

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
КЕМЕРОВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Кафедра физики

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

лабораторный практикум
для студентов
всех специальностей

Кемерово 2006

Составители:

Н. А. Бахтин, канд. ф.-м. наук, профессор,
Г. Я. Кирсанов, доцент;
О.Ю. Некрасова, ассистент;
А. М. Осинцев, д. т. н., профессор

*Рассмотрено и утверждено на заседании кафедры физики
Протокол № 6 от 01.07.05*

*Рекомендовано методической комиссией технологического факультета
Протокол № от*

Учебное пособие включает в себя подробное описание лабораторных работ по курсу «Электричество и магнетизм». В каждой работе в достаточном объеме представлено теоретическое введение, указан порядок выполнения работы и даны контрольные вопросы. Пособие может быть полезным при самостоятельной работе студентов дневной и заочной форм обучения.

Лабораторная работа №1

Исследование электростатического поля

Цель работы: Экспериментально исследовать электростатическое поле с помощью электролитической ванны.

Приборы: Установка для исследования электростатического поля.

Краткое теоретическое введение

1. Атомистичность заряда

Известно, что при определенных условиях тела приобретают *электрический заряд*.

Заряд – это мера способности тела участвовать в электромагнитных взаимодействиях.

Электрический заряд является неотъемлемым свойством элементарных частиц. Заряды всех элементарных частиц (если они его имеют) одинаковы по абсолютной величине. Его называют *элементарным зарядом* и обозначают буквой e . Установлено, что значение элементарного заряда равно:

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

В природе объектов с зарядами меньшими элементарного пока не обнаружено. Т.е. заряд по своей природе дискретен или атомистичен. Заряд на теле не может изменяться непрерывно, а только скачками на значения кратные элементарному заряду e .

2. Закон Кулона

Начало количественного изучения электрических явлений относится к концу 18 века, когда Кулон в 1785 году установил на опыте закон взаимодействия электрических зарядов.

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (1)$$

k – коэффициент пропорциональности, зависящий от единиц измерения.

Для того чтобы выразить не только значение силы, но и ее направление, закон Кулона записывается в векторной форме

$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \cdot \frac{\vec{r}_{12}}{r_{12}}. \quad (2)$$

3. Единицы измерения электрических зарядов

Единица измерения электрического заряда в системе СИ не относится к числу основных, а является производной единицей. Основной единицей измерения электрических величин в системе СИ является единица силы тока – *ампер*.

Эталонное значение ампера устанавливается на основе закона Ампера – закона о магнитном взаимодействии токов.

Кулон – это заряд, проходящий за 1 сек через поперечное сечение проводника, по которому течет ток 1 А.

4. Электростатическое поле

В пространстве вокруг электрических зарядов существует электростатическое поле. Основными характеристиками электростатического поля являются напряженность и потенциал.

Напряженность электростатического поля

Если вносить в некоторую точку поля небольшие заряженные тела и измерять действующие на них силы, то можно заметить, что отношение силы к величине заряда, не зависит от величины внесенного заряда и может рассматриваться как характеристика точки поля в которую внесен заряд.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (3)$$

Физическая величина \vec{E} называется *напряженностью электрического поля* и является его силовой характеристикой.

Направление вектора напряженности совпадает с направлением силы действующей на внесенный положительный пробный заряд. В системе СИ напряженность поля измеряется в вольтах на метр (В/м). Это напряженность такого поля, который действует на точечный заряд в 1 Кл силой 1 Н.

Суперпозиция полей

Сила, с которой данная система зарядов действует на выделенный точечный заряд, равна векторной сумме сил, с которыми действует на него каждый из зарядов системы. Отсюда следует, что электрическое поле системы зарядов определяется векторной суммой напряженностей полей, создаваемых отдельными зарядами системы, т.е.

$$\vec{E} = \sum \vec{E}_i. \quad (4)$$

Формула (4) выражает *принцип суперпозиции* (наложения электрических полей), согласно которому напряженность \vec{E} поля, создаваемого системой зарядов, равна геометрической сумме напряженностей полей, создаваемых в данной точке каждым из зарядов в отдельности.

Принцип суперпозиции позволяет рассчитать электростатическое поле любой системы неподвижных зарядов.

Силовые линии поля

Для наглядного описания электрических полей используют метод силовых линий.

Под силовой линией понимается такая линия, касательная к каждой точке которой совпадает по направлению с вектором напряженности поля.

Число линий, пронизывающих единицу поверхности площадки, перпендикулярной к силовым линиям, равно численному значению \vec{E} в данной области пространства. Силовые линии всегда начинаются и заканчиваются на покоящихся зарядах, либо уходят в бесконечность.

Так как в каждой точке пространства вектор напряженности имеет лишь одно направление, то линии напряженности нигде не пересекаются.

Работа сил поля по перемещению заряда

Расположим два заряда q и q_1 на некотором расстоянии r_1 друг от друга. Между ними будет действовать сила, определяемая законом Кулона. Заряд q закрепим, а заряд q_1 переместим из точки r_1 в точку r_2 . При перемещении заряда q_1 будет совершена работа. Как показывает расчет, величина этой работы будет определяться выражением:

$$A = q_1 \left(\frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_1} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_2} \right). \quad (5)$$

Из этого выражения видно, что работа по перемещению заряда не зависит от формы траектории (т.к. координаты траектории не вошли в расчетную формулу, а вошли только координаты начала и конца перемещения).

Поля, работа сил которых по перемещению тел не зависит от формы пути, а определяется только их начальными и конечными координатами называются потенциальными.

Электростатическое поле является потенциальным.

Формулу (5) можно представить так:

$$A = q_1(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (6)$$

Эта формула используется для вычисления работы по перемещению зарядов в электростатическом поле.

Величина

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} + C,$$

называется *потенциалом*. C – некоторая постоянная.

Очень часто потенциал на бесконечности, т.е. при $r \rightarrow \infty$ полагают равным нулю. При этом условии постоянная $C = 0$. Это не сказывается на вычислении работы, так как в формулу (6) входит разность потенциалов.

Если переместить заряд из некоторой точки в бесконечность, где потенциал равен нулю, то работа сил поля будет равна $A_\infty = q\varphi$ или

$$\varphi = \frac{A_\infty}{q}. \quad (7)$$

Потенциал – физическая величина, определяемая работой сил поля по перемещению единичного положительного заряда при перемещении его из данной точки в бесконечность.

Если поле создается несколькими зарядами, то потенциал поля системы равен алгебраической сумме потенциалов полей всех зарядов. В этом заключается преимущество скалярной энергетической характеристики электростати-

ческого поля – потенциала по сравнению с его векторной характеристикой – напряженностью, которая равна *геометрической* сумме напряженностей полей зарядов.

Единицы потенциала

Из выражения (7) следует, что единица потенциала в системе СИ есть потенциал такой точки поля, при перемещении в которую из бесконечности положительного заряда в 1 кулон внешние силы совершают работу в 1 джоуль.

Потенциал такой точки равен 1 вольту. $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж/Кл.}$

Эквипотенциальные поверхности

Для наглядной интерпретации поля вводят, наряду с силовыми линиями поля, эквипотенциальные поверхности, которые определяются уравнениями

$$\varphi(x, y, z) = \text{const.}$$

На плоскости эти поверхности вырождаются в эквипотенциальные линии, которые всегда перпендикулярны к силовым линиям поля.

Связь потенциала с напряженностью поля

Рассмотрим две близкие эквипотенциальные поверхности. Вектор напряженности \vec{E} направлен по нормали \vec{n} к эквипотенциальной поверхности. При перемещении заряда q из точки a в точку b совершается работа $dA = q \cdot E \cdot dr$. Выражая ту же работу через разность потенциалов, получим $dA = -q \cdot d\varphi$. Приравняв полученные выражения, и преобразовав, получим:

$$E = - \frac{d\varphi}{dr}. \quad (8)$$

Величина $\frac{d\varphi}{dr}$ характеризует быстроту изменения потенциала в направлении нормали \vec{n} называется *градиентом потенциала*.

Градиент потенциала обычно обозначается символом «grad»

$$\vec{E} = - \text{grad } \varphi, \text{ или символом «}\nabla\text{» (набла). } \vec{E} = - \nabla \varphi.$$

Величина $\text{grad } \varphi$ в проекциях на координатные оси может быть представлена в виде:

$$\text{grad } \varphi = \vec{i} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial \varphi}{\partial z}, \text{ где } \vec{i}, \vec{j}, \vec{k} \text{ – единичные орты в направлении координатных осей.}$$

Зная расположение эквипотенциальных поверхностей, можно построить систему силовых линий. Зная расположение линий напряженности электрического поля, можно построить эквипотенциальные поверхности.

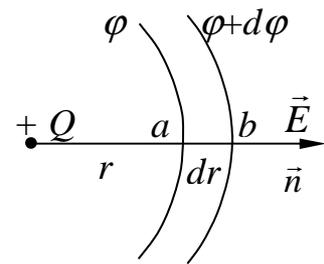


Рис. 2

5. Принцип работы экспериментальной установки

Целью работы является построение картины электростатического поля с помощью линий равного потенциала и силовых линий.

Обычно электростатическое поле исследуется путем перемещения в нем измерительных зондов. Однако электростатические измерения сопряжены с определенными трудностями, поскольку зонды, вносимые в электростатическое поле, искажают это поле. Вокруг зондов, чтобы уменьшить искажения, создается ионизация газа, например, с помощью газовой горелки.

Выход может быть найден в замене электростатического поля неподвижных зарядов полем постоянного электрического тока.

Установка для изучения картины электростатического поля состоит из электролитической ванны (ЭВ), наполненной водой, являющейся слабым электролитом. В ванну помещены два электрода (\mathcal{E}_1 , \mathcal{E}_2) (рис. 1). Изучению подлежит электростатическое поле, создаваемое этими электродами.

Для измерения потенциала в любой точке поля вводится зонд (3). В цепь между зондом и переключателем (П) включается гальванометр (Г).

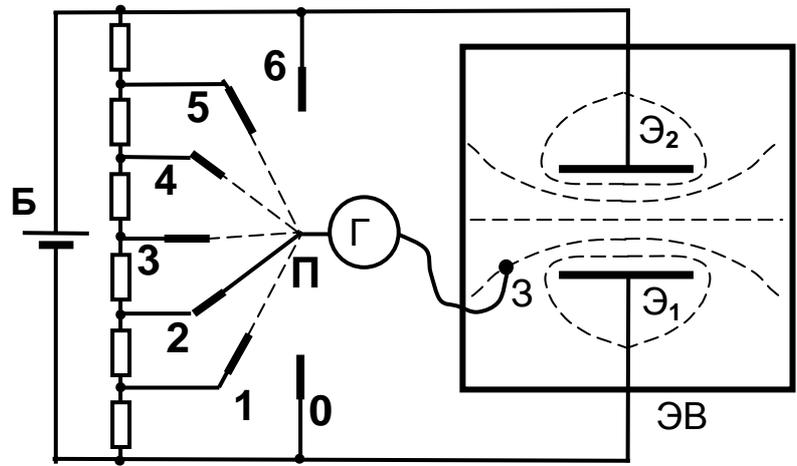


Рис. 1

Батарея (Б) создает напряжение 6 В. Делитель напряжения состоит из шести одинаковых резисторов с сопротивлениями по 1 кОм, т.е. падение напряжения на каждом резисторе составляет 1 В.

Переключатель имеет шесть положений. При переключении на одну позицию напряжение изменяется на 1 В, т.е. в положении «0» – 0 В, в положении «1» – 1 В и так далее до 6 В. Если переключатель установлен в каком-то положении, на рисунке это положение «2», то на движок переключателя подается напряжение 2 В.

Электролит в ванне является высокоомным проводником. При протекании по нему электрического тока произойдет распределение потенциала. Передвигая зонд по ванне необходимо найти и отметить все точки в которых потенциал равен потенциалу на движке переключателя. При равенстве напряжений на зонде и движке переключателя гальванометр покажет «нуль».

Главная экспериментальная трудность этого метода состоит в возникновении поляризации электродов, что приводит к искажению поля с течением времени. Чтобы устранить вредное влияние поляризации вместо постоянного тока используется переменный.

6. Порядок выполнения работы

1. Установить электроды в ванне. Их расположение указываются преподавателем или лаборантом.
2. Заготовить на тетрадном листе в клетку чертеж с декартовой системой координат, подобной той, которая находится в электролитической ванне, и нанести на нее электроды.
3. Переключатель установить в положение «1».
4. Включить установку в сеть.
5. Перемещая зонд, отыскивают точки поля в которых гальванометр показывает минимальное значение. Найденные точки отмечают на чертеже. Количество точек должно быть таким, чтобы было можно было начертить плавную кривую. Это будет первая эквипотенциальная поверхность. После прочерчивания кривой записать рядом с ней значение потенциала (1В).
6. Установить переключатель в положение «2» и проделать указания к пункту «5». Записать рядом с кривой значение потенциала (2В).
7. Устанавливая последовательно переключатель в положения «3», «4», «5» снять все пять эквипотенциальных поверхностей.
8. На этот же чертеж нанести семейство силовых линий.
9. В некоторых точках поля, по указанию преподавателя, определить напряженность поля по формуле:

$E_{\text{макс}} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta r}$, где $\Delta\varphi$ – разность потенциалом между соседними эквипотенциальными линиями. Δr – кратчайшее расстояние между ними. В нашей установке разность потенциалов между соседними эквипотенциальными линиями $\Delta\varphi = 1\text{В}$.

7. Контрольные вопросы

1. Электрический заряд атомистичен. Что это значит?
2. Чему равен элементарный электрический заряд?
3. Сформулируйте закон Кулона. Как изменится сила взаимодействия между точечными зарядами, если расстояние между ними увеличить в два раза.
4. В каких единицах в системе СИ измеряется заряд? Относится ли единица заряда в системе СИ к основным?
5. Назовите основные характеристики электрического поля.
6. Как определить напряженность электрического поля в некоторой точке? В каких единицах она измеряется?
7. Сформулируйте принцип суперпозиции электрических полей.
8. Дайте определение понятия силовой линии.
9. Как определить потенциал в некоторой точке поля? Единицы его измерения.
10. Как вычислить работу по перемещению заряда из одной точки электростатического поля в другую? Зависит ли работа по перемещению заряда от формы траектории?
11. Что такое эквипотенциальная поверхность?
12. Выведите формулу связи напряженности и потенциала.
13. Объясните принцип работы экспериментальной установки?
14. Объясните порядок выполнения работы.
15. Как на систему эквипотенциальных линий нанести систему силовых линий напряженности?

Лабораторная работа №2

Увеличение пределов измерения электроизмерительных приборов

Цель работы: Рассчитать добавочное сопротивление и шунт и проградуировать электроизмерительные приборы.

Приборы и принадлежности: Лабораторная установка включающая в себя: эталонный электроизмерительный прибор, рабочий прибор (миллиамперметр), регулируемый источник питания, магазин сопротивлений.

Краткое теоретическое введение

Электрический ток – упорядоченное движение электрических зарядов. Количественной характеристикой электрического тока является *сила тока*.

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (1)$$

За положительное направление тока принимается направление движения положительных зарядов.

Ток, не изменяющийся со временем, называется *постоянным*. Для постоянного тока справедливо соотношение

$$I = \frac{q}{t}, \quad (2)$$

В системе СИ *единица силы тока* – *ампер* (А) относится к числу основных.

Условия существования электрического тока

Электрическое поле не может обеспечить непрерывного кругового движения зарядов по замкнутой цепи. Для того, чтобы шел ток нужно на каком-то участке электрической цепи поместить дополнительное устройство, которое бы непрерывно, поддерживало разность потенциалов между соседними точками проводника. Тогда движение зарядов по замкнутой цепи будет выглядеть следующим образом: под действием сил электрического поля заряды из области больших φ “скатываются” в область меньших φ , затем внешнее устройство поднимает потенциал зарядов до первоначального значения, при этом устройство совершает работу против сил электрического поля.

Электродвижущая сила

Перемещение зарядов по замкнутой цепи происходит за счет работы сил неэлектрического происхождения – так называемых *сторонних сил*. Электрические силы не могут обеспечить движение зарядов по замкнутому контуру из-за своего потенциального характера (работа по замкнутому пути равна нулю). Сторонние силы действуют либо на протяжении всей цепи (например, электромагнитная индукция), либо на отдельных её участках. Эти силы могут быть обеспечены химическими процессами, диффузией и т. д.

Сторонние силы можно охарактеризовать работой, которую они совершают над зарядами. Работа сторонних сил над положительным единичным зарядом называется *электродвижущей стороной силой* (ЭДС).

$$E = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \quad (5)$$

Видно, что размерность ЭДС совпадает с размерностью потенциала, хотя электродвижущая сила не является силой электрического происхождения.

ЭДС (E) измеряется в тех же единицах, что и потенциал, т.е. в вольтах.

Величина, численно равная работе, совершаемой электрическими и сторонними силами при перемещении единичного положительного заряда называется *падением напряжения* или просто *напряжением* U_{12} на данном участке цепи.

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + E_{12}. \quad (6)$$

Участок, на котором действуют сторонние силы, называется *неоднородным*. Участок цепи, на котором не действуют сторонние силы, называется *однородным*. Для однородного участка цепи

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2. \quad (7)$$

Закон Ома

Немецкий физик Георг Ом (1787 – 1854) экспериментально установил закон, согласно которому сила тока, текущего по однородному участку цепи пропорциональна падению напряжения на проводнике

$$I = \frac{U}{R}. \quad (8)$$

Величина R называется *электрическим сопротивлением* проводника. Единицей сопротивления является ом, равный сопротивлению такого проводника, при протекании через которого тока 1 А происходит падение напряжения 1 В.

Величина сопротивления зависит от формы, размеров и свойств материала, из которого он сделан. Для проводника постоянного сечения:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (9)$$

где l – длина проводника, S – площадь его поперечного сечения, ρ – удельное сопротивление проводника. Если $l = 1\text{ м}$, $S = 1\text{ м}^2$, то R численно равно ρ .

В системе СИ удельное сопротивление измеряется в Ом·м.

Закон Ома в дифференциальной форме

Между вектором плотности тока \vec{j} и вектором напряженности \vec{E} в одной и той же точке проводника существует связь, которая имеет вид:

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E}; \quad \vec{j} = \sigma \vec{E}. \quad (10)$$

Формула (10) выражает закон Ома в дифференциальной форме. Величина $\sigma = \frac{1}{\rho}$ называется *удельной проводимостью* материала из которого он изготов-

лен. Величина обратная 1 Ом называется сименсом (Сим). Единицей удельной проводимости является Сим/м.

Закон Ома для замкнутой цепи

Мысленно выделим некоторый участок электрической цепи. Пусть ЭДС на этом участке E , а разность потенциалов на его концах φ_1 и φ_2 .

Напряжение на таком участке электрической цепи:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 + E.$$

Замкнем цепь, тогда $\varphi_1 = \varphi_2$. Полное сопротивление замкнутой цепи складывается из внутреннего сопротивления источника ЭДС r и сопротивления внешней цепи R . Закон Ома примет вид

$$I = \frac{E}{r + R}. \quad (11)$$

Это и есть выражение для закона Ома для замкнутой цепи.

Разветвленные цепи. Правила Кирхгофа

Расчет разветвленных цепей, особенно если в них имеется несколько источников тока, сложен. Этот расчет можно значительно упростить, если воспользоваться правилами, сформулированными Кирхгофом.

Первое правило Кирхгофа относится к узлам цепи.

Алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю.

$$\sum_k I_k = 0. \quad (12)$$

Узлом цепи называется точка, в которой сходятся три или более проводников. При записи уравнений типа (12) мы будем придерживаться следующего правила: токи, текущие к узлу будем брать со знаком “плюс”, а выходящие от узла со знаком “минус”.

Второе правило Кирхгофа относится к замкнутым контурам. Если выделить в цепи замкнутый контур и мысленно обойти его в некотором направлении, то алгебраическая сумма разностей потенциалов будет равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре. Или

$$\sum_k I_k R_k = \sum_k E_k. \quad (13)$$

Теория метода расширения пределов измерения приборов.

Включение электроизмерительных приборов в электрические цепи не должно вносить существенных искажений в значения измеряемых величин.

Эти требования можно выполнить, если в качестве основы измерительного прибора взять чувствительный миллиамперметр или микроамперметр. Подключая необходимые сопротивления, его можно использовать для измерения напряжений или токов. Это возможно потому, что по закону Ома напряжение и ток пропорциональны друг другу.

Измерение силы тока

Для измерения силы тока используют амперметры. Амперметры включают в электрическую цепь последовательно. Чтобы не вносить больших изменений в параметры цепи, их изготавливают с возможно малым внутренним сопротивлением. Для расширения пределов измерений параллельно к миллиамперметру присоединяется резистор, называемый *шунтом*.

Расчет шунта

Цепь (рис. 1) из миллиамперметра G с внутренним сопротивлением R_0 и шунта сопротивлением $R_{ш}$ содержит два узла A и B .

Сопротивление шунта найдем, воспользовавшись законом Ома:

$$R_{ш} = \frac{U_{AB}}{I_{ш}}. \quad (14)$$

По первому закону Кирхгофа сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю. Запишем уравнение для узла A .

$$I - I_0 - I_{ш} = 0. \quad \Rightarrow \quad I_{ш} = I - I_0. \quad (15)$$

Между узлами A и B напряжение определяется падением напряжения на внутреннем сопротивлении миллиамперметра.

$$U_{AB} = I_0 \cdot R_0, \quad (16)$$

$$\text{Подставим (16) и (15) в (14):} \quad R_{ш} = \frac{I_0 R_0}{I - I_0}.$$

Разделим числитель и знаменатель на ток I_0 полного отклонения прибора:

$$R_{ш} = \frac{R_0}{I/I_0 - 1}. \quad \text{Обозначим через } N = \frac{I}{I_0}, \text{ тогда } R_{ш} = \frac{R_0}{N - 1}. \quad (17).$$

Пусть вся шкала измерительного прибора рассчитана на ток I_0 и нам необходимо увеличить пределы измерения в N раз, тогда к нему необходимо подключить шунт, рассчитанный по формуле (17).

Пример. Ток полного отклонения измерительного прибора $I_0 = 1 \text{ мА}$, внутреннее сопротивление прибора $R_0 = 1000 \text{ Ом}$. Рассчитать шунт для измерения тока $0,1 \text{ А}$.

Решение. Вначале найдем N : $N = 100$. Подставим все численные значения в формулу (17): $R_{ш} = \frac{1000}{100 - 1} = 10,10 \text{ Ом}$.

Итак, если к электроизмерительному прибору с током полного отклонения $I_0 = 1 \text{ мА}$, подключить шунт $R_{ш} = 10,10 \text{ Ом}$, то ток полного отклонения возрастет в 100 раз и составит $100 \text{ мА} = 0,1 \text{ А}$.

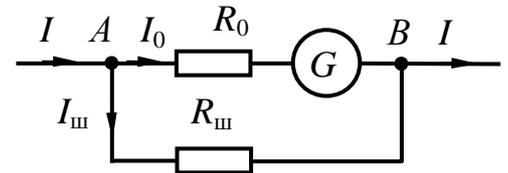


Рис. 1

Расчет добавочного сопротивления

Вольтметр включается в цепь параллельно (рис. 2) и, чтобы не вносить существенных искажений в значения измеряемых величин, должен иметь большое сопротивление.

Для увеличения пределов измерения, последовательно с прибором, включают добавочное сопротивление R_d .

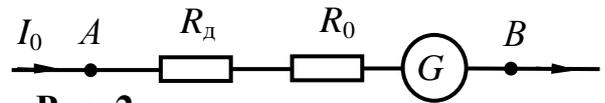


Рис. 2

Измеряемое напряжение U между точками A и B связано с током полного отклонения гальванометра I_0 и его внутренним сопротивлением соотношением:

$$U = I_0 \cdot (R_d + R_0) \quad \Rightarrow \quad R_d = \frac{U}{I_0} - R_0. \quad (18)$$

Если известно значение предела измерения напряжения

$$U_V = I_0 \cdot R_0, \quad \Rightarrow \quad R_0 = \frac{U_V}{I_0}, \quad (19)$$

то можно ввести число $N = \frac{U}{U_V}$, показывающее во сколько раз мы хотим увеличить пределы измерения прибора. Формулу (19) можно преобразовать:

$$R_d = \frac{U_V N}{I_0} - R_0 = R_0(N - 1), \text{ т.е.} \quad R_d = R_0(N - 1), \quad (20)$$

При подключении добавочного сопротивления, рассчитанного по формулам (18) или (19) напряжение полного отклонения возрастет в N раз.

Пример. Напряжение полного отклонения прибора составляет $U_V = 1$ В.

Внутреннее сопротивление $R_0 = 1000$ Ом. Рассчитать добавочное сопротивление, чтобы напряжение полного отклонения составляло 10 В.

Решение. Вначале рассчитаем N .

$$N = \frac{10}{1} = 10. \text{ Подставим в (18): } R_d = 1000 \cdot (10 - 1) = 9000 \text{ Ом.}$$

При подключении добавочного сопротивления 9 кОм предел измерения напряжения данного прибора возрастает в 10 раз и составит 10 В.

Лабораторная установка

Установка включает в себя три блока:

- 1) образцового многопредельного прибора который может работать в режиме амперметра или вольтметра;
- 2) миллиамперметра к которому в зависимости от назначения может подключаться шунт или добавочное сопротивление;
- 3) регулируемого источника тока.

К установке прилагается магазин сопротивлений на котором можно устанавливать через 0,1 Ома любое сопротивление в интервале от 0,1 до 100 кОм.

Экспериментальная часть

Задание 1. Расчет шунта и градуировка амперметра на 0,1А

Миллиамперметр имеет внутренне сопротивление $R_0 = 1000$ Ом. Ток полного отклонения измерительного прибора $I_0 = 1$ мА.

1. Рассчитать шунт для измерения тока 0,1 А.
2. Тумблером на задней стенке прибора отключить прибор от сети. (Перевести в нижнее положение).
3. Регулятор напряжения установить в крайнее левое положение. Блок питания при этом не будет выдавать напряжения во внешнюю цепь.
4. Установить на магазине рассчитанное значение сопротивления шунта.
5. Подключить шунт к рабочему прибору (миллиамперметру).
6. Соединить последовательно эталонный амперметр, и зашунтированный миллиамперметр и подключить к источнику питания.
7. Переключить тумблер эталонного прибора в правое положение. Это режим измерения токов. Переключатель поставить в положение «100mA».
8. Подготовить таблицу для градуировки амперметра с пределом 0,1А.
9. Включить прибор.
10. Устанавливая регулятором напряжения значения токов, указанных в таблице, занести в таблицу все значения $I_{\text{раб}}$.

Таблица №1

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$I_{\text{эт}}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$I_{\text{раб}}$											

11. Построить график зависимости $I_{\text{раб}} = f(I_{\text{эт}})$. По оси абсцисс откладывать значения, снимаемые с эталонного прибора, по оси ординат с рабочего.

Задание 2. Расчет шунта и градуировка амперметра на 0,05А

12. Переключатель режимов установить в положение 50 мА и проделать все пункты к заданию 1 (т.е. рассчитать шунт, подсоединить к миллиамперметру построить таблицу №2 и т.д.)

Задание 3. Расчет R_d и градуировка вольтметра на 10 В

Миллиамперметр имеет внутренне сопротивление $R_0 = 1000$ Ом. Ток полного отклонения измерительного прибора $I_0 = 1$ мА.

13. Рассчитать добавочное сопротивление R_d для прибора с пределом 10 В.
14. Установить на магазине сопротивлений сопротивление R_d и подключить к рабочему прибору (миллиамперметру).

15. Подключить эталонный вольтметр, и миллиамперметр с добавочным сопротивлением к источнику питания.
16. Тумблер эталонного прибора перевести в левое положение – «U». Переключатель установить в положение «10В».
17. Подготовить таблицу №3 для градуировки вольтметра с пределом 10 В.
- 18.

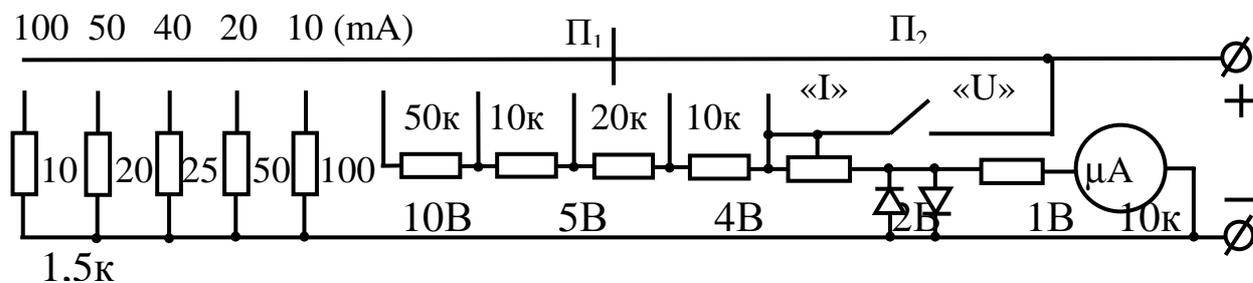
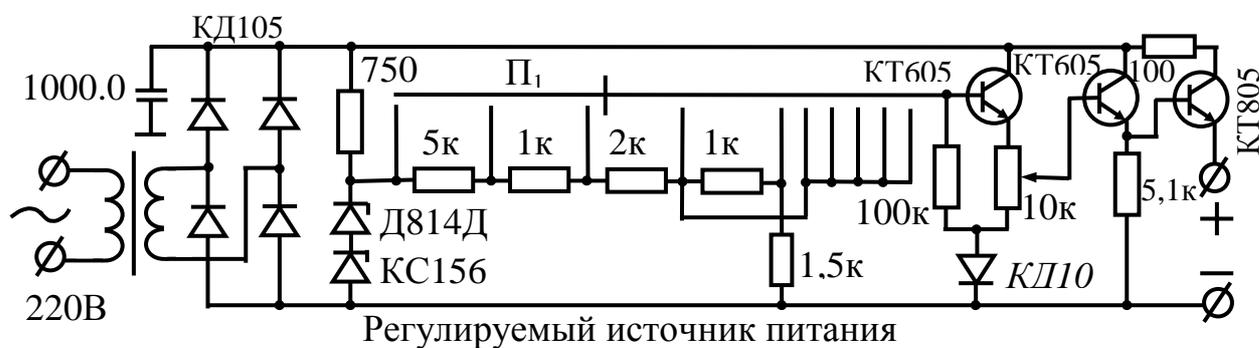
Таблица 3

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$U_{\text{эт}}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$U_{\text{раб}}$											

19. Произвести измерения, заполнить таблицу построить график зависимости $U_{\text{раб}} = f(U_{\text{эт}})$. По оси абсцисс откладывать значения, снимаемые с эталонного прибора, по оси ординат с рабочего.

Задание 4. Расчет R_d и градуировка вольтметра на 5 В.

20. Рассчитать добавочное сопротивление для измерения напряжения 5 В.
21. Прodelать указания к пунктам 13 – 18.



Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятий: сила тока, напряжение, ЭДС.
2. Сформулируйте закон Ома в дифференциальной и интегральной форме.
3. По какой формуле определяется сопротивление проводника постоянного сечения. Какие величины входят в эту формулу?
4. Запишите закон Ома для замкнутой цепи.
5. Сформулируйте правила Кирхгофа.
6. Выведите формулу для расчета шунта.
7. Выведите формулу для расчета добавочного сопротивления.
8. Объясните порядок выполнения работы.

Лабораторная работа №3 (Вариант 1) Измерение сопротивлений при помощи мостовой схемы

Цель работы: экспериментальная проверка формул последовательного и параллельного соединения при помощи мостовой схемы.

Приборы и принадлежности: установка для измерения сопротивлений, источник питания, декадный магазин сопротивлений.

Краткая теория изложена в лабораторной работе №2.

Описание установки

Добиться высокой точности измерений величин сопротивлений и значительно упростить расчеты можно, применяя методы, в основу которых положены различные варианты мостовых схем.

Наиболее простая схема моста постоянного тока (моста Уитстона) для измерения сопротивления проводников (рис. 1) состоит из четырех сопротивлений R_0 , R_1 , R_2 , R_x , образующих плечи моста, в одну из диагоналей которого включен источник постоянного тока \mathcal{E} , а в другую – нуль - гальванометр (микроамперметр с нулевой отметкой в середине шкалы) G . Выберем направления токов согласно первому правилу Кирхгофа.

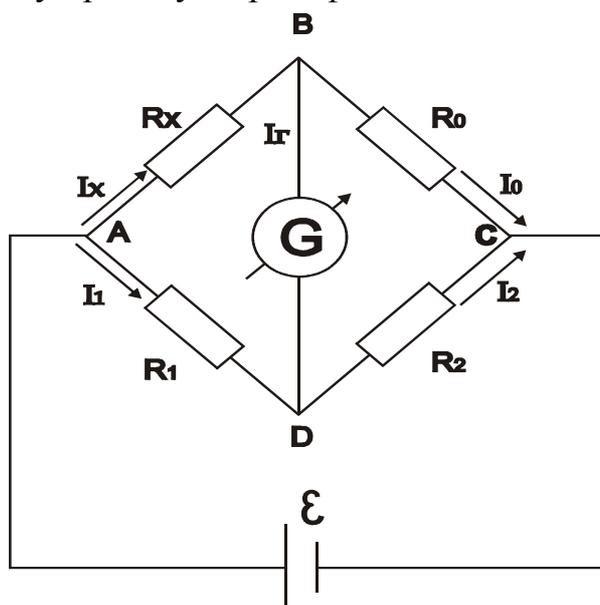


Рис. 1

Будем иметь: для узла **B** $I_x = I_r + I_0$;
 для узла **D** $I_1 = -I_r + I_2$. (1)

По второму правилу Кирхгофа имеем для контуров:

$$\begin{aligned} \text{ABDA} \quad I_x R_x + I_r R_r - I_1 R_1 &= 0; \\ \text{BCDB} \quad I_0 R_0 - I_2 R_2 - I_r R_r &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

При определенных соотношениях величин сопротивлений в плечах моста можно добиться его баланса, т. е. отсутствия тока в цепи нуль – гальванометра. Баланс моста достигается изменением величины сопротивления в одном из

плеч моста. Решая совместно (1) и (2) и учитывая, что при балансе моста $I_r = 0$,

получим
$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_0 \quad (3)$$

Если величины R_1 , R_2 , R_0 известны, то по формуле (3) можно вычислить сопротивление исследуемого резистора. Обычно сопротивления R_1 и R_2 заменяют потенциометром (реохордом) или набором калиброванных резисторов, соединенных последовательно. Если сопротивления этих резисторов одинаковы и равны R , то соотношение R_1/R_2 будет равно отношению числа резисторов N_1 в плече 1 к числу резисторов N_2 в плече 2, т. к. $R_1 = N_1 R$ и $R_2 = N_2 R$, т.е.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Подставляя полученное соотношение в (3), получим

$$R_x = \frac{N_1}{N_2} R_0 \quad (4)$$

В качестве R_0 используется сопротивление декадного магазина сопротивлений. Соотношение N_1/N_2 устанавливается включением штекера в соответствующее гнездо делителя.

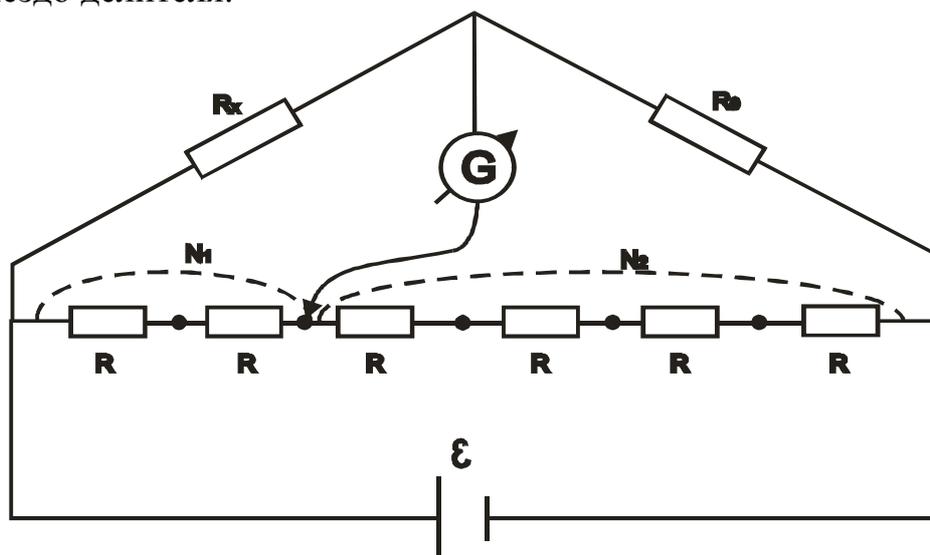


Рис. 2

Порядок выполнения работы:

1. Собирают схему согласно рисунку 2.
2. Устанавливают одно из возможных соотношений плеч делителя.
3. При включенном источнике тока подбором R_0 на декадном магазине сопротивлений добиваются баланса моста.
4. Опыт проводят для трех различных соотношений плеч делителя.
5. Заменяя исследуемый резистор другим, а затем двумя последовательно и параллельно соединенными, добиться баланса моста при выбранных ранее соотношениях плеч делителя.
6. Результаты измерений и расчетов заносят в таблицу.

7. Используя полученные средние значения сопротивлений резисторов R_{x1} и R_{x2} находят их общее сопротивление при последовательном $R_x = R_{x1} + R_{x2}$

и параллельном $R_x = \frac{R_{x1} R_{x2}}{R_{x1} + R_{x2}}$.

8. Оценивают погрешности измерений.

	N_1	N_2	R_0	R_x	ΔR_x	$\frac{\Delta R_x}{R_x} \cdot 100\%$
Резистор 1						
	средние значения					
Резистор 2						
	средние значения					
Послед. 1+2						
	средние значения					
Паралл. 1+2						
	средние значения					

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте правила Кирхгофа.
2. Выведите формулу (3) из условия баланса моста.
3. Выведите формулу для нахождения общего сопротивления при последовательном соединении проводников.
4. Выведите формулу для нахождения общего сопротивления при параллельном соединении проводников.
5. Изменится ли баланс моста, если источник тока и нуль – гальванометр поменять местами? Провести вывод рабочей формулы в этих случаях и сравнить результаты.
6. При каком соотношении плеч делителя получается наибольшая точность измерений? Проанализируйте формулу относительной погрешности измерений.
7. Как произвести оценку абсолютной и относительной погрешностей измерения сопротивления проводника, используя рабочую формулу?
8. Какие методы измерения сопротивления проводников Вам известны? Приведите схемы и выведите расчетные формулы.

Лабораторная работа №3 (Вариант 2)

Измерение сопротивлений с помощью моста Уитстона

Цель работы: Измерение сопротивлений с помощью моста Уитстона.

