

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ордена ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ им. С. П. КОРОЛЕВА

# ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

*Под редакцией доцента Ф. Д. Кочанова*

УТВЕРЖДЕН РЕДАКЦИОННЫМ СОВЕТОМ ИНСТИТУТА  
26 СЕНТЯБРЯ 1969 ГОДА

КУЙБЫШЕВ, 1970

Лабораторный практикум по физике предназначен для студентов второго курса КуАИ. В него включены описания 25 экспериментальных задач, поставленных в учебной лаборатории электричества и магнетизма кафедры физики.

Описание каждой лабораторной работы содержит наряду с постановкой задачи краткую теорию, знакомящую с физической сущностью метода, необходимые сведения о применяемых приборах, достаточно подробные указания о порядке выполнения эксперимента и контрольные вопросы.

Изучая теоретическую часть работы, студент должен воспользоваться хотя бы одним учебным пособием из числа указанных в списке литературы.

Описания лабораторных работ №№ 19, 20, 25 по различным причинам в данное издание не включены.

Пособие составлено руководителем лаборатории электричества и магнетизма доцентом Л. П. Муркиным.

Непосредственное участие в постановке лабораторных работ и написании руководства к ним приняли: Н. М. Волкова (27), П. П. Карпухина (3, 7, 21), Л. А. Кононова (14, 15, 18, 22, 24, 26, 28), Ф. Д. Кочанов (11, 13, 15, 18, 26), Л. П. Муркин (1, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 16, 17, 21, 22, 23, 24, 27, 28), А. А. Мучкаев (5, 8, 9, 16, 17, 23), Н. И. Пугачев (2, 6, 11, 12), С. А. Санталова (1, 2, 4, 6, 8, 10, 14).

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

**Принадлежности:** планшетки с электродами; пантограф; вольтметр; гальванометр; реостат.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Одной из основных характеристик электрического поля является напряженность поля  $\vec{E}$ , определяемая как отношение силы  $\vec{F}$ , действующей на внесенный в поле положительный заряд  $q$ , к величине этого заряда, т. е.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} . \quad (1)$$

Другой важной характеристикой поля является потенциал  $\varphi$ . В отличие от напряженности поля, потенциал не определяется однозначно для какой-либо точки поля. Мы можем найти лишь разность потенциалов между двумя точками поля, которая численно равна работе, совершаемой силами поля при перемещении единицы положительного заряда из одной точки в другую, т. е.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q} . \quad (2)$$

Поэтому потенциалу произвольной точки поля всегда можно приписать любое, наперед выбранное, значение. Если это сделано, то значения потенциала во всех остальных точках поля определяются однозначно с помощью уравнения (2).

Между напряженностью поля и потенциалом существует простая связь, а именно:

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi = -\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{k}\right) . \quad (3)$$

Итак, реально существующему электрическому полю можно поставить в соответствие два взаимосвязанных математических

поля. Одно из них — векторное поле напряженности  $\vec{E}$ , другое — скалярное поле потенциала  $\varphi$ .

Для графического изображения этих полей вводятся понятия силовой линии и эквипотенциальной поверхности. Силовой линией поля называется линия, касательные к которой в каждой ее точке совпадают по направлению с вектором  $\vec{E}$  в тех же точках.

Совокупность силовых линий определяет векторное поле  $\vec{E}$ .

Эквипотенциальной поверхностью называется геометрическое место точек поля, в которых потенциал имеет одно и то же значение. В частности, поверхность каждого заряженного проводника является эквипотенциальной поверхностью. Совокупность эквипотенциальных поверхностей определяет скалярное поле  $\varphi$ .

Согласно уравнению (3) силовые линии образуют систему линий, ортогональных к эквипотенциальным поверхностям. Для нахождения напряженности поля в какой-либо точке силовой линии спроектируем уравнение (3) на направление силовой линии.

