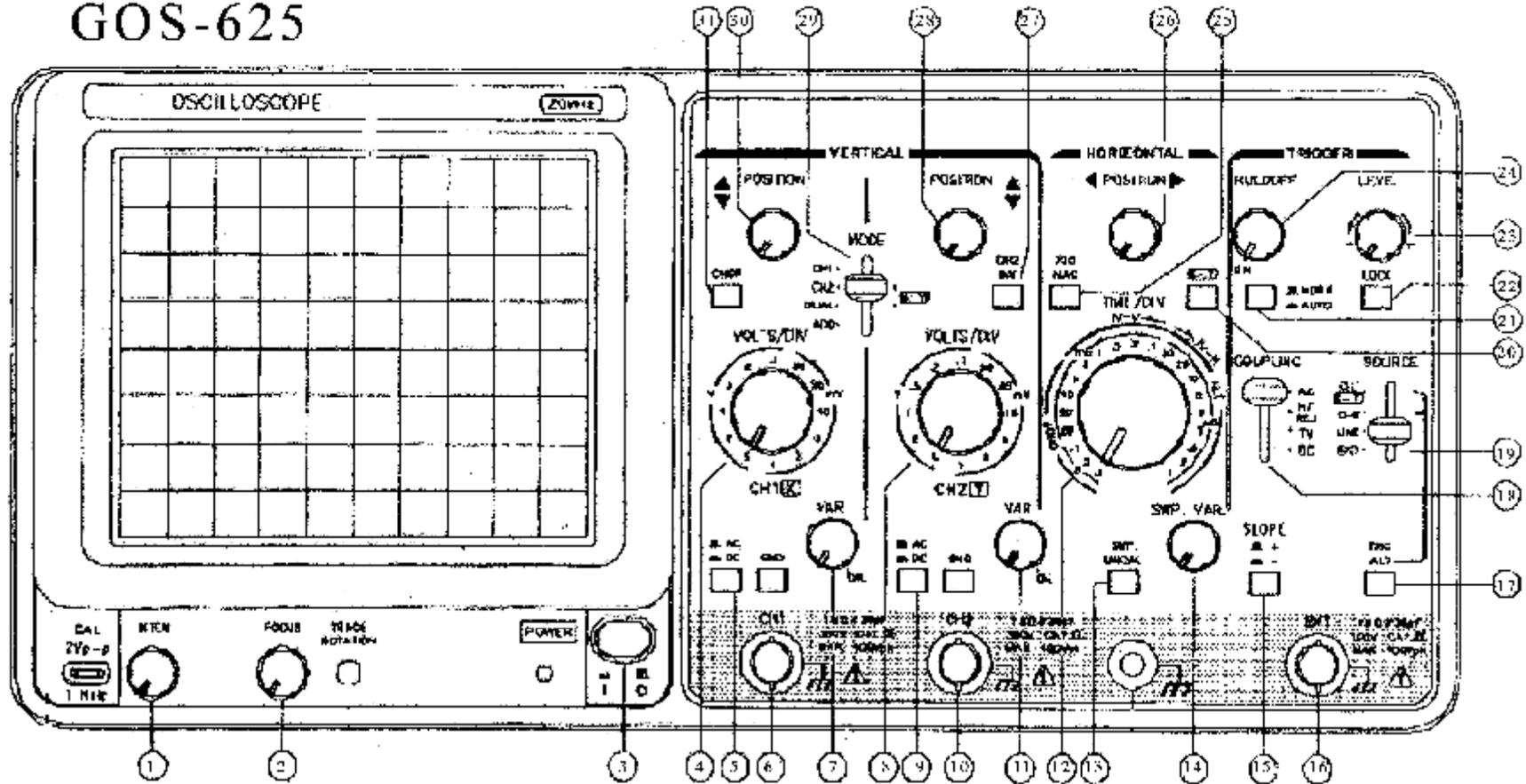


Рис. 15.9. Передняя панель осциллографа GOS-625 и таблица положений органов управления

Таблица 15.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	25	26	27	28	29	30	31
*	*	+	1v	-	X	/	1v	-	Y	/	н	-	/	-	н	-	н	XY	+	-	*	-	*	CH2	*	-

«+» – нажать, «-» – отжать, «*» – среднее положение, «/» – против часовой стрелки до упора,
«н» – не используется

ПРИЛОЖЕНИЕ (см. [14])

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рязанов, Г.А. Опыты и моделирование при изучении электростатического поля / Г.А. Рязанов. – М.: Наука, 1966. – 200 с.
2. Калашников, С.Г. Электричество / С.Г. Калашников. – М.: Наука, 1983. – 576 с.
3. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. Электричество / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1983. – 688 с.
4. Трофимова, Т.И. Курс физики: учебное пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – 5-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2006. – 352 с.
5. Лабораторные занятия по физике: учебное пособие / под ред. Л.Л. Гольдина. – М.: Наука, 1983. – 703 с.
6. Физический практикум / под ред. В.И. Ивероновой. – М.: Наука, 1968. – 325 с.
7. Корнфельд, М.И. Погрешность и надежность простейших экспериментов / М.И. Корнфельд // УФН. – 1965. – Т. 85. – С. 533.
8. Зайдель, А.Н. Погрешности измерения физических величин / А.Н. Зайдель. – Л.: Высшая школа, 1985. – 105 с.
9. Касандрова, О.Н. Обработка результатов измерений / О.Н. Касандрова, В.В. Лебедев – М.: Наука, 1970. – 195 с.
10. Светозаров, В.В. Элементарная обработка результатов измерений: учебное пособие / В.В. Светозаров. – М.: Изд. МИФИ, 1983. – 52 с.
11. Основополагающие стандарты в области метрологии. Издание официальное / М.: Изд-во стандартов, 1986 – 312 с.
12. ГОСТ 19693-74. Материалы магнитные. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1986. – 32 с.
13. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 7 с.
14. Шульгинов, А.А. Электромагнетизм и физика твёрдого тела: учебное пособие для выполнения лабораторных работ / А.А. Шульгинов, Ю.В. Петров, Б.А. Андрианов; под ред. С.Ю. Гуревича. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 144 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Лабораторная работа Э-1. Изучение электростатического поля методом моделирования.....	9
Лабораторная работа Э-2. Определение электроёмкости конденсатора	16
Лабораторная работа Э-3. Определение удельного сопротивления проводника.....	26
Лабораторная работа Э-4. Изучение температурной зависимости сопротивления проводника и полупроводника.....	34
Лабораторная работа Э-5. Определение параметров цепи, обладающей сопротивлением и электроёмкостью.....	42
Лабораторная работа Э-6. Определение удельного заряда электрона методом магнетрона.....	48
Лабораторная работа Э-7. Изучение эффекта Холла в полупроводниках...	55
Лабораторная работа Э-8. Изучение свойств ферромагнетика с помощью петли гистерезиса	64
Лабораторная работа Э-9. Построение кривой намагничивания ферромагнетика методом Столетова.....	77
Лабораторная работа Э-10. Изучение зависимости магнитной проницаемости ферромагнетика от напряжённости магнитного поля.....	82
Лабораторная работа Э-11. Определение точки Кюри ферромагнетика ...	86
Лабораторная работа Э-12. Изучение электромагнитных затухающих колебаний.....	91
Лабораторная работа Э-13. Исследование явления резонанса в электрических цепях переменного тока.....	103
Лабораторная работа Э-14. Изучение вынужденных электрических колебаний в контуре, содержащем катушку индуктивности с ферритовым сердечником.....	114
Лабораторная работа Э-15. Изучение свойств сегнетоэлектриков.....	119
Библиографический список	131