Приборы и принадлежности: Установка для изучения моста Уитстона.

Краткая теория изложена в лабораторной работе №2.

Теория метода

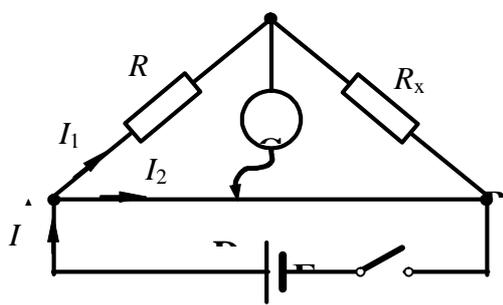


Рис. 1

Мостик Уитстона предназначен для измерения сопротивлений. Он состоит из реохорда AB , чувствительного гальванометра G и двух сопротивлений – известного R и неизвестного R_x (рис. 1). Реохорд представляет собой укрепленную на линейке однородную проволоку, вдоль которой может перемещаться скользящий контакт D . Рассмотрим схему без участка ED . Замкнем

ключ K . Тогда по проволоке AB потечет ток и вдоль нее будет наблюдаться равномерное падение потенциала от величины φ_A (в точке A) до величины φ_B (в точке B).

В цепи AEB пойдет ток I_1 и будет наблюдаться падение потенциала от φ_A до φ_E (на сопротивлении R) и от φ_E до φ_B (на сопротивлении R_x). Очевидно, в точке E потенциал имеет промежуточное значение φ_E между значениями φ_A и φ_B . Поэтому на участке AB всегда можно найти точку D , потенциал которой φ_D равен потенциалу φ_E в точке E . Если между точками E и D включен гальванометр G , то в этом случае ток через него не пойдет, так как

$$\varphi_E - \varphi_D = 0$$

Такое положение называется *равновесием моста*. Покажем, что условие равновесия определяется соотношением

$$\frac{R_x}{R} = \frac{r_{AD}}{r_{DB}}. \quad (1)$$

На основании второго закона Кирхгофа для любого замкнутого контура сумма падений напряжений равна сумме электродвижущих сил:

Запишем эти условия при равновесии моста для контуров AED и EBD :

$$I_1 R - I_2 r_{AD} = 0 \quad \Rightarrow \quad I_1 R = I_2 r_{AD}$$

$$I_1 R_x - I_2 r_{DB} = 0 \quad \Rightarrow \quad I_1 R_x = I_2 r_{DB}$$

Разделив первое равенство на второе, получим условие (1).

Так как сопротивления участков AD и DB пропорциональны их длинам l_1 и l_2 (см. формулу (9)), то $R_x = R \frac{l_1}{l_2}$. Если длина всего реохорда l , то $l_2 = l - l_1$ и тогда

$$R_x = R \frac{l_1}{l - l_1}. \quad (2)$$

Эта формула является расчетной при выполнении лабораторной работы.

Так как сопротивление реохорда сравнительно невелико, то мостик Уитстона описанного типа применяется, как правило, для измерения небольших сопротивлений (от 1 до 100 Ом).

Найдем относительную погрешность измерений. Прологарифмируем (2)

$$\ln R_x = \ln R + \ln l - \ln (l - l_1).$$

Дифференцируем и меняем «минусы» на «плюсы», дифференциалы заменяем на приращения:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta l_1}{l_1} + \frac{\Delta l_1}{l - l_1}. \quad (3)$$

Найдем условие, при котором относительная погрешность будет минимальной. Приведем (16) к общему знаменателю.

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot \Delta R \cdot l_1 (l_1 - l) + \Delta R \cdot l_1 (\Delta l_1 - \Delta l_1)}{R \cdot l_1 (l_1 - l)}.$$

Относительная погрешность будет минимальной, когда знаменатель будет максимальным. Найдем условие максимума знаменателя. Обозначим знаменатель как функцию $f(l_1) = R \cdot l_1 (l - l_1)$. Найдем максимум этой функции:

$$\frac{df(l_1)}{dl_1} = Rl - 2Rl_1 = 0 \Rightarrow l_1 = \frac{l}{2}.$$

Погрешность будет минимальной, когда при нулевых показаниях гальванометра ползунок будет находиться на середине реохорда.

Описание установки

В лабораторной установке используются два магазина сопротивлений. На магазине, установленном слева (рис.2), всего два резистора: $R_1 = 10$ Ом и $R_1 = 20$ Ом. С помощью штекера, вставляемого в гнезда «1» или «2» можно устанавливать три значения эталонных сопротивления: $R_1 = 10$ Ом, $R_2 = 20$ Ом, $R_3 = 30$ Ом.

Второй магазин сопротивлений (рис.3) такого же типа. В нем также установлено два резистора R_{x1} и R_{x2} значения которых необходимо измерить. С помощью двух штекеров, вставляемых в гнезда («1» – «5»), к выходным клеммам

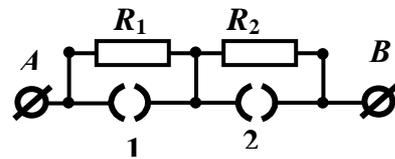


Рис. 2

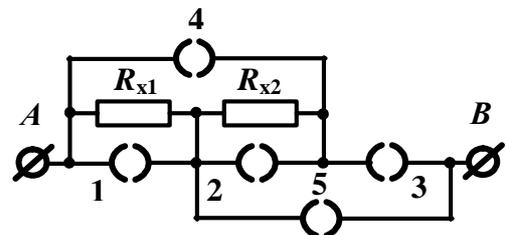


Рис. 3

(А, В) этого магазина можно подключать либо резистор R_{x1} или R_{x2} , либо их последовательное или параллельное соединение. В схеме коммутации резисторов разобраться самостоятельно.

Порядок выполнения работы.

Подготовить таблицу измерений.

	l_1	$l_2=l-l_1$	$R_{эт}$	R_{x1}	$\langle R_{x1} \rangle$	ΔR_{x1}	$\langle \Delta R_{x1} \rangle$	$R_{x1}=\langle R_{x1} \rangle \pm \langle \Delta R_{x1} \rangle$
1			10					
2			20					
3			30					
	l_1	$l_2=l-l_1$	$R_{эт}$	R_{x2}	$\langle R_{x2} \rangle$	ΔR_{x2}	$\langle \Delta R_{x2} \rangle$	$R_{x2}=\langle R_{x2} \rangle \pm \langle \Delta R_{x2} \rangle$
1			10					
2			20					
3			30					
	l_1	$l_2=l-l_1$	$R_{эт}$	$R_{пос}$	$\langle R_{пос} \rangle$	$\Delta R_{пос}$	$\langle \Delta R_{пос} \rangle$	$R_{пос}=\langle R_{пос} \rangle \pm \langle \Delta R_{пос} \rangle$
1			10					
2			20					
3			30					
	l_1	$l_2=l-l_1$	$R_{эт}$	$R_{пар}$	$\langle R_{пар} \rangle$	$\Delta R_{пар}$	$\langle \Delta R_{пар} \rangle$	$R_{пар}=\langle R_{пар} \rangle \pm \langle \Delta R_{пар} \rangle$
1			10					
2			20					
3			30					

Каждый резистор измеряется при трех значениях эталонных сопротивлений.

1. Установить на магазине эталонных сопротивлений (правом) $R_1 = 10$ Ом. (Вставить штекер в гнездо «2»).
2. С помощью двух штекеров установить на левом магазине R_{x1} , вставив штекеры в гнезда «2» и «3».
3. Передвигая движок реохорда добиться нулевых показаний гальванометра. В случае, когда гальванометр показывает «нуль» наступает баланс моста.
4. При условии баланса моста занести значения l_1 и l_2 в таблицу. Значение $l_2 = l - l_1$. В нашей установке реохорд имеет длину $l = 0,475$ м.
5. Установить второй эталонный резистор $R_2 = 20$ Ом. На правом магазине установить штекер в гнездо «1» и проделать указания пунктов 2-4.
6. Установить эталонный резистор $R_3 = 30$ Ом. Штекер не используется. Проделать указания пунктов 2-4.
7. Установить второй измеряемый резистор R_{x2} , находящийся в правом магазине, вставив штекеры в гнезда «1» и «3». Проделать указания пунктов 3-6.

8. Соединить резисторы R_{x1} и R_{x2} последовательно. (При последовательном соединении используется только один штекер. Вставить его в гнездо «3»).

Проделать указания пунктов 3-6.

9. С помощью двух штекеров соединить резисторы R_{x1} и R_{x2} параллельно. (Вставить штекеры в гнезда «4» и «5»). Проделать указания пунктов 3-6.

10. Используя формулу (15) рассчитать значения сопротивлений всех измеренных резисторов и занести в таблицу.

11. Найти средние значения вычисленных величин.

12. Вычислить погрешности отдельных измерений ΔR_{xi} и занести в таблицу.

13. Вычислить средние арифметические погрешности измерений $\langle \Delta R_{xi} \rangle$.

14. Проверяют формулы для последовательного и параллельного соединения проводников.

$$R_{\text{пос}} = R_{x1} + R_{x2}. \quad (18)$$

$$\frac{1}{R_{\text{пар}}} = \frac{1}{R_{x1}} + \frac{1}{R_{x2}}. \quad (19)$$

Последнюю формулу, в случае двух сопротивлений, можно представить в виде:

$$R_{\text{пар}} = \frac{R_{x1} \cdot R_{x2}}{R_{x1} + R_{x2}}. \quad (20)$$

15. Сравните со значениями полученными экспериментально и сделайте выводы.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение понятий: сила тока, плотность тока, напряжение, ЭДС.
2. Сформулируйте закон Ома в дифференциальной и интегральной форме.
3. По какой формуле определяется сопротивление проводника постоянного сечения. Какие величины входят в эту формулу?
4. Запишите закон Ома для замкнутой цепи.
5. Сформулируйте правила Кирхгофа.
6. Нарисуйте схему экспериментальной установки и объясните принцип ее работы.
7. Выведите условие баланса моста.
8. Выведите формулу (15).
9. Получите условие, при котором относительная погрешность измерений сопротивлений будет минимальной.
10. Объясните порядок выполнения работы.
11. Выведите формулы для последовательного и параллельного соединения проводников
12. В каких единицах в системе СИ измеряются: электрический заряд, сила тока, плотность тока, сопротивление, проводимость, разность потенциалов, напряжение, ЭДС, энергия, работа, теплота.

Лабораторная работа №4 Исследование электровакуумного триода

Цель работы: Изучить приборы, работающие на основе явления термоэлектронной эмиссии. Экспериментально определить параметры электровакуумного триода.

Приборы и принадлежности: Установка для снятия параметров электровакуумного триода.

Краткое теоретическое введение

1. Термоэлектронная эмиссия

Для вырывания электрона из металла нужно совершить определенную работу A , называемую *работой выхода*.

Происхождение сил, действующих на электроны и направленных внутрь металла, можно объяснить двумя причинами. Первая заключается в индукционном действии удаленного из металла электрона, который вызывает на поверхности металла индуцированный заряд противоположного знака. Поэтому между электроном и металлом возникают силы притяжения.

Вторая причина заключается в том, что некоторые из свободных электронов, в результате теплового движения, могут выйти за поверхность металла, образуя электронное облако, которое препятствует дальнейшему выходу электронов.

При комнатных температурах лишь ничтожная часть электронов внутри металла имеет достаточный запас кинетической энергии, чтобы вырваться наружу. По мере повышения температуры число быстрых электронов возрастает, благодаря чему возрастает и число электронов, вырывающихся из металла. При достаточно высокой температуре наступает заметное испускание электронов металлом. Это явление носит название *термоэлектронной эмиссии*. Термоэлектронная эмиссия лежит в основе устройства электронных ламп.

2. Электровакуумный диод

Устройство простейшей электронной лампы, содержит всего два электрода (рис. 1). В стеклянный баллон, из которого выкачан воздух до давления порядка 10^{-5} мм рт. ст. впаяно три металлических электрода: катод K в виде тонкой трубочки, который нагревается с помощью нити накала H и анода A , выполненный обычно в форме цилиндра.

Катод K нагревается. Электрод K соединен с отрицательным полюсом анодной батареи, электрод A — с положительным. Электрическое поле, образующееся между катодом и анодом, ускоряет электроны, вылетающие из катода при его нагревании. Через лампу пойдет ток I_a , называемый анодным. Опыт показывает, что сила тока зависит от температуры катода и от напряжения между катодом и анодом (U_a). Эта зависимость не выражается законом Ома, а носит более

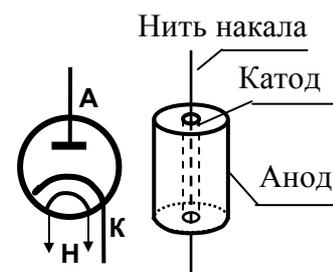


Рис. 1

сложный характер и подчиняется закону Богуславского—Ленгмюра (закон «трех вторых»).

$$I_a = \alpha U_a^{3/2} \quad (1)$$

3. Электровакуумный триод

Устройство триода показано на рис. 2. Цифрами обозначены: 1 – катод, 2 – управляющая сетка, 5 – анод.

Триод отличается от диода тем, что между катодом и анодом находится металлическая сетка. Между сеткой и катодом приложено напряжение (U_c), которое называется *сеточным*. Изменение потенциала на сетке оказывает большее влияние на анодный ток, чем такое же изменение потенциала на аноде, так как сетка находится гораздо ближе к катоду, чем к аноду. Если к сетке приложить небольшое отрицательное напряжение относительно катода, то анодный ток уменьшится. При некотором отрицательном значении потенциала сетки число электронов, пролетающих сквозь сетку к аноду становится незначительным и поэтому анодный ток практически равен нулю. В этом случае говорят, что *лампа заперта*. Кривая, показывающая зависимость I_a от U_c при $U_a = \text{const}$, изображена на рис. 3. Она называется сеточной характеристикой. Для различных U_a запирающий потенциал U_3 будет различным. Он тем больше, чем выше U_a . Поэтому для каждого U_a мы имеем другую сеточную характеристику. Сетка позволяет управлять режимом работы лампы. Ее называют поэтому *управляющей сеткой*.

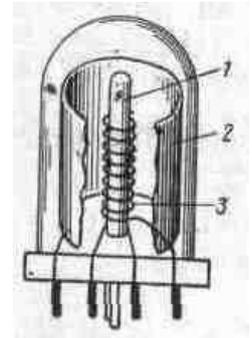


Рис. 2

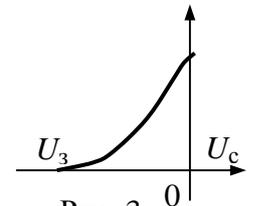


Рис. 3

4. Параметры электровакуумного триода

Параметрами электродной лампы называются величины, определяющие ее свойства и пригодность для тех или иных целей.

Анодный ток I_a трехэлектродной лампы является функцией двух переменных: анодного напряжения U_a и сеточного напряжения U_c , поэтому полный дифференциал анодного тока I_a равен

$$dI_a = \left(\frac{\partial I_a}{\partial U_a} \right) dU_a + \left(\frac{\partial I_a}{\partial U_c} \right) dU_c. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что изменение анодного тока может быть вызвано как изменением анодного dU_a , так и сеточного dU_c напряжений.

1. Величина $R_i = \left(\frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right)_{U_c = \text{const}}$ – называется *дифференциальным внутренним сопротивлением* лампы.

Внутреннее сопротивление R_i показывает на сколько вольт надо изменить напряжение на аноде лампы, чтобы ее анодный ток изменился на 1 ма при неизменном напряжении на управляющей сетке.

2. Крутизна сеточной характеристики $S = \left(\frac{\partial I_a}{\partial U_c} \right)_{U_a = \text{const}}$ – показывает на

сколько миллиампер изменяется анодный ток при изменении потенциала сетки на 1В, если анодное напряжение постоянное.

3. Коэффициент усиления $\mu = \frac{\partial U_a}{\partial U_c}$ представляет собой отно-

шение анодного напряжения к сеточному. Очевидно, что

$$\mu = S \cdot R_a.$$

Все три параметра имеют смысл только при работе лампы на линейных наклонных участках характеристик. На сеточных характеристиках эти участки лежат в области отрицательных значений сеточного напряжения, поэтому характеристики называются «левыми».

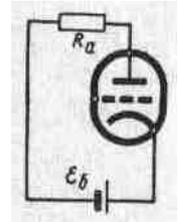


Рис. 4

Рассмотренные основные параметры лампы относятся к статическому режиму, т. е. к такому, когда нагрузочное сопротивление в цепи анода отсутствует. Их называют поэтому *статическими параметрами*. В радиоаппаратуре в анодные цепи обычно включены нагрузочные сопротивления R_a (рис. 4). В этом случае режим лампы и ее параметры называются *динамическими*. В динамическом режиме анодное напряжение меньше, чем напряжение анодной батареи, так как часть напряжения падает на нагрузочном сопротивлении.

В данной работе для исследования трех-электродных ламп применяется установка, принципиальная схема которой изображена на рис. 5.

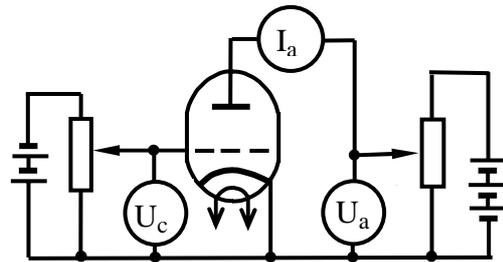


Рис. 5

Экспериментальная часть

Опыт 1: Снятие сеточных характеристик

1. Подготовить таблицу
2. Снимают сеточные характеристики для трех постоянных значений анодного напряжения, изменяя U_c через каждые 0,5 В.
3. Строят три сеточных характеристики, откладывая по оси x значения U_c в вольтах, а по оси y значения I_a в миллиамперах.

$U_{a3} = 100 \text{ В}$		$U_{a2} = 80 \text{ В}$		$U_{a1} = 60 \text{ В}$	
U_c	I_a	U_c	I_a	U_c	I_a
-4		-4		-4	
-3,5		-3,5		-3,5	
-3		-3		-3	
-2,5		-2,5		-2,5	
-2		-2		-2	
-1,5		-1,5		-1,5	
-1		-1		-1	
-0,5		-0,5		-0,5	
0		0		0	

Опыт 2: *Определение параметров трехэлектродной лампы*

По двум сеточным характеристикам можно определить параметры лампы. Пусть одна из характеристик снята при анодном напряжении $U_a = 100 \text{ В}$, а другая — при $U_a = 80 \text{ В}$. В области линейных участков этих характеристик строим треугольник ABC (рис. 6), где катет AB проводим параллельно оси абсцисс, а катет BC — параллельно оси ординат. Обозначим абсциссы точек A, B, C соответственно a, b, c , а ординаты этих точек d, c .

1. Определение крутизны характеристики

Рассмотрим «левую» характеристику, снятую при $U = 100 \text{ В}$. Если напряжение на сетке U_c возрастает от a до b , то I_a увеличивается от c до d . Значит $U_a = \text{const}$.

$$\Delta U_c = b - a, \quad \Delta I_a = c - d, \quad S = \left(\frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \right)_{U_a = \text{const}} = \frac{c - d}{b - a} \frac{\text{мА}}{\text{В}}.$$

2. Определение внутреннего сопротивления

Точки B и C принадлежат к различным характеристикам, но сняты при одном и том же потенциале на сетке. Ординаты точек B и C показывают силы тока соответственно при $U_a = 100 \text{ В}$ и $U_a = 80 \text{ В}$. Так как для этих точек $\Delta U_c = 0$, то увеличение силы тока от d до c обусловлено только изменением анодного потенциала:

$$R_i = \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \right)_{U_c = \text{const}} = \frac{100 - 80}{c - d}.$$

3. Определение коэффициента усиления

Изменить силу тока от d до c можно двумя путями: 1) увеличивая U_c от a до b при $U_a = 100 \text{ В}$, 2) увеличивая U_a от 80 В до 100 В при $U_c = \text{const}$.

Отношение ΔU_a к ΔU_c , дающих одинаковое изменение силы тока

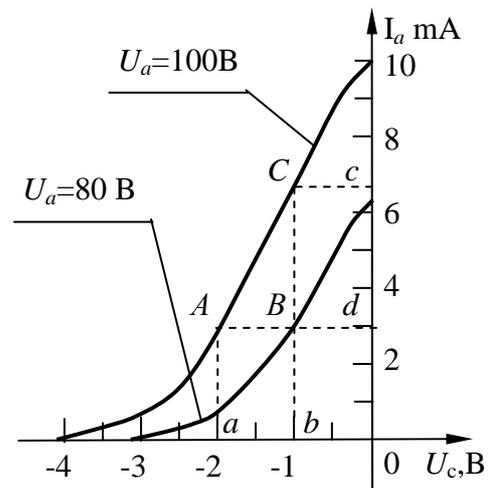


Рис. 6

$$\Delta I_a = c - d, \text{ есть коэффициент усиления } \mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} = \frac{100 - 80}{b - a}.$$

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление термоэлектронной эмиссии?
2. Расскажите устройство электровакуумного диода.
3. Расскажите устройство электровакуумного триода. Каково назначение различных электродов?
4. Какими параметрами характеризуется работа триода? Объясните их физический смысл
5. Каким образом связаны параметры триода?
6. Как определяются параметры электровакуумного триода по сеточным характеристикам?
7. Объясните порядок выполнения работы?

Лабораторная работа №5 Изучение работы осциллографа

Цель работы: ознакомление с устройством электронно – лучевого осциллографа, с принципом устройства его функциональных узлов; применение осциллографа в качестве контрольно – измерительного прибора.

Приборы и принадлежности: электронно – лучевой осциллограф, исследуемые макеты выпрямителя и генератора релаксационных колебаний.

Краткое теоретическое введение

Электронно – лучевой осциллограф является универсальным прибором, он предназначен для визуального наблюдения, контроля и измерения параметров электрических сигналов. Основными узлами осциллографа являются: электронно – лучевая трубка, усилители вертикального и горизонтального отклонения, генератор развертки, узел развертки и узел питания. Исследуемый сигнал подается на вход усилителя вертикального отклонения (рис. 1), с выхода которого усиленный в несколько раз он подается на вертикально отклоняющие пластины электронно – лучевой трубки. На другую пару отклоняющих пластин поступает сигнал с внутреннего или внешнего (вход X) генератора развертки при соответствующем положении переключателя П.

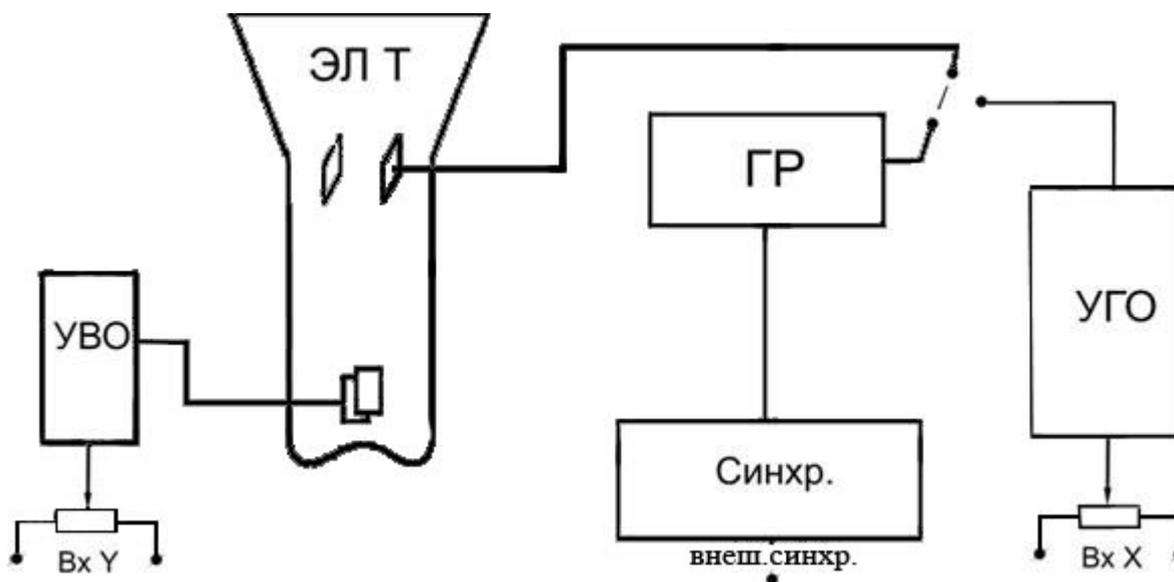


Рис. 1

Назначение и принцип работы функциональных узлов осциллографа

1. Электронно – лучевая трубка (ЭЛТ) предназначена для визуального наблюдения исследуемых электрических сигналов.

2. Усилители вертикального (УВО) и горизонтального (УГО) отклонения выполнены по одной схеме и служат для получения большого смещения электронного луча, т. е. позволяют исследовать слабые сигналы.

В осциллографе имеется возможность отключения усилителей и подачи сигналов непосредственно на отклоняющие пластины. Выключатели усилителей и выводы отклоняющих пластин расположены на задней стенке прибора.

3. Генератор развертки луча (ГР). Для наблюдения и измерения параметров сигнал, поданный на одну пару отклоняющих пластин, необходимо развернуть во времени. Развертка осуществляется подачей напряжения эталонной частоты и формы на другую пару отклоняющих пластин. В большинстве случаев требуется линейная развертка, т. е. равномерное перемещение электронного луча по экрану ЭЛТ, поэтому внутренний генератор развертки периодически вырабатывает линейно возрастающее напряжение или так называемые пилообразные колебания (рис. 2), частота которых может меняться в широких пределах. В течение времени τ_1 , когда напряжение на отклоняющих пластинах линейно возрастает, электронный луч равномерно и достаточно медленно перемещается по экрану ЭЛТ слева направо. Это прямой ход луча. В первоначальное положение на экране луч перемещается за время τ_2 обратного хода, при этом происходит быстрый спад напряжения на отклоняющих пластинах. При необходимости вместо внутреннего генератора развертки используют внешний, который в зависимости от требований может вырабатывать пилообразные, треугольные, прямоугольные, синусоидальные и т. п. колебания.

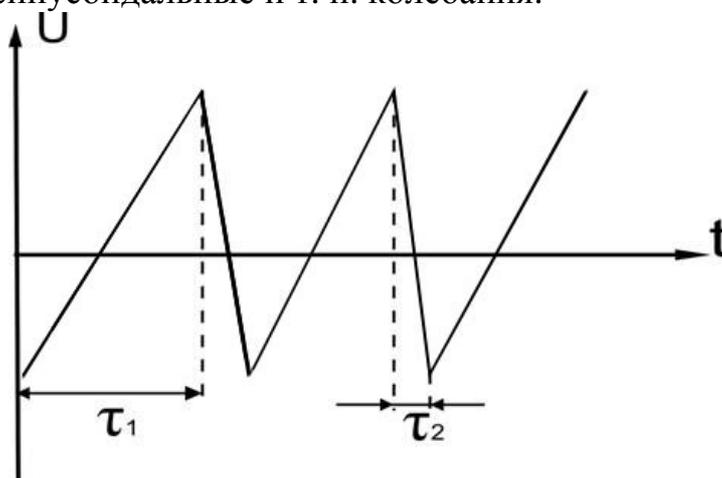


Рис. 2

Внутренний генератор развертки может работать в различных режимах. Для наблюдения периодических синусоидальных напряжений служит непрерывная (автоколебательная) развертка. Процессы же переходные, повторяющиеся через неодинаковые промежутки времени, или имеющие вид коротких периодических, либо однократных импульсов не удастся исследовать визуально при помощи повторяющейся пилообразной развертки.

Чтобы наблюдать короткие импульсы, как периодические, так и непериодические, длительность развертки должна быть несколько больше длительности исследуемого сигнала. Подобные развертки называются ждущими или однократными. Генераторы ждущей развертки собираются на основе схем генера-

торов пилообразного напряжения с той лишь разницей, что они приводятся в действие при помощи внешнего запускающего сигнала. Под действием этого сигнала генератор ждущей развертки вырабатывает один пилообразный импульс. По прекращении действия запускающего импульса генератор возвращается в состояние до подачи следующего запускающего импульса. Ждущая развертка характеризуется тем, что скорость изменения пилообразного напряжения можно регулировать совершенно независимо от частоты исследуемого сигнала. Весьма часто запуск генератора ждущей развертки производится самим исследуемым сигналом.

4. Узел синхронизации развертки электронного луча вырабатывает сигналы, управляющие работой генератора. В положении переключателя развертки “Внутренняя синхронизация” синхроимпульсы выделяются узлом синхронизации из исследуемого сигнала. При желании запуск генератора развертки может быть осуществлен от внешнего генератора импульсов или сети (50 Гц). Нормальная работа узла синхронизации обеспечивает неподвижное изображение исследуемого сигнала на экране ЭЛТ.

5. Узел питания преобразует напряжение сети переменного тока в напряжение, необходимое для питания накальных, анодных и сеточных цепей электронных ламп и высокого постоянного напряжения для питания электронно – лучевой трубки.

На лицевую панель осциллографа вынесены основные ручки управления: выключатель узла питания (тумблер “Сеть”), ручки регулировки яркости и четкости изображения (“Яркость”, “Фокус”); центровка изображения (ручки смещения луча “Вниз - Вверх” и “Влево - Вправо”); регулировка амплитуды исследуемого сигнала и временного масштаба (“Усиление Y”, “Усиление X”, “Ослабление Y”, “Ослабление X”); регулировка длительности развертки и синхронизация изображения (“Развертка сек”, “Частота плавно”, “Вид развертки”, “Амплитуда синхронизации” и переключатель “Внутренняя, внешняя синхронизация”); переключатели масштабных меток горизонтальной развертки (“Метки”) и контрольного сигнала (“Вык. РП, К”).

Кроме этих ручек на лицевую панель выведены входные клеммы усилителей вертикального и горизонтального отклонения (“ $V_x Y$ ” и “ $V_x X$ ”) и внешнего генератора синхроимпульсов (“Синхр.”). Для лучшей видимости масштабной сетки на экране ЭЛТ служит ручка “Подсвет”.

Принцип работы выпрямителя

Выпрямительное действие полупроводникового или лампового диода объясняется его односторонней проводимостью. Подавая на анод диода положительный по отношению к катоду потенциал, получим возрастание тока через диод D на нагрузочном сопротивлении R при увеличении приложенного напряжения. Если же на анод диода подать отрицательный по отношению к катоду потенциал, то диод окажется “запертым” и ток через него будет практически равен нулю. Подключение параллельно нагрузочному сопротивлению R кон-

денсатора C позволяет “сгладить” пульсации тока в резисторе за счет наполненной в конденсаторе энергии. Простейшая схема однополупериодного выпрямителя и графики, поясняющие его работу, приведены на рис. 3.

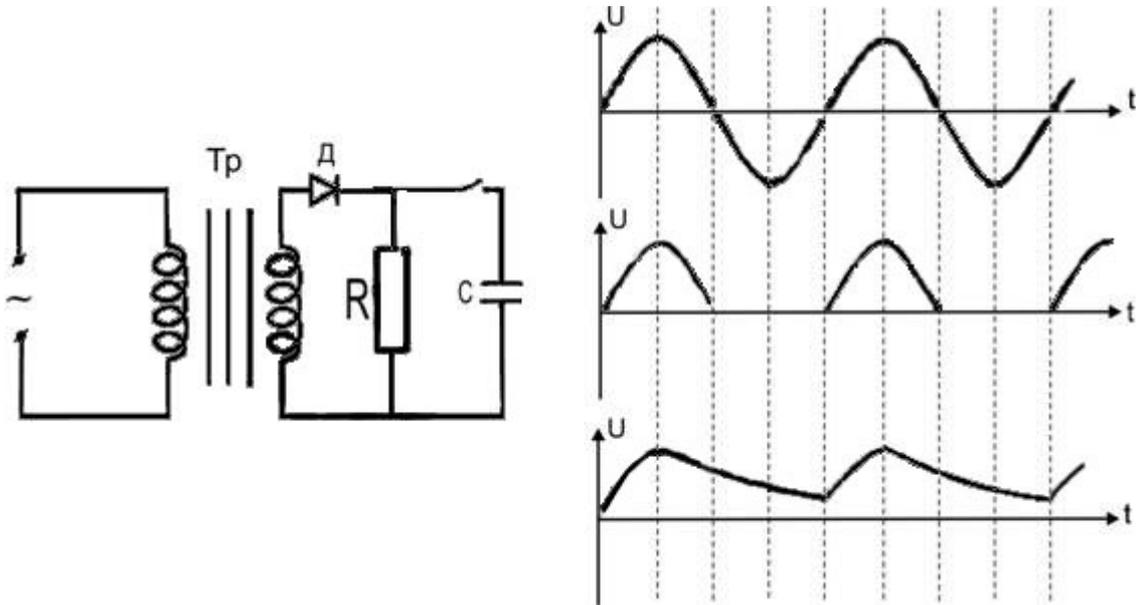


Рис. 3

Трансформатор Tr служит для понижения исследуемого напряжения. Ко вторичной обмотке трансформатора подключен выпрямительный диод и нагрузочное сопротивление. Из графиков (рис. 3), поясняющих работу выпрямительного диода видно, что во время положительного полупериода на анод диода подается положительный потенциал и через нагрузочное сопротивление R течет ток. На концах этого сопротивления по закону Ома ($I = U/R$) будет падение напряжения, форму которого может наблюдать на экране осциллографа. Во время отрицательного полупериода диод “заперт” и линия тока (напряжение на сопротивлении) проходит по нулевой линии. На нагрузочном сопротивлении наблюдаем всплески напряжения, т. е. пульсации.

При включении параллельно резистору R емкости C на экране ЭЛТ будет наблюдаться нижняя кривая (рис. 3). Сглаживающее действие этого “емкостного” фильтра будет зависеть от величин емкости C , сопротивления R и частоты ω , но характер изменения тока в сопротивлении останется прежним.

Принцип работы генератора релаксационных колебаний

Простейший генератор релаксационных колебаний (рис. 4) состоит из неоновой лампы НЛ, зарядного конденсатора C и резистора R . Конденсатор и неоновая лампа, соединенные параллельно, через сопротивление R подсоединены к источнику постоянного тока.

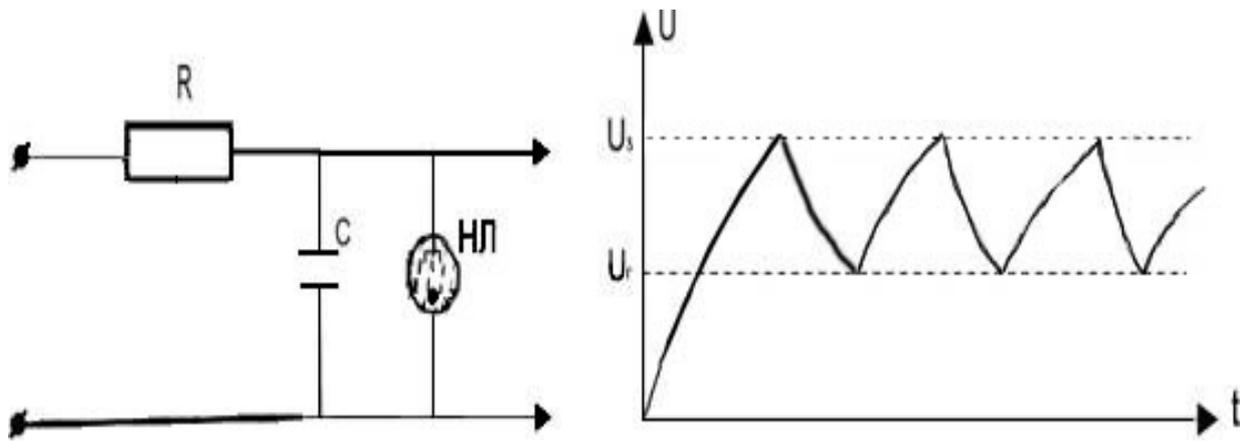


Рис.4

Начиная с момента включения, конденсатор C медленно заряжается от источника тока через сопротивление R по экспоненциальному закону до напряжения U_3 . При достижении этого напряжения (напряжение зажигания неоновой лампы) в лампе возникает ионный разряд (процесс лавинообразной ионизации неона). Сопротивление лампы резко уменьшается и конденсатор C быстро разряжается через нее до напряжения лампы U_1 . Лампа гаснет. Резистор R ограничивает ток, протекающий от источника питания, и не дает возможности поддерживать разряд в лампе: лампа гаснет. Это условие будет соблюдаться в том случае, если сопротивление самой лампы при ее горении будет значительно меньше сопротивления R , т. е. $R_{л} \ll R$, в противном случае ток заряда будет равен или больше тока разряда и генератор работать не будет. Процесс заряда и разряда конденсатора будет периодически повторяться. График изменения напряжения на конденсаторе, а соответственно и на неоновой лампе показан на этом же рисунке.

Время заряда τ конденсатора C через сопротивление R (так называемое время релаксации) будет зависеть от величин C и R и от величины напряжения источника питания. Необходимое условие: напряжение источника тока питания должно быть больше напряжения зажигания неоновой лампы.

$$\tau = K \cdot R \cdot C$$

В работе используются действующие макеты блока питания (рис. 5) и генератора пилообразных (релаксационных) колебаний (рис. 4), позволяющие исследовать их работу, просматривая сигналы с помощью осциллографа в различных участках схемы. Для устойчивой синхронизации генератора развертки осциллографа в схеме (рис. 5) используется диод D .

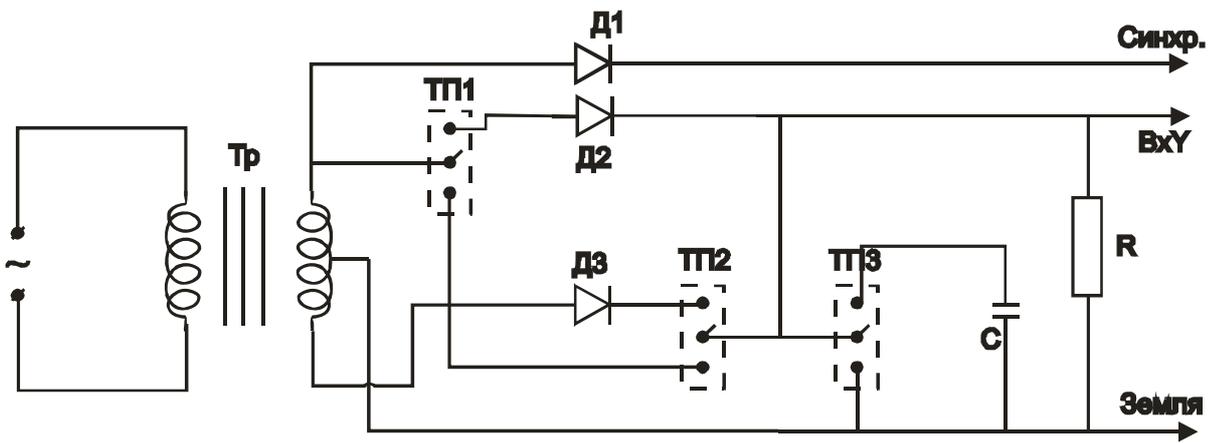


Рис. 5

Экспериментальная часть

Опыт 1: Изучение работы осциллографа

1. Собирают схему с макетом блока питания согласно рис. 6. Тумблер “Синхронизация” на панели осциллографа устанавливают в положение “Внешняя синхронизация”.
2. Ручку регулировки усиления Y устанавливают в крайнее левое положение. Регулируя вертикальное и горизонтальное смещение электронного луча, устанавливают линию развертки по центру экрана. После этого устанавливают желаемое усиление.
3. Наблюдают на экране осциллографа кривые напряжения:
 - а) переменного тока (тумблеры ТП 1, ТП 2, ТП 3 в положении ВЫКЛ.)
 - б) однополупериодного выпрямления (тумблер ТП 1 или ТП 2 в положении ВКЛ., остальные – ВЫКЛ.)
 - в) двухполупериодного выпрямления (тумблер ТП 1, ТП 2 в положении ВКЛ., ТП 3 – ВЫКЛ.)
 - г) однополупериодного выпрямления с C – фильтром (тумблеры ТП 1 или ТП 2 и ТП 3 в положении ВКЛ., тумблер ТП 2 или ТП 1 – ВЫКЛ.)
 - д) двухполупериодного выпрямления с C – фильтром (тумблеры ТП 1, ТП 2, ТП 3 в положении ВКЛ.)

При переключении тумблеров на макете высвечивается схема соединений диодов. D_1 и D_2 , конденсатора C и резистора R . Нижняя клемма на макете соответствует средней точке вторичной обмотки трансформатора.

4. Все наблюдаемые кривые зарисовываются в одном временном масштабе. Для получения неподвижной картины на экране осциллографа необходимо установить величину амплитуды синхронизации поворотом ручки “Амплитуда синхронизации”.

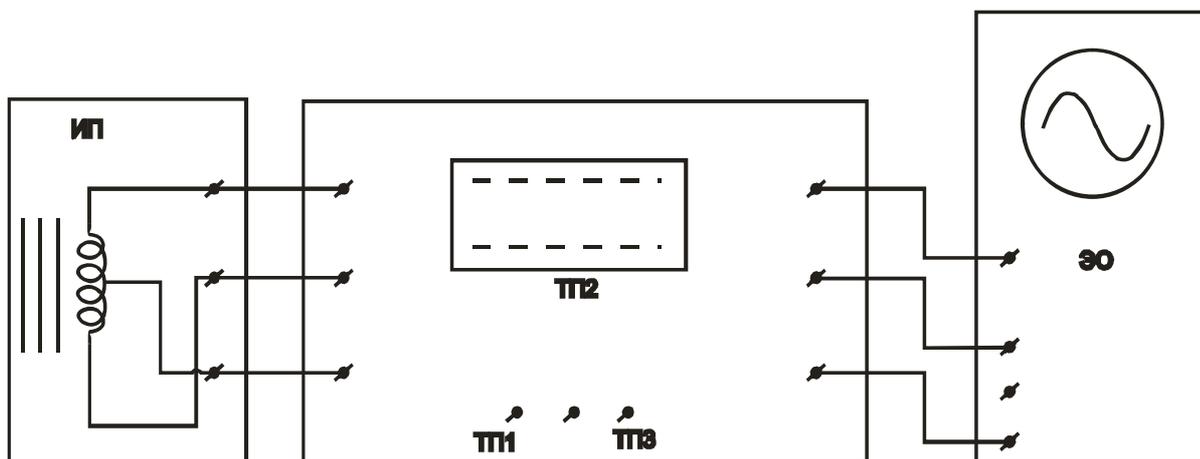


Рис. 6

Опыт 2: Изучение работы генератора релаксационных колебаний

1. Собирают схему с макетом генератора релаксационных колебаний согласно рис. 7.

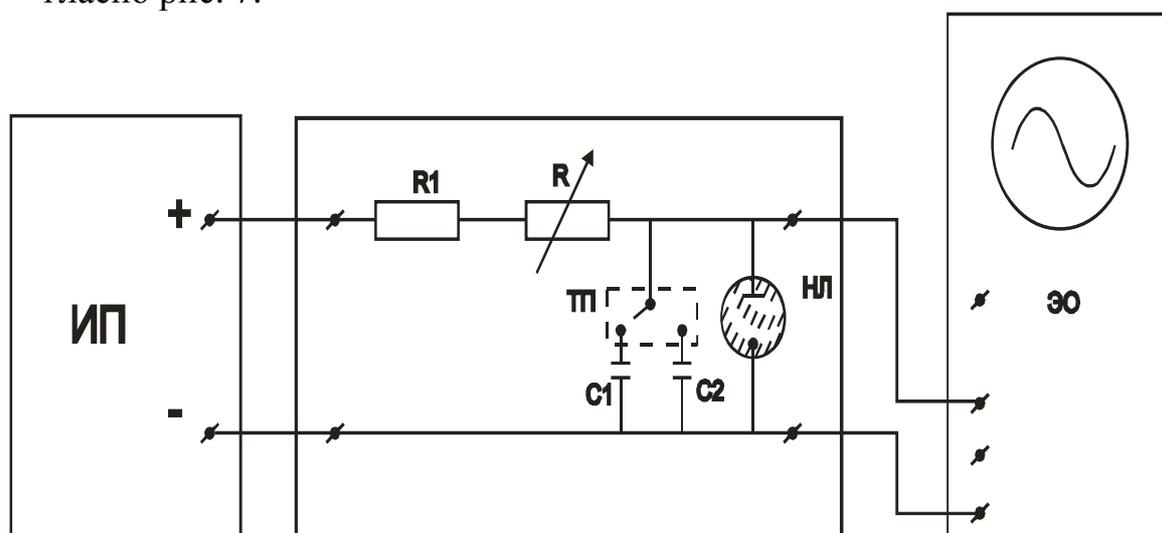


Рис. 7

2. Наблюдают на экране осциллографа релаксационные колебания и их зависимость от величины сопротивления зарядного резистора. В крайнем левом положении движка резистора R его сопротивление равно нулю, а в крайнем правом равно R_1 .
3. Тумблером ПП переключают емкость зарядного конденсатора и выполняют пункт 2.
4. По формуле $\tau = K \cdot R \cdot C$ определяют величину емкости конденсатора (емкость одного из них известна). При постоянном напряжении источника питания коэффициент K в формуле считать неизменным.
5. Зарисовать наблюдаемые кривые в одном временном масштабе.

Примечание: 1. Для получения неподвижного изображения пилообразных колебаний тумблер “Синхронизация” установить в положение “Внутренняя синхр.”, а “Вид развертки” в положение “ \square ”.

2. Положение нулевой линии можно определить, если при отключенном входном сигнале замкнуть проводником входные клеммы (для устранения наводок).

Опыт 3: *Определение потенциалов зажигания и гашения неоновой лампы*

Для выполнения этого опыта необходимо определить цену деления измерительной сетки электронно – лучевой трубки осциллографа по вертикали. Для этого переключатель контрольного сигнала “Выкл. РП.К.” на лицевой панели осциллографа установить в положение “К”. Переключатель “Ослабление Y” – в положение 1:1 или 1:10. Ручкой “Усиление Y” добиться желаемого размаха контрольного сигнала на экране ЭЛТ по вертикали. Разность потенциалов между нижней и верхней границам (размах) контрольного сигнала равна 1 Вольту. Подсчитав число клеток (делений), занимаемых сигналом по вертикали, определяют цену одного деления (клетки)

$$C = \frac{1}{N}, \quad \text{где } N \text{ – число делений.}$$

После определения цены деления ручку “Усиление Y” не вращать! Переключателе “Ослабление Y” можно изменять цену деления сетки с кратностью “10” в зависимости от положения (1:1, 1:10, 1:100).

Прежде чем подключать к входным клеммам осциллографа исследуемый сигнал переключатель контрольного сигнала установить в положение “Выкл.”.

1. Подключают выход генератора релаксационных колебаний ко входу “Y=” (рис. 7) и с помощью переключателя “Ослабление Y” получают изображение пилообразных колебаний. Если изображение уходит за пределы экрана установить для измерительной сетки другую цену деления.
2. Подставив число делений (клеток) от нулевой линии до нижней границы пилообразных колебаний, находят потенциал гашения неоновой лампы.

$$U_r = C \cdot N \cdot A,$$

где A – соотношение коэффициентов ослабления для положений при которых определялась цена деления и наблюдается исследуемая кривая.

3. Подсчитав число делений от нулевой линии до верхней границы исследуемого сигнала, определяют потенциал зажигания неоновой лампы.
4. Находят размах пилообразного колебания как разность между потенциалами зажигания U_z и гашения U_r лампы.
5. Не изменяя положения ручки “Усиление Y”, смещают изображение “пилы” в центральную часть экрана и еще раз определяют размах непосредственно по числу делений (учитывая множитель A и цену деления C). Сравнивают полученные результаты.

Опыт4: *Определение длительности сигнала*

1. Получают на экране осциллографа неподвижное изображение исследуемой кривой.
2. Переключатель “Метки” устанавливают в такое положение, при котором на экране видны не менее двух меток. Ручку “Усиление Y” при этом можно поставить в левое крайнее положение. Расстояние между соседними метками во временном масштабе соответствует числу, стоящему против указателя переключателя “Метки”, выраженному в долях секунды.
3. Подсчитывают число делений (клеток) между соседними метками и находят цену деления сетки по горизонтали. Ручку “Усиление X” и переключатель “Ослабление X” не вращать!
4. Ручку “Усиление Y” устанавливают в исходное положение и подсчитывают число клеток по горизонтали, соответствующее длительности сигнала. Умножая на цену деления находят длительность сигнала (в секундах).

Контрольные вопросы:

1. Из каких основных узлов состоит электронный осциллограф? Каково их назначение?
2. Объясните устройство и принцип действия электронно – лучевой трубки.
3. От каких факторов зависит чувствительность электронно – лучевой трубки?
4. Расскажите о работе выпрямителя и объясните вид кривых, полученные Вами при выполнении работы.
5. Расскажите о работе генератора релаксационных колебаний и объясните кривые, полученные Вами при выполнении работы.
6. Как определить цену деления масштабной сетки электронно – лучевой трубки и от каких факторов она зависит?

Лабораторная работа №6

Экспериментальное определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли

Цель работы: Изучить законы электромагнетизма. Измерить горизонтальную составляющую напряженности магнитного поля Земли.

Приборы и принадлежности: Установка для измерения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

Краткое теоретическое введение

Ампер установил, что два параллельных проводника с током взаимодействуют друг с другом с силой

$$f = k \frac{2I_1 I_2}{b}.$$

В рационализированной форме этот закон записывается следующим образом:

$$f = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{b}, \quad \text{где } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$$

На основании закона Ампера устанавливается единица силы тока в системе СИ.

Магнитное поле

Вокруг проводников с током возникает магнитное поле. Для экспериментального исследования этого поля используют *пробный контур* с током. Внеся пробный контур в магнитное поле, мы обнаружим, что поле оказывает на него ориентирующее действие. Его нормаль устанавливается в определенном направлении. Это направление принимается за направление поля в данной точке. Если контур повернуть так, чтобы направление поля и нормали не совпадали, возникнет вращательный момент. Величина момента вращения зависит от угла между нормалью и направлением поля, достигая наибольшего значения M_{\max} при $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Вращательный момент зависит от силы тока в контуре и площади контура и не зависит от его формы. Действие магнитного поля на контур определяется величиной $p_m = I \cdot S$, которую называют *магнитным моментом контура*.

На пробные контуры, отличающиеся значением p_m , действуют в данной точке различные вращательные моменты M_{\max} . Однако отношение $\frac{M_{\max}}{p_m}$ будет одинаково для всех контуров. Эта величина и принята за количественную характеристику поля в данной точке. Физическую величину B определяемую выражением:

$$B = \frac{M_{\max}}{p_m}, \quad \text{называют магнитной индукцией в данной точке поля.}$$

Единицей магнитной индукции в системе СИ является *тесла*.

Поле вектора \vec{B} можно представить с помощью линий магнитной индукции.

Закон Био-Савара-Лапласа

Ж. Био (1774 – 1862) и Ф. Савар (1791 – 1841) провели исследование магнитных полей, создаваемых проводниками различной формы по которым протекают токи. П. Лаплас (1749 – 1827) проанализировал экспериментальные данные и нашел, что магнитное поле любого тока может быть вычислено как векторная сумма полей, создаваемых отдельными участками тока. Для магнитной индукции поля, создаваемого элементом тока длиной dl Лаплас получил следующую формулу

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{idl}{r^2} \sin \alpha.$$

Это соотношение носит название закона Био-Савара-Лапласа. В векторной форме он имеет вид:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}.$$

Поле прямого тока

Найдем поле, создаваемое током, текущим по прямому бесконечному проводу в некоторой точке A . Все $d\vec{B}$ в данной точке имеют одинаковое направление, поэтому сложение векторов можно заменить сложением их модулей. Точка находится на расстоянии b от провода. Из рисунка видно, что

$$r = \frac{b}{\sin \alpha}; \quad dl = \frac{r \cdot d\alpha}{\sin \alpha} = \frac{b \cdot d\alpha}{\sin \alpha}.$$

Подставив эти значения в закон Био-Савара-Лапласа,

$$\text{получим } dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \cdot \sin \alpha \cdot d\alpha}{b}.$$

Угол α изменяется от 0 до π . Следовательно

$$B = \int_0^\pi dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{b} \int_0^\pi \sin \alpha \cdot d\alpha = \frac{\mu_0 I}{2\pi b}.$$

Таким образом, магнитная индукция поля прямого тока определяется формулой: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi b}$.

Линии магнитной индукции поля прямого тока представляют собой систему охватывающих провод концентрических окружностей.

Поле в центре кругового тока

Рассмотрим поле, создаваемое током, текущим по тонкому проводнику, имеющему форму окружности радиуса R . Определим магнитную индукцию в центре кругового тока. Каждый элемент тока создает в центре индукцию, направленную вдоль положительной нормали к контуру. Поэтому векторное сложение сводится к сложению модулей. Для всех элементов тока угол $\alpha = 90^\circ$, поэтому синус равен 1. Формула закона Био-Савара-Лапласа принимает вид:

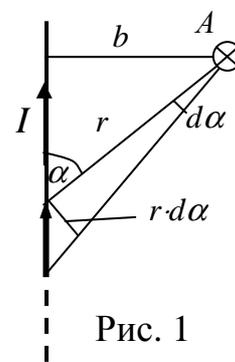


Рис. 1

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl}{R^2}. \text{ Проинтегрировав это выражение, получим}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

Индукция магнитного поля на оси кругового тока

Найдем магнитную индукцию на оси тонкого кольца с током.

Воспользуемся законом Био-Савара-Лапласа.

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl}{r^2} \sin \alpha.$$

Выделим на кольце элемент dl и от него в точку A проведем радиус r . Вектор $d\vec{B}$ направим в соответствии с правилом буравчика.

Разложим вектор $d\vec{B}$ на две составляющие:

$d\vec{B}_\perp$ – перпендикулярную плоскости кольца, и $d\vec{B}_\parallel$ – параллельную плоскости кольца, т.е.

$$d\vec{B} = d\vec{B}_\perp + d\vec{B}_\parallel. \text{ Тогда } \vec{B} = \oint_l d\vec{B}_\perp + \oint_l d\vec{B}_\parallel.$$

Заметив, что $\oint_l d\vec{B}_\parallel = 0$ из соображений сим-

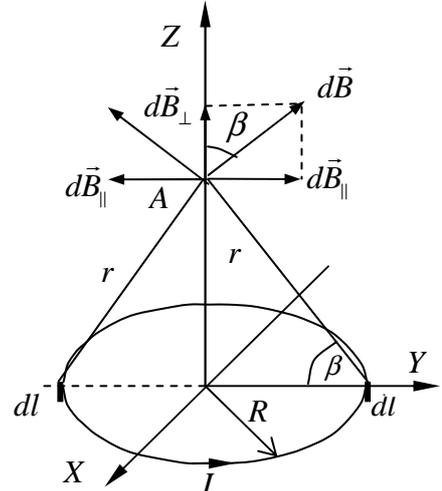


Рис. 2

метрии и что векторы $d\vec{B}_\perp$ от различных элементов сонаправлены, заменим векторное интегрирование скалярным:

$$B = \oint_l dB_\perp, \text{ где } dB_\perp = dB \cos \beta \text{ и } dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl}{r^2}, \text{ т.к. } dl \text{ перпендикулярен } r \text{ и, сле-}$$

довательно $\sin \alpha = 1$. Таким образом, $B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r^2} \cos \beta \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r^2} \cos \beta \cdot 2\pi R$. По-

сле сокращения на 2π и замены $\cos \beta = \frac{R}{r}$, получим $B = \frac{\mu_0 IR^2}{2r^3}$. Если известно расстояние от центра кольца h до точки A и радиус кольца R , то это выражение можно преобразовать так:

$$B = \frac{\mu_0 IR^2}{2(R^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}. \text{ Проверим правильность вывода.}$$

Положим $h = 0$. Это координата центра кольца, тогда:

$$B = \frac{\mu_0 IR^2}{2R^3} = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

Закон полного тока

Возьмем контур, охватывающий прямой ток (рис.3) и вычислим для него интеграл $\oint \vec{B}d\vec{l}$, который

носит название *циркуляции вектора магнитной индукции*. Рассмотрим случай, когда контур обхода перпендикулярен проводнику. Величина $dl \cdot \cos \alpha = R \cdot d\alpha$, поэтому интеграл

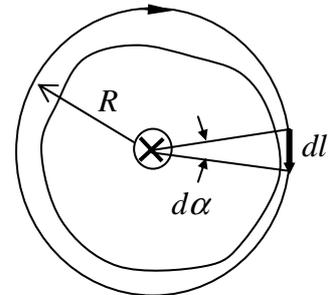


Рис. 3

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \oint BR d\alpha = \oint \frac{\mu_0 IR d\alpha}{2\pi R} = \mu_0 \cdot I.$$

Если контур обхода не охватывает тока, то циркуляция равна нулю. Мы получили выражение для циркуляции для прямого тока. Расчет показывает, что это выражение справедливо для проводников любой формы.

Если контур обхода охватывает несколько токов, то циркуляция вектора \vec{B} равна их алгебраической сумме.

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k.$$

Расчет поля соленоида

Соленоид представляет собой катушку, плотно навитую тонким изолированным проводом виток к витку на цилиндрический каркас. Найдем поле внутри соленоида. Для решения этой задачи воспользуемся законом полного тока.

Возьмем контур обхода в виде прямоугольника 1-2-3-4. Найдем циркуляцию вектора \vec{B} на этом контуре. Поскольку интеграл представляет собой бесконечную сумму, которую можно разбить на несколько слагаемых, то

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \int_1^2 \vec{B} d\vec{l} + \int_2^3 \vec{B} d\vec{l} + \int_3^4 \vec{B} d\vec{l} + \int_4^1 \vec{B} d\vec{l} = B \cdot l = \mu_0 \cdot N \cdot I.$$

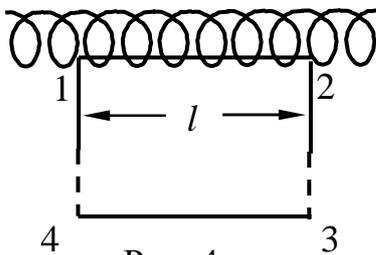


Рис. 4

$$\text{Откуда } B = \mu_0 \cdot \frac{N}{l} N \cdot I = \mu_0 \cdot n \cdot I,$$

где $n = \frac{N}{l}$ — число витков на единицу длины соленоида.

Напряженность магнитного поля связана с магнитной индукцией соотношением

$$B = \mu_0 \cdot H, \text{ поэтому напряженность на оси соленоида}$$

определяется формулой $H = n \cdot I$.

Полученный результат не зависит от того, на каком расстоянии от оси соленоида располагается отрезок 1-2. Если этот отрезок располагается вне соленоида, то охватываемый ток равен нулю, следовательно, и $B = 0$. Таким образом, вне соленоида магнитная индукция равна нулю. По этой причине в учении о магнетизме бесконечный соленоид играет такую же роль как плоский конденсатор в учении об электричестве. В обоих случаях поля заключены внутри систем. Обе части соленоида, если его мысленно разрезать пополам, вносят одинаковый вклад в общее поле. Следовательно, если соленоид разрезать на две части, то на конце соленоида магнитная индукция будет вдвое меньше чем в середине.

Элементы земного магнетизма

Земля в целом представляет собой огромный шаровой магнит. В любой точке пространства, окружающего Землю, и на ее поверхности обнаруживается действие магнитных сил. Иными словами, в пространстве, окружающем Землю, создается магнитное поле, силовые линии которого изображены на рис. 5. Северный магнитный полюс N находится на южном географическом S и наоборот. Существование магнитного поля в любой точке Земли можно установить с помощью магнитной стрелки.

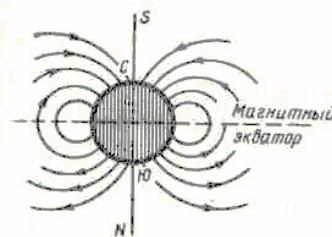


Рис. 5

Вектор H полной напряженности магнитного поля Земли можно разложить на две составляющие: горизонтальную H_0 и вертикальную H_z .

Если магнитная стрелка может свободно вращаться лишь вокруг вертикальной оси, то она будет устанавливаться под действием горизонтальной составляющей магнитного поля Земли в плоскости магнитного меридиана.

Все элементы земного магнетизма изменяются с течением времени. Существующие в настоящее время теории земного магнетизма можно разбить на две группы.

1. Теории, объясняющие наличие магнитного поля электрическими токами, циркулирующими на больших глубинах в жидком ядре Земли.

2. Теории, основанные на предположении, что земная кора содержит в разных своих участках различное количество магнитных пород.

Однако происхождение магнитного поля Земли в настоящее время еще не выяснено.

Тангенс-гальванометр

Рассмотрим соленоид, состоящий из N витков. Ось соленоида расположим горизонтально и направим перпендикулярно плоскости магнитного меридиана.

В центральной части соленоида поместим магнитную стрелку, вращающуюся вокруг вертикальной оси. Если по соленоиду пропустить ток I , то возникает магнитное поле с напряженностью $H = nI$, направленное по оси соленоида. Таким образом, на стрелку будут действовать два взаимно перпендикулярных магнитных поля; магнитное поле Земли и магнитное поле соленоида. Напряженности обоих полей взаимно перпендикулярны. На рис. 6 изображено сечение соленоида горизонтальной плоскостью. Здесь H —вектор напряженности поля, созданного током, H_0 —горизонтальная составляющая магнитного поля Земли. Стрелка установится по направлению равнодействующей H_1 , т. е. по диагонали параллелограмма, сторонами которого будут вектор напряженности магнитного поля Земли H_0 и соленоида H . Из рисунка 6 видно, что

$$H_0 = \frac{H}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

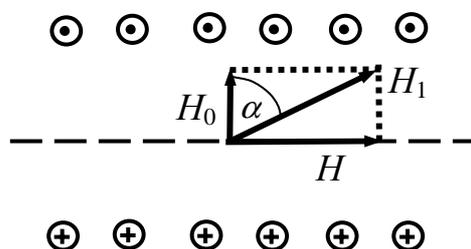


Рис. 6

Напряженность магнитного поля на оси соленоида равна $H = nI$. Поэтому

$$H_0 = \frac{n \cdot I}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

Таким образом, соленоид с магнитной стрелкой, расположенный по его оси может быть использован для измерения горизонтальной составляющей магнитного поля. Прибор, созданный на этом принципе, носит название тангенс-гальванометра.

Блок-схема установки

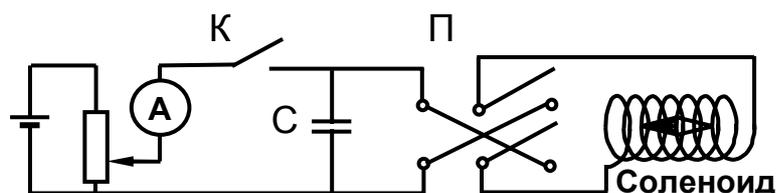


Рис. 7

Порядок работы

1. Подготовить таблицу измерений.

N	I	$\alpha_{\text{лево}}$	$\alpha_{\text{прав}}$	α	H_0	\bar{H}_0	ΔH_0	$\Delta \bar{H}_0$	$H_0 = \bar{H}_0 \pm \Delta \bar{H}_0$
1									
2									
3									
4									
5									

- Установить соленоид так, чтобы его ось была перпендикулярна направлению «север-юг», т.е. перпендикулярна направлению магнитной стрелки.
- Установить регулятор тока соленоида в крайнее левое положение.
- Включить установку в сеть.
- Плавное поворачивая ручку регулятора тока, установить ток при котором стрелка компаса отклонится на 10° . Показания прибора и отклонение магнитной стрелки занести в таблицу.
- Нажать кнопку в верхней части прибора и в момент, когда ток уменьшится до нуля, перевести тумблер в другое положение и отпустить кнопку. Стрелка компаса плавно повернется в другое направление. Угол, на который отклонится стрелка компаса, занести в таблицу.
- Увеличивая ток, добиться отклонения стрелки компаса на углы: 20° , 30° , 40° , 50° и выполнять указания пунктов 5 и 6.
- Вычислить все необходимые значения и заполнить таблицу. В нашей лабораторной установке число витков на единицу длины $n=200$.

Контрольные вопросы

1. Назовите единицы измерения магнитной индукции, магнитного потока, напряженности магнитного поля, индуктивности.
2. Сформулируйте закон Ампера.
3. Запишите закон Био-Савара-Лапласа.
4. Выведите формулы для определения индукции магнитного поля бесконечно длинного прямолинейного проводника с током, на оси кругового тока, в центре витка с током.
5. Сформулируйте закон полного тока и выведите формулу для определения магнитной индукции на оси бесконечно длинного соленоида.
6. Расскажите о земном магнетизме. Как располагаются силовые линии магнитного поля Земли?
7. Расскажите устройство тангенс-гальванометра.
8. Выведите формулу для определения напряженности магнитного поля Земли с помощью тангенс-гальванометра.
9. Как располагается ось соленоида относительно плоскости магнитного меридиана?
10. Расскажите порядок выполнения работы.

Лабораторная работа №7

Снятие петли гистерезиса ферромагнетика

Цель работы: исследование зависимости магнитной индукции в ферромагнетике от напряженности внешнего магнитного поля.

Приборы и принадлежности: две одинаковые катушки индуктивности, регулируемый источник постоянного и переменного тока, амперметр, компас, ферромагнитный образец.

Краткое теоретическое введение

Вещества, обладающие спонтанной намагниченностью, т. е. они намагничены даже при отсутствии внешнего магнитного поля – называются **ферромагнетиками**. Магнитная проницаемость ферромагнетиков по порядку величины лежит в пределах 10^2 – 10^5 . К группе ферромагнетиков относятся четыре химических элемента: железо, никель, кобальт, гадолиний. Из них наибольшей магнитной проницаемостью обладает железо. Ферромагнетиками могут быть различные сплавы, содержащие ферромагнитные элементы. Широкое применение в технике получили керамические ферромагнитные материалы – ферриты.

Для каждого ферромагнетика существует определенная температура (так называемая **температура или точка Кюри**), выше которой ферромагнитные свойства исчезают, и вещество становится парамагнетиком.

Ферромагнитные материалы делятся на две большие группы – на **магнитомягкие** и **магнитожесткие** материалы. Магнитомягкие ферромагнитные материалы почти полностью размагничиваются, когда внешнее магнитное поле становится равным нулю. К магнитомягким материалам относится, например, чистое железо, электротехническая сталь и некоторые сплавы. Эти материалы применяются в приборах переменного тока, в которых происходит непрерывное перемагничивание, то есть изменение направления магнитного поля (трансформаторы, электродвигатели и т. п.).

Магнитожесткие материалы сохраняют в значительной мере свою намагниченность и после удаления их из магнитного поля. Примерами магнитожестких материалов могут служить углеродистая сталь и ряд специальных сплавов. Магнито-жесткие материалы используются в основном для изготовления **постоянных магнитов**.

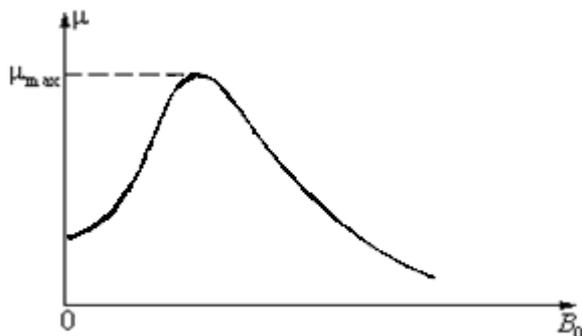


Рисунок 1. Типичная зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от индукции внешнего магнитного поля.

Магнитная проницаемость μ ферромагнетиков **не является постоянной величиной**; она сильно зависит от индукции B_0 внешнего поля. Типичная зависимость $\mu(B_0)$ приведена на рис. 1. В таблицах обычно приводятся значения максимальной магнитной проницаемости.

Непостоянство магнитной проницаемости приводит к сложной нелинейной зависимости индукции B магнитного поля в ферромагнетике от индукции B_0 внешнего магнитного поля. Характерной особенностью процесса намагничивания ферромагнетиков является так называемый *гистерезис*. Кривая намагничивания $B(B_0)$ ферромагнитного образца представляет собой петлю сложной формы, которая называется *петлей гистерезиса* (рис. 2.).

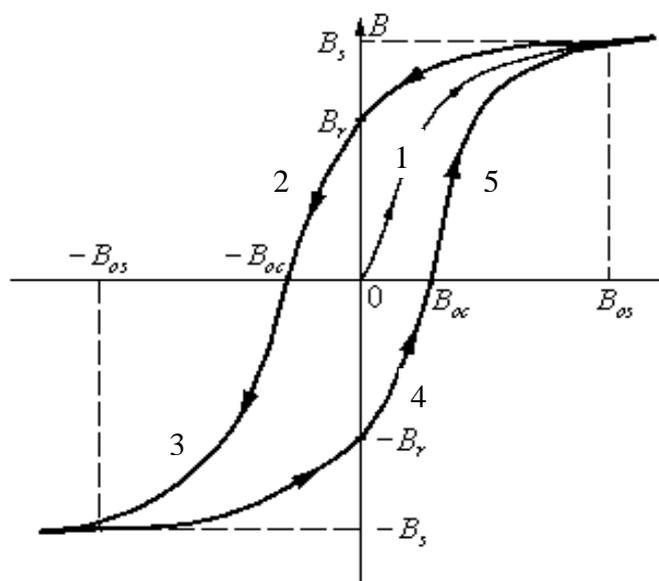


Рисунок 2. Петля гистерезиса ферромагнетика. Стрелками указано направление процессов намагничивания и размагничивания ферромагнитного образца при изменении индукции B_0 внешнего магнитного поля.

Из рис. 2 видно, что при $|B_0| > B_{0c}$ наступает магнитное насыщение — намагниченность образца достигает максимального значения.

Если теперь уменьшать магнитную индукцию B_0 внешнего поля и довести ее вновь до нулевого значения, то ферромагнетик сохранит **остаточную намагниченность** — поле внутри образца будет равно B_r . Остаточная намагниченность образцов позволяет создавать постоянные магниты. Для того, чтобы полностью размагнитить образец, необходимо, изменив знак внешнего поля, довести магнитную индукцию B_0 до значения $-B_{0c}$, которое принято называть **коэрцитивной силой**. Далее процесс перемагничивания может быть продолжен, как это указано стрелками на рис. 2.

У магнитомягких материалов значения коэрцитивной силы B_{0c} невелико — петля гистерезиса таких материалов достаточно «узкая». Материалы с большим значением коэрцитивной силы, то есть имеющие «широкую» петлю гистерезиса, относятся к магнито жестким.

Природа ферромагнетизма может быть до конца понята только на основе квантовых представлений. Качественно ферромагнетизм объясняется наличием собственных (спиновых) магнитных полей у электронов. В кристаллах ферромагнитных материалов возникают условия, при которых, вследствие сильного

взаимодействия спиновых магнитных полей соседних электронов, энергетически выгодной становится их параллельная ориентация. В результате такого взаимодействия внутри кристалла ферромагнетика возникают самопроизвольно намагниченные области размером порядка $10^{-2}-10^{-4}$ см. Эти области называются **доменами**. Каждый домен представляет из себя небольшой постоянный магнит. В отсутствие внешнего магнитного поля направления векторов индукции магнитных полей в различных доменах ориентированы в большом кристалле хаотически. Такой кристалл в среднем окажется ненамагниченным. При наложении внешнего магнитного поля B_0 происходит смещение границ доменов так, что объем доменов, ориентированных по внешнему полю, увеличивается. С увеличением индукции внешнего поля возрастает магнитная индукция намагниченного вещества. В очень сильном внешнем поле домены, в которых собственное магнитное поле совпадает по направлению с внешним полем, поглощают все остальные домены, и наступает магнитное насыщение. Рис. 3 может служить качественной иллюстрацией процесса намагничивания ферромагнитного образца.

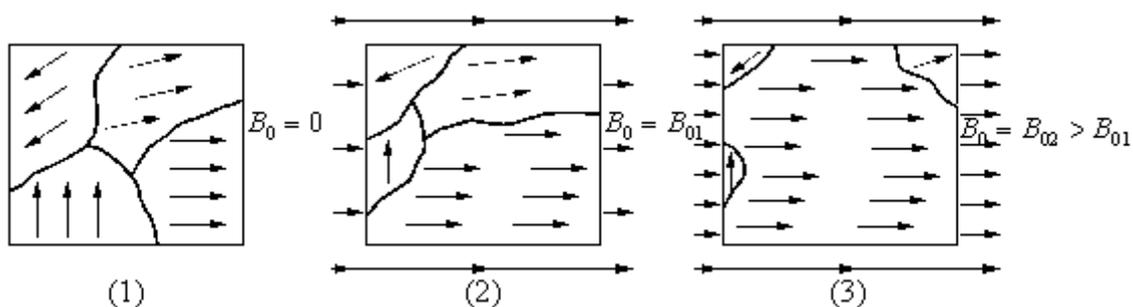
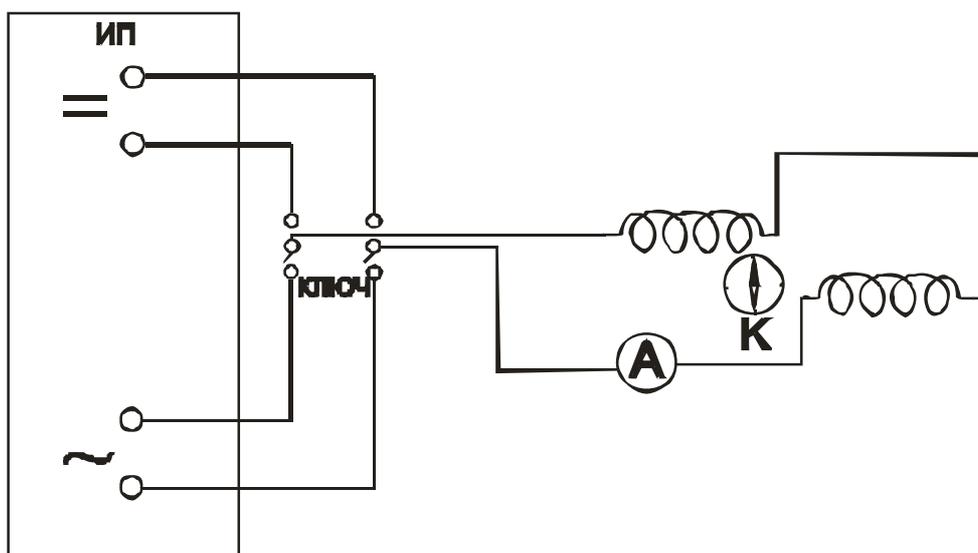


Рисунок 3. Намагничивание ферромагнитного образца. (1) $B_0 = 0$; (2) $B_0 = B_{01}$; (3) $B_0 = B_{02} > B_{01}$.

Блок – схема установки (рис.4)



Порядок работы

1. Подготовить таблицу измерений.

Участок 1			Участок 2			Участок 3			Участок 4			Участок 5		
I	φ	$\text{tg } \varphi$												

- Собрать схему согласно рис. 4.
- Установить прибор таким образом, чтобы плоскости витков катушек были параллельны плоскости магнитного меридиана и добиваются компенсации магнитных полей, создаваемых этими катушками, на магнитную стрелку компаса.
- В одну из катушек помещают ферромагнитный образец, пропуская по катушке переменный ток, постепенно уменьшая его до нуля. При этом происходит размагничивание ферромагнитного образца.
- Помещают размагниченный образец в одну из катушек, при этом стрелка компаса не изменяет своего положения. Если стрелка отклоняется от первоначального положения, повторяют размагничивание образца (пункт 4).
- Регулировкой напряжения постепенно увеличивают величину тока в катушках от нуля до 0,5 – 0,7 А. Отсчитывают углы отклонения стрелки компаса от первоначального положения, через каждые 0,05 – 0,1 А (кривая 1 на рис. 2).
- Доведя ток до максимального значения, такими же интервалами уменьшают его до нуля, при этом фиксируют углы отклонения стрелки компаса (кривая 2 на рис. 2).
- Изменяют полярность источника постоянного тока и повторяют измерения согласно пунктам 6 и 7. Углы φ при отклонении стрелки в противоположную сторону считать отрицательными: (кривые 3 и 4 на рис. 2).
- Вновь изменяют полярность источника питания и проводят измерения до достижения максимального тока (кривая 5 на рис. 2).
- Полученные результаты заносят в таблицу.
- Откладывая по оси абсцисс величину тока, а по оси ординат $\text{tg } \varphi$, строят кривую зависимости $\text{tg } \varphi = f(I)$.

Примечание: в продолжении всего опыта необходимо следить за плавным изменением величины тока (регулятор изменения напряжения поворачивать очень медленно). При малейшей неосторожности, т.е. при случайном размыкании цепи или случайном резком изменении величины тока, опыт прекратить, стержень размагнитить и работу начать сначала!

Контрольные вопросы

1. Какие виды магнетиков вы знаете?
2. Какие вещества называются ферромагнетиками?
3. Объясните петлю гистерезиса ферромагнетика.
4. Какие ферромагнетики являются магнитомягкими? магнитожесткими?
Где их применяют?
5. Каков механизм намагничения ферромагнетиков?
6. Какую температуру для ферромагнетика называют точкой Кюри?

Лабораторная работа №8

Определение отношения заряда электрона к его массе методом магнетрона

Приборы и принадлежности: Установка для определения отношения заряда электрона к его массе.

Краткое теоретическое введение

На заряд e , находящийся в электрическом поле напряженностью \vec{E} , действует сила:

$$\vec{F}_э = e \cdot \vec{E}. \quad (1)$$

На тот же заряд, движущийся со скоростью \vec{v} в магнитном поле с индукцией \vec{B} , действует сила:

$$\vec{F}_в = e \cdot [\vec{v}, \vec{B}] \quad (2)$$

Направление силы $\vec{F}_в$ определяется векторным произведением $[\vec{v}, \vec{B}]$, т.е. перпендикулярно плоскости, в которой лежат вектора \vec{v} и \vec{B} . Часто направление этой силы определяют по правилу «левой руки»:

Необходимо расположить левую руку так, чтобы силовые линии магнитного поля входили в ладонь, четыре пальца совместить с направлением движения положительно заряженной частицы, тогда отогнутый на 90° большой палец покажет направление силы, действующий на заряд.

Модуль этой силы определяется выражением:

$$F_в = e v B \sin \alpha, \quad (3) \quad \text{где } \alpha - \text{угол между векторами } \vec{v} \text{ и } \vec{B}.$$

Сила, действующая на заряженную частицу, движущуюся одновременно в электрическом и магнитном полях равна сумме сил со стороны электрического и магнитного полей:

$$\vec{F}_л = e \cdot \vec{E} + e \cdot [\vec{v}, \vec{B}] \quad (4)$$

Выражение (3) было получено Г.А. Лоренцем (1853 – 1928). Сила носит его имя – $\vec{F}_л$ – *сила Лоренца*.

Под действием этой силы частица массой m получает ускорение:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_л}{m} = \frac{e}{m} \cdot \{ \vec{E} + [\vec{v}, \vec{B}] \}$$

Из этого уравнения можно сделать вывод: *характер движения заряженной частицы определяется отношением заряда частицы к её массе.*

Величина e/m носит название *удельного заряда* и является важной характеристикой заряженных частиц, позволяющей производить расчет поведения частиц в электрических и магнитных полях.

В работе удельный заряд электрона определяется методом магнетрона.

Это название объясняется тем, что расположение электрического и магнитного полей в лабораторной работе похоже на расположение полей в магнетронах – генераторах электромагнитных колебаний сверхвысоких частот (генера-

торах СВЧ). Магнетроны, мощностью около 1 кВт используются, в частности, в микроволновых СВЧ – печах.

Методика измерений

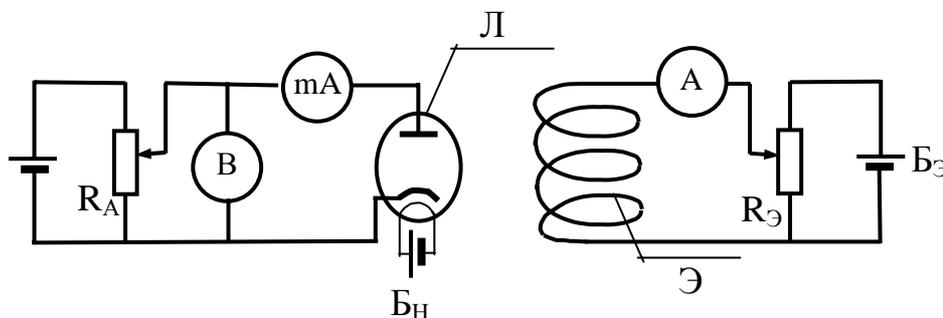


Рис. 1

На рис. 1 изображена схема установки для определения отношения $\frac{e}{m}$.

Л — электронная лампа 3Ц11С;

Э — электромагнит;

mA — миллиамперметр;

А — амперметр;

$B_H, B_A, B_{\text{Э}}$ — источники питания цепей накала, анода и электромагнита;

$R_A, R_{\text{Э}}$ — регулировочные сопротивления в цепях анода и электромагнита.

В электронной лампе 3Ц11С катод расположен по оси цилиндрического анода.

Лампу (Л) располагают в электромагните (Э) так, чтобы её ось совпадала с осью электромагнита. На электроны, вылетающие из катода, действуют силы электрического и магнитного полей (рис. 2).

В отсутствие магнитного поля ($B = 0$) электроны движутся на анод по радиусам. Если создать небольшое магнитное поле ($B < B_{\text{кр}}$), то траектории электронов искривляются.

При увеличении магнитной индукции происходит всё большее искривление траекторий электронов. При достижении *критического значения* $B_{\text{кр}}$, электроны будут двигаться по траекториям касаясь анода.

При значении $B > B_{\text{кр}}$ большая часть электронов перестанет достигать анода и сила анодного тока будет, практически, равна нулю.

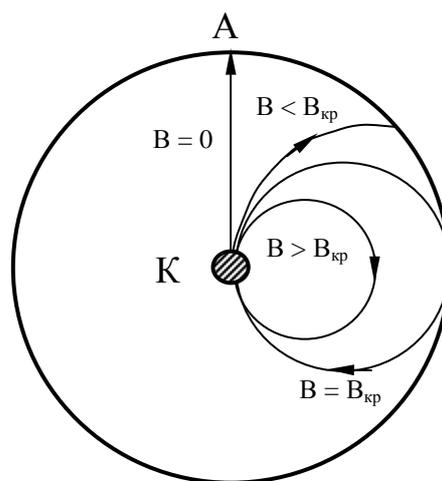


Рис. 2

Эксперимент по определению $\frac{e}{m}$ проводится следующим образом:

1) Устанавливается напряжение между анодом и катодом U_a .

2) Снимают зависимость анодного тока I_a от индукции магнитного поля B , которая носит название *сбросовой характеристики*.

Сбросовые характеристики (рис. 3) не дают вертикального спада анодного тока. Если бы все электроны имели одинаковые скорости, то анодный ток с увеличением магнитного поля изменялся бы так, как показано на рисунке 3 штриховой линией. Критические условия достигаются для разных электронов при разных значениях B . Сбросовая характеристика приобретает вид, показанный сплошной линией.

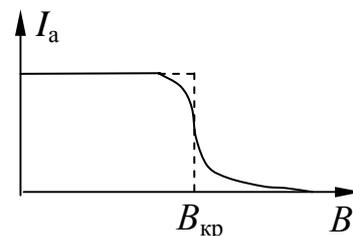


Рис. 3

Кроме того невозможно обеспечить полную коаксиальность (совпадения осей) анода и катода.

Для расчета значения e/m необходимо брать значение $I_{кр}$ из средней части участка сбросовой характеристики. Этот участок соответствует электронам, движущимся со скоростями близкими к наиболее вероятной.

Как показывает расчет отношение e/m определяется формулой:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{a^2 B_{кр}}, \quad (5)$$

где U_a – напряжение между катодом и анодом, $B_{кр}$ – критическое значение индукции магнитного поля, $a = 5$ мм – радиус анода.

Экспериментальная часть

1. Включить установку и дать лампе прогреться 3 минуты.

2. Переключателем установить анодное напряжение U_{a1} . В лабораторной установке измерения можно производить при анодных напряжениях 12,5 В, 25 В, 50 В, 62,5 В и 75В. Студенты проводят измерения при двух анодных напряжениях U_{a1} , U_{a2} по указанию преподавателя.

3. Плавно увеличивать значение тока в катушке электромагнита $I_{\mathcal{E}}$ до 3 А.

4. Результаты измерений заносят в таблицу.

№	U_{a1}		U_{a2}	
	$I_{\mathcal{E}}$	I_a	$I_{\mathcal{E}}$	I_a
1				
2				
3				
4				

10				

5. По полученным данным строят две сбросовых характеристики $I_a = f(I_{\mathcal{E}})$.

6. На каждом графике находят значения $I_{кр}$. Значения $I_{кр}$ соответствуют та-

ким значениям тока электромагнита $I_{кр}$ при которых наблюдается наибольший спад анодного тока на сбросовой характеристике.

7. Индукция магнитного поля на оси катушки вычисляется по формуле:

$$B = 0,0178 \cdot I \text{ Тл.}$$

8. Рассчитывают отношение $\frac{e}{m}$ по формуле (5) для двух, указанных выше, режимов работы установки и находят среднее значение отношения заряда электрона к его массе.

Контрольные вопросы

1. Чему равна и как направлена сила действующая на заряд, движущийся в магнитном поле?
2. Запишите выражение для силы Лоренца.
3. По какой траектории движется электрон в однородном магнитном поле?
4. Нарисуйте схему установки для измерения удельного заряда электрона?
5. От чего зависит траектория электронов движущихся в диоде, помещенном в магнитное поле?
6. Почему сбросовая характеристика имеет вид плавной кривой?
7. Напишите формулу для вычисления отношения заряда электрона к его массе? (формула (5))
8. Расскажите порядок выполнения работы.
9. Расскажите порядок обработки экспериментальных данных.

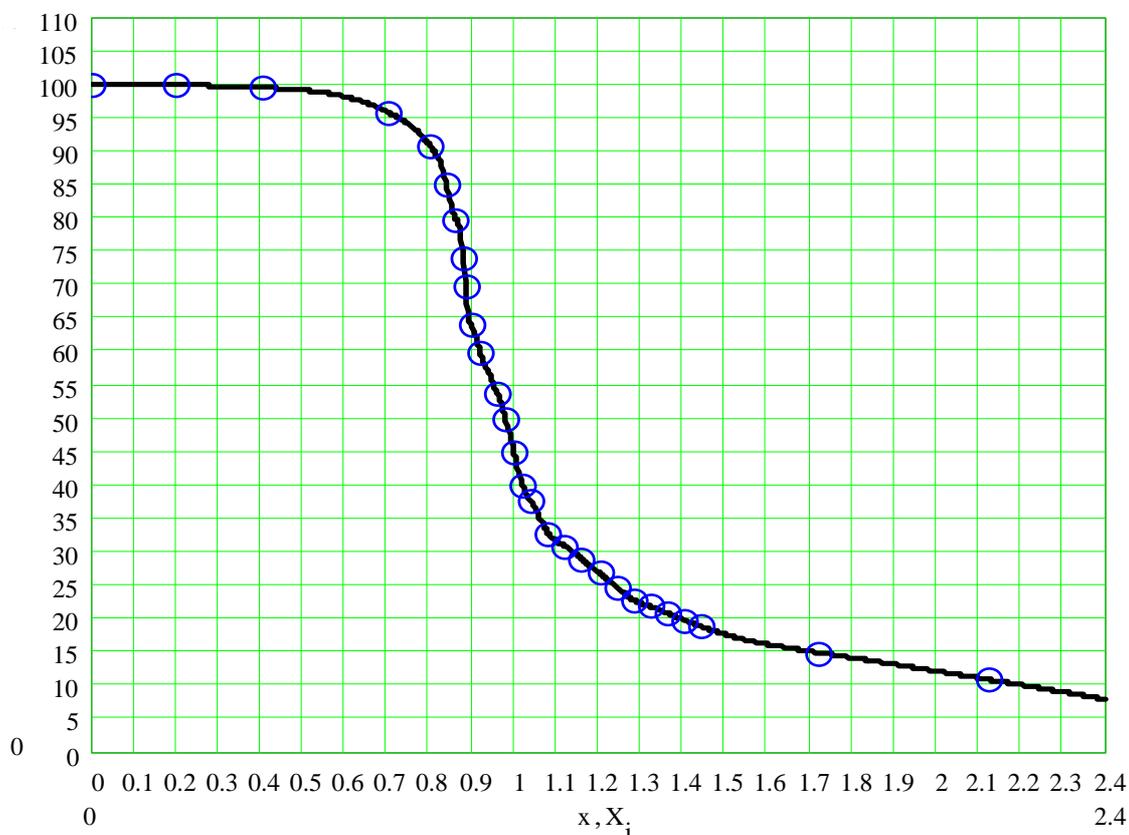


Рис. 4

Примерный вид графика зависимости тока лампы от тока электромагнита

Лабораторная работа №9

Определение удельного заряда электрона методом магнитной фокусировки электронного пучка. (Метод Буша).

Приборы и принадлежности: Установка состоит из двух блоков:

1. Электроннолучевая трубка с блоком питания и соленоидом
2. Блок питания соленоида.

Краткое теоретическое введение

На электрон, движущийся в магнитном поле, действует сила Лоренца.

$$\vec{F}_L = e \cdot \vec{v} \times \vec{B}, \quad (1)$$

где e – заряд электрона, \vec{B} – индукция магнитного поля, \vec{v} – скорость электрона. Эта сила перпендикулярна скорости движения электрона и поэтому не изменяет её абсолютной величины.

Если угол между направлениями векторов скорости и магнитной индукции α , то скорость движения можно разложить на две составляющие, одна из которых перпендикулярна, другая параллельна вектору магнитной индукции:

$$v_{\perp} = v \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

$$v_{\parallel} = v \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

Спроектируем уравнение (1) на плоскость, перпендикулярную направлению вектора магнитной индукции:

$$F_L = e \cdot B \cdot v \cdot \sin \alpha = e \cdot B \cdot v_{\perp}. \quad (5)$$

На значение силы Лоренца влияет только нормальная составляющая скорости v_{\perp} . Если рассматривать движение электрона как сложное движение со скоростями v_{\perp} и v_{\parallel} , то можно утверждать, что сила Лоренца не влияет на движение вдоль силовых линий индукции магнитного поля, но влияет на изменение направления нормальной составляющей скорости v_{\perp} и вызывает движение по окружности радиуса R . Найдем период обращения электрона по этой окружности.

Сила F_L является центростремительной силой, поэтому:

$$e \cdot B \cdot v_{\perp} = m \cdot v_{\perp}^2 / R, \text{ откуда}$$

$$v_{\perp} = e \cdot B \cdot R / m. \quad (6)$$

Время одного оборота электрона

$$T = 2\pi R / v_{\perp}, \text{ поэтому}$$

$$T = 2\pi m / e \cdot B. \quad (7)$$

Интересно отметить, что период обращения электрона в однородном магнитном поле не зависит ни от радиуса, ни от скорости v_{\perp} . Все электроны, влетевшие в данное магнитное поле, сделают один полный оборот за одно и то же время.

За время одного оборота электрон сместится вдоль силовых линий индукции магнитного поля на расстояние равное шагу винта:

$$h = v_{\parallel} \cdot T, \text{ или, с учетом (4)}$$

$$h = 2\pi m \cdot v \cdot \cos \alpha / e \cdot B. \quad (8)$$

Если угол α мал, т.е. электроны летят под малым углом к направлению силовых линий индукции магнитного поля, то в этом случае можно записать

$$h = 2\pi \cdot m \cdot v / e \cdot B. \quad (9)$$

Таким образом, для малых углов путь, пройденный электроном в магнитном поле за один оборот, не зависит от угла α . Из этого следует, что *все электроны, вышедшие из одной точки под небольшими, но разными углами к направлению силовых линий индукции магнитного поля, после одного оборота соберутся в одной точке*. В этом и заключается принцип магнитной фокусировки электронов.

Выражение (9) может служить для определения удельного заряда электрона

$$e/m = 2\pi \cdot v / (h \cdot B). \quad (10)$$

В эксперименте электроны до влета в магнитное поле разгоняются в электрическом поле, имеющем разность потенциалов U , в котором приобретают кинетическую энергию,

$$m v^2 / 2 = e \cdot U. \quad (11)$$

Подставив (11) в (10), получим

$$e/m = 8\pi^2 \cdot U / (h \cdot B)^2. \quad (12)$$

При некотором минимальном поле B произойдет первая фокусировка. При этом электрон совершит один оборот спирали, шаг которой в этом случае будет $h = L$, где L – расстояние между вторым анодом ЭЛТ и флуоресцирующим экраном. При дальнейшем увеличении индукции магнитного поля произойдет вторая фокусировка. Электрон совершит два оборота и шаг спирали будет равен $h = L/2$, если n оборотов, то $h = L/n$. Формулу (12) с учетом последних замечаний перепишем следующим образом:

$$e/m = \frac{8\pi^2 U}{(L \cdot B / n)^2}, \quad (13)$$

где n – число витков спирали.

Экспериментальная часть

Схема установки представлена на рис.1

Для создания потока электронов и их фокусировки используется электроннолучевая трубка ЛО 247 осциллографа Н3013. Электроннолучевая трубка помещается в соленоид, который создает постоянное магнитное поле. Питание соленоида осуществляется от отдельного блока питания. Индукция B , создаваемая соленоидом, линейно зависит от тока $B = k \cdot I$. Для используемого в работе соленоида $k = 0,014$ Тл/А.

В нашей установке значение тока может регулироваться от нуля до одного ампера.

Питание самой трубки осуществляется от блока питания осциллографа. Электрон ускоряется в пространстве между катодом и вторым анодом электроннолучевой трубки. Это напряжение измеряется вольтметром с высоким входным сопротивлением (20 МОм). Ускоряющее напряжение может изменять-

ся резистором, выведенным на верхнюю крышку корпуса осциллографа (красная ручка) в пределах от 700 до 1000 вольт.

Расстояние между вторым анодом и флуоресцирующим экраном для нашей ЭЛТ составляет 0,12м. Поэтому, подставив численные значения параметров нашей установки в формулу (13), получим:

$$e/m = 8\pi^2 \cdot U / (0,12 \cdot 0,014 \cdot I/n)^2 = 2,81 \cdot 10^7 \cdot n^2 \cdot U / I^2.$$

Итак, в работе для определения e/m мы будем использовать формулу

$$e/m = 2,81 \cdot 10^7 \cdot U \cdot n^2 / I^2. \quad (14)$$

Из формулы (14) видно, что для экспериментального определения отношения заряда электрона к его массе необходимо измерить ускоряющее напряжение U и ток соленоида в моменты, когда на экране ЭЛТ мы будем наблюдать сфокусированное пятно.

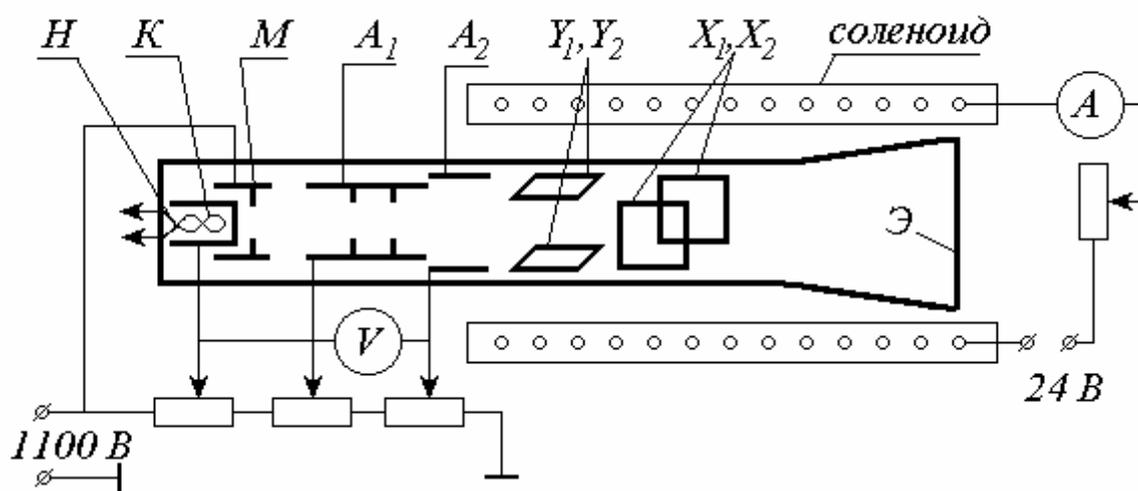


Рис.1

- Н - подогреватель катода (нить накала),
 К - катод (источник электронов),
 М - модулятор (управляющий электрод),
 А₁ - фокусирующий электрод (первый анод),
 А₂ - ускоряющий анод (второй анод),
 Y₁, Y₂ - вертикально отклоняющие пластины,
 X₁, X₂ - горизонтально отклоняющие пластины,
 Э - флуоресцирующий экран.
 С - соленоид.

Экспериментальная часть

1. Подготовить таблицу измерений.
2. Тумблер «Ускоряющее напряжение. Ток соленоида» перевести в верхнее положение. При этом прибор будет измерять ускоряющее напряжение. Предел шкалы прибора 1000В.

№	Ускоряющее напряжение	n	Ток соленоида	e/m	$\varepsilon = \frac{\Delta U}{U} + \frac{2\Delta I}{I}$	$e/m = (e/m)_{cp} \pm \Delta(e/m)$
1	1000 В	1				
2		2				
3	800 В	1				
4		2				
Средние значения						

3. С помощью красной ручки на верхней крышке корпуса осциллографа установить ускоряющее напряжение 1000 В.
4. Регулятором напряжения на блоке питания соленоида добиться того, чтобы на экране ЭЛТ было пятно минимального размера. Первая фокусировка наблюдается при токе соленоида около 0,4 А.
5. Перевести тумблер в нижнее положение. В этом положении тумблера прибор будет показывать ток соленоида. Предел шкалы в этом случае 1А. Фокусировка пятна может несколько нарушиться. Это происходит потому, что измерительный прибор отключается от цепи питания ЭЛТ и подключается к цепи питания соленоида. Измерительный прибор, хотя и имеет очень большое внутреннее сопротивление (20 МОм), однако при измерении уменьшает ускоряющее напряжение на небольшую величину. Не восстанавливая фокусировки записать показания амперметра в таблицу.
6. Плавно увеличивая ток соленоида, добиться второй фокусировки.
7. Значение тока занести в таблицу.
8. Перевести тумблер в верхнее положение.
9. Красной ручкой, расположенной на верхней части корпуса осциллографа, установить ускоряющее напряжение $U = 800$ В.
10. Прodelать пункты 4,5,6,7.
11. Произвести необходимые расчеты и заполнить все столбцы таблицы.

Контрольные вопросы

1. Запишите выражение для силы Лоренца. Как направлена сила Лоренца?
2. Выведите выражение для периода обращения заряда в однородном магнитном поле.
3. От каких факторов зависит период обращения электрона в однородном магнитном поле?
4. По какой траектории движется электрон в однородном магнитном поле?
5. Как связан шаг винтовой линии, по которой движется электрон с периодом обращения в однородном магнитном поле?
6. Нарисуйте электроннолучевую трубку и расскажите, как с помощью продольного магнитного поля можно сфокусировать электронный пучок?
7. Выведите рабочую формулу для определения отношения заряда электрона к его массе.
8. Расскажите порядок выполнения работы.

Лабораторная работа №10

Определение электродинамической постоянной

Цель работы: Экспериментальным путем определить отношение единицы силы тока в системе СГСМ к единице тока в системе СГСЭ, которое численно равно скорости света в вакууме.

Приборы и принадлежности: установка для определения отношения силы тока в системе СГСМ к единице тока в системе СГСЭ.

Краткое теоретическое введение

Под системой физических величин понимают совокупность взаимосвязанных физических величин, используемых в отдельных областях естествознания.

Всякая система состоит из некоторого числа основных единиц, выбираемых независимо друг от друга, и совокупности производных единиц. Производные единицы образуются из основных с помощью соотношений, называемых *определяющими* для данной единицы. Одной из таких систем единиц является система СИ. Однако есть и другие системы единиц.

Система СГС

В физике до настоящего времени применяют систему единиц, построенную на трех основных единицах: *длины* (сантиметр), *массы* (грамм) и *времени* (секунда). Система поэтому носит название СГС. Единицей силы в этой системе является *дина*, определяющим уравнением, для которой служит второй закон Ньютона. $F = ma$.

Дина – сила, сообщаемая телу массой в 1 г ускорение 1 см/с^2 .

Единица работы в системе СГС – эрг. Уравнением, определяющим эрг, является $A = FS$.

Эрг – работа, совершаемая силой в одну дина при перемещении на расстояние 1 см.

Абсолютная электростатическая система единиц (СГСЭ)

Определяющим уравнением для заряда в системе СГСЭ служит закон Кулона $F = k \cdot q_1 q_2 / r^2$. Коэффициент k в системе СГСЭ полагается равным единице. Заряд в системе СГСЭ является производной единицей.

Единицей заряда в СГСЭ – является такой точечный заряд, который взаимодействует в вакууме с равным ему зарядом на расстоянии в 1 см силой в 1 дина. Специального названия эта единица не имеет. Записывается СГСЭ_q.

За единицу силы тока в системе СГСЭ принимают такой ток, при котором через поперечное сечение проводника, протекает за одну секунду заряд 1 СГСЭ_q. Определяющим для тока является уравнение $I = q/t$. $1 \text{ СГСЭ}_I = 1 \text{ СГСЭ}_q / 1 \text{ с}$.

Единица потенциала в системе СГСЭ определяется уравнением $\phi = A/q$.

За единицу потенциала в системе СГСЭ принимают потенциал такой точки, при перемещении в которую из бесконечности заряда в 1 СГСЭ_q силы поля совершают работу равную одному эргу. $1 \text{ СГСЭ}_\phi = 1 \text{ эрг} / 1 \text{ СГСЭ}_q$.

Единица емкости определяется из уравнения $C = q/\phi$.

За единицу емкости принимают емкость такого уединенного проводника, при сообщении которому заряда в 1 СГСЭ_q, потенциал его при этом повышается на 1 СГСЭ_φ. Анализ соотношений показывает, что емкость в СГСЭ измеряется в сантиметрах.

Абсолютная электромагнитная система единиц (СГСМ)

В системе СГСМ в качестве основных используют единицы системы СГС. Законом, определяющим единицу силы тока, является закон Ампера $F = k \cdot i_1 i_2 / b$. Коэффициент k в законе Ампера в системе СГСМ равен единице.

Единица силы тока в системе СГСМ определяется как сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным проводникам бесконечной длины ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 см один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную одной дине на каждый сантиметр длины.

Единица силы тока в этой системе не имеет специального названия и обозначается просто СГСМ_I. Если некоторый ток измерить вначале в единицах СГСЭ, а затем в СГСМ, то мы получим разные численные значения.

Если I_3 – сила тока, измеренная в СГСЭ, а I_M – сила того же тока измеренного в СГСМ – единицах, то можно записать: $I_3/I_M = c$, где c – некоторая постоянная, называемая электродинамической постоянной, которая имеет размерность скорости. Значение постоянной c можно определить только из опытов.

Такие опыты были проведены А.Г.Столетовым, В.Э.Вебером и другими учеными. Опыты привели к заключению, что электродинамическая постоянная равна скорости света в вакууме. Такое совпадение не случайно. Во второй половине 19 века Максвелл развил электромагнитную теорию, согласно которой свет есть электромагнитные волны, и теоретически показал, что скорость света в вакууме равна электродинамической постоянной.

Дальнейшие исследования показали, что между электричеством и магнетизмом имеется глубокая связь. Из постулатов теории относительности следует, что магнитное взаимодействие зарядов и токов является следствием закона Кулона. (См. И.В.Савельев. Курс общей физики. Т 2. с. 121). Оказалось, что магнетизм как самостоятельная сущность в природе не существует. Магнетизм есть релятивистский эффект.

Описание экспериментальной установки

Блок схема экспериментальной установки приведена на рис 1.

Конденсатор C_0 с частотой сети (50 Гц) попеременно с помощью реле (Р) подключается то к цепи зарядки, состоящей из блока питания (БП), потенциометра (П) и вольтметра (V) проградуированного в единицах потенциала СГСЭ_φ, то к цепи разрядки через амперметр, проградуированный непосредственно в

единицах тока в системе СГСМ_I. Время зарядки конденсатора много меньше периода переключений, т.е. когда реле подключает конденсатор к контакту *a*, то конденсатор успевает зарядиться до потенциала, показываемого вольтметром. Конденсатор получит заряд, определяемый выражением $q = C\varphi_3$. За одну секунду конденсатор заряжается и разряжается $\nu = 50$ раз. В среднем, сила пульсирующего тока через контакт *a*, выраженная в электростатических единицах, равна $I_3 = q\nu = C\varphi_3 \cdot \nu$.

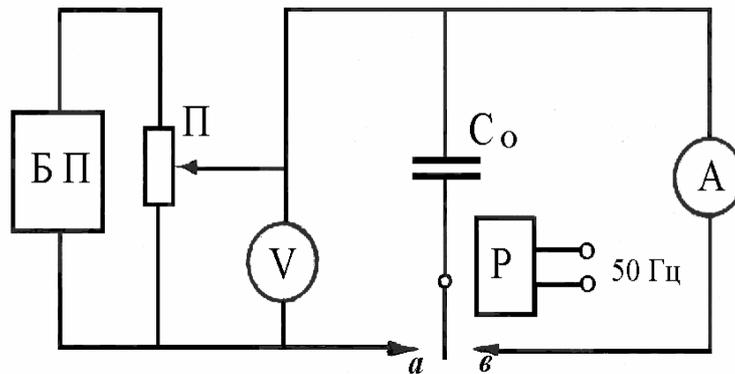


Рис 1.

При подключении конденсатора к цепи разряда, т.е. реле подключено к контакту *b*, конденсатор успевает разрядиться за время много меньшее, чем половина периода колебаний переменного тока сети. Т.е. в очередной момент возвращения контакта реле к клемме *a*, конденсатор полностью разряжен. Амперметр (А) покажет средний ток разряда I_M .

Электродинамическая постоянная определится из выражения

$$c = I_3 / I_M = C\varphi_3 \cdot \nu / I_M. \quad (1)$$

Для удобства обработки экспериментальных результатов преобразуем эту формулу. Шкала измерительного прибора имеет 200 делений. Этот прибор используется для измерения и напряжения и тока.

Отклонение стрелки на полную шкалу при измерении напряжения соответствует $40 \cdot 10^{-3}$ СГСЭ_φ, поэтому цена деления $\varphi_0 = 40 \cdot 10^{-3} / 200 = 2 \cdot 10^{-4}$ СГСЭ_φ. (2)

Пусть N_φ - показания прибора при измерении напряжения, тогда измеренное в единицах СГСЭ_φ значение напряжения будет

$$\varphi_3 = N_\varphi \varphi_0. \quad (3)$$

Отклонение стрелки на полную шкалу при измерении тока разрядки конденсатора соответствует $10 \cdot 10^{-3}$ СГСМ_I, поэтому цена деления

$$I_0 = 10 \cdot 10^{-3} / 200 = 0,5 \cdot 10^{-4} \text{ СГСМ}_I. \quad (4)$$

Пусть N_I - показания прибора при измерении тока, тогда измеренное в единицах СГСМ_I значение тока будет $I_M = N_I \cdot I_0$. (5)

Значение ёмкости конденсатора $C_0 = 166,7 \cdot 10^{-6}$ Ф. Фарад (Ф)– единица электроемкости в системе СИ. Один фарад соответствует $1 \text{ Ф} = 9 \cdot 10^{11}$ см. Напомним, что в СГСЭ ёмкость измеряется в сантиметрах. Переведем значение ёмкости C_0 из фарад в сантиметры

$$C_0 = 166,7 \cdot 10^{-6} \cdot 9 \cdot 10^{11} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ см.} \quad (6)$$

Подставим выражения (2) – (6) в выражение (1)

$$c = I_3 / I_M = C \varphi_3 \cdot v / I_M = 1,5 \cdot 10^8 \cdot N_\varphi \cdot \varphi_0 \cdot 50 / (N_I \cdot I_0) = 2,4 \cdot 10^{10} \cdot \frac{N_\varphi}{N_I} \text{ см/с.}$$

Таким образом, расчетной формулой в нашей работе является

$$c = 2,4 \cdot 10^{10} \cdot \frac{N_\varphi}{N_I} \text{ см/с.} \quad (7).$$

Точное значение скорости света в вакууме равно $c = 299\,792\,458$ м/с.

Экспериментальная часть

1. Подготовить таблицу:

	N_φ	N_I	$c_3 = 2,4 \cdot 10^{10} \cdot N_\varphi / N_I$ см/с	$\Delta c = c_3 - c $	$c = c_3 \pm \Delta c$
1	100				
2	150				
3	200				
<i>Средние значения</i>					

2. Включить установку в сеть.

3. Перевести тумблер в положение «напряжение». Установить значение 100 по шкале прибора.

4. Перевести тумблер в положение «ток» и занести показания прибора в таблицу в колонку N_I .

5. Сделать еще два измерения напряжения и тока и результаты занести в таблицу.

6. Провести необходимые расчеты и заполнить таблицу.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные единицы системы СИ.
2. Назовите основные единицы системы СГС.
3. Назовите основные и производные единицы системы СГСЭ. Какой закон является определяющим для единицы заряда в системе СГСЭ?
4. Как определяется единица тока в системе СГСЭ.
5. Запишите закон, определяющий единицу силы тока в системе СГСМ?
6. Совпадает ли значение тока измеренного в единицах СГСЭ и СГСМ?
7. Как определяется электродинамическая постоянная?
8. Нарисуйте схему для экспериментального определения электродинамической постоянной.
9. Выведите формулу (7).
10. Расскажите о порядке выполнения работы и методе оценки погрешности.

Схема установки

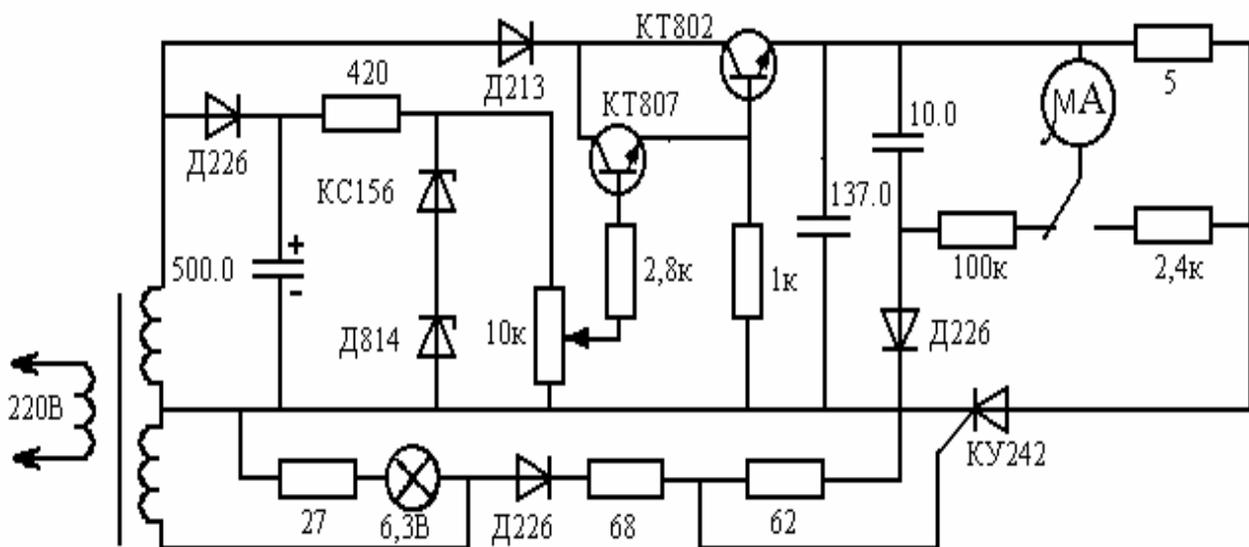


Рис.2.

Принципиальная электрическая схема установки.

Содержание

Лабораторная работа №1. Исследование электростатического поля	3
Краткое теоретическое введение	3
Атомистичность заряда	3
Закон Кулона	3
Единицы измерения электрических зарядов	3
Электростатическое поле	4
Напряженность электростатического поля	4
Суперпозиция полей	4
Силовые линии поля	4
Работа сил поля по перемещению заряда	5
Единицы потенциала	5
Эквипотенциальные поверхности	6
Связь потенциала с напряженностью поля	6
Принцип работы экспериментальной установки	7
Порядок выполнения работы	8
Контрольные вопросы	9
Лабораторная работа №2. Увеличение пределов измерения электроизмерительных приборов	10
Краткое теоретическое введение	10
Условия существования электрического тока	10
Электродвижущая сила	10
Закон Ома	11
Закон Ома в дифференциальной форме	11
Закон Ома для замкнутой цепи	12
Разветвленные цепи. Правила Кирхгофа	12
Теория метода расширения пределов измерения приборов.	12
Измерение силы тока	13
Расчет шунта	13
Расчет добавочного сопротивления	14
Лабораторная установка	14
Экспериментальная часть	15
Контрольные вопросы	17
Лабораторная работа №3 (Вариант 1). Измерение сопротивлений при помощи мостовой схемы	18
Описание установки	18
Порядок выполнения работы.	19
Контрольные вопросы	20
Лабораторная работа №3 (Вариант 2). Измерение сопротивлений с помощью моста Уитстона	21
Теория метода	21
Описание установки	22
Порядок выполнения работы.	23
Контрольные вопросы	24

Лабораторная работа №4. Исследование электровакуумного триода	25
Краткое теоретическое введение	25
Термоэлектронная эмиссия	25
Электровакуумный диод	25
Электровакуумный триод	26
Параметры электровакуумного триода	26
Экспериментальная часть	27
Определение крутизны характеристики	28
Определение внутреннего сопротивления	28
Определение коэффициента усиления	28
Контрольные вопросы	29
Лабораторная работа №5. Изучение работы осциллографа	30
Краткое теоретическое введение	30
Назначение и принцип работы функциональных узлов осциллографа	30
Принцип работы выпрямителя	32
Принцип работы генератора релаксационных колебаний	33
Экспериментальная часть	35
Опыт 1: Изучение работы осциллографа	35
Опыт 2: Изучение работы генератора релаксационных колебаний	36
Опыт 3: Определение потенциалов зажигания и гашения неоновой лампы	37
Опыт 4: Определение длительности сигнала	38
Контрольные вопросы:	38
Лабораторная работа №6. Экспериментальное определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли	39
Краткое теоретическое введение	39
Магнитное поле	39
Закон Био-Савара-Лапласа	40
Поле прямого тока	40
Поле в центре кругового тока	40
Индукция магнитного поля на оси кругового тока	41
Закон полного тока	41
Расчет поля соленоида	42
Элементы земного магнетизма	43
Тангенс-гальванометр	43
Блок-схема установки	44
Порядок работы	44
Контрольные вопросы	45
Лабораторная работа №7. Снятие петли гистерезиса ферромагнетика	46
Краткое теоретическое введение	46
Блок-схема установки	48
Порядок работы	49
Контрольные вопросы	50
Лабораторная работа №8. Определение отношения заряда электрона к его массе методом магнетрона	51
Краткое теоретическое введение	51
Методика измерений	52
Экспериментальная часть	53
Контрольные вопросы	54

Лабораторная работа №9. Определение удельного заряда электрона методом магнитной фокусировки электронного пучка. (Метод Буша).	55
Краткое теоретическое введение	55
Экспериментальная часть	56
Экспериментальная часть	57
Средние значения	58
Контрольные вопросы	58
Лабораторная работа №10. Определение электродинамической постоянной	59
Краткое теоретическое введение	59
Система СГС	59
Абсолютная электростатическая система единиц (СГСЭ)	59
Абсолютная электромагнитная система единиц (СГСМ)	60
Описание экспериментальной установки	60
Экспериментальная часть	62
Средние значения	62
Контрольные вопросы	63
Схема установки	63