Получим

$$E_e = -\frac{d\varphi}{de}, \quad (4)$$

где  $de$  — элемент длины силовой линии, на которой потенциал изменяется на величину  $d\varphi$ ,  $E_e$  — проекция вектора напряженности поля на направление силовой линии.

Согласно определению силовой линии  $E_e = E$ .

Соотношение (4), выраженное в конечных разностях, т. е. представленное в виде

$$E_{cp} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l}, \quad (5)$$

может быть использовано для расчета среднего значения напряженности поля, если известно положение эквипотенциальных поверхностей.

На рис. 1 показан пример расположения эквипотенциальных поверхностей (сплошные линии) и силовых линий (пунктир) плоского поля диполя. Средняя напряженность поля, например, на участке АВ равна

$$E_{A-B} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta l} = \frac{\varphi_n - \varphi_{n+1}}{\Delta l}.$$

Введение понятия потенциала значительно облегчает решение задач электростатики, т. к. определение векторного поля напряженно-

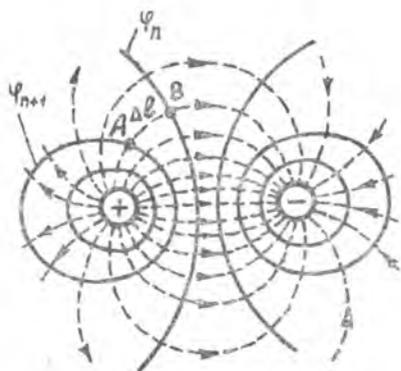


Рис. 1.

сти  $\vec{E}$  сводится к нахождению поля скаляра  $\varphi$ . С другой стороны, экспериментальное определение потенциала оказывается значительно проще, чем измерение напряженности поля, т. к. большинство приборов, пригодных для изучения полей, измеряют разности потенциалов, а не напряженность поля.

Целью данной работы является экспериментальное изучение распределения потенциала в плоском электростатическом поле (т. е. в стационарном электрическом поле, образованном неподвижными зарядами), а также построение системы силовых линий с использованием свойства ортогональности.

### **Зондовый метод исследования электростатического поля**

Сущность зондового метода заключается в следующем: в исследуемую точку поля вводится дополнительный электрод-зонд, который соединен с прибором, измеряющим приобретенный зондом потенциал относительно какой-либо точки поля, выбранной за начало отсчета. При этом необходимо обеспечить такие условия, чтобы потенциал зонда действительно равнялся потенциалу той точки поля, куда он помещен, и, кроме того, необходимо, чтобы зонд своим присутствием минимально искажал поле. В общем случае эта задача является весьма сложной. Поэтому часто прямое изучение электростатического поля заменяется изучением его модели. Оказывается, что такой моделью может служить поле постоянного тока в некоторой среде между системой проводников при условии, что потенциалы проводников поддерживаются постоянными. В этом случае распределение потенциалов в проводящей среде является тождественным с распределением потенциалов в электростатическом поле между теми же электродами, если поместить их в вакуум или в однородный диэлектрик.

Указанная замена поля неподвижных зарядов полем стационарного тока дает большие экспериментальные преимущества: так, вводимые в проводящую среду металлические зонды автоматически приобретают потенциал того места поля, в которое они помещены. При этом, потенциал зонда легко можно измерить с помощью несложной токоизмерительной аппаратуры. Этот метод широко применяется при изучении сложных электростатических полей в радиолампах, электростатических линзах, фотоэлектронных умножителях, ионных космических двигателях и т. д.

На практике наибольшее распространение получило моделирование полей в электролитической ванне, где проводящей средой является электролит (проводник второго рода), и моделирование полей на электропроводной бумаге, когда проводящей средой является графитизированная бумага (проводник первого рода).

В данной работе использован последний метод моделирования.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки.

На пластинке 1 закреплен лист электропроводной бумаги. Электроды 2' и 2'', изготовленные из медной фольги, приклеены к бумаге электропроводящим клеем. Потенциал зонда 3 относительно электрода 2'' устанавливается с помощью потенциометра 4 и контролируется вольтметром V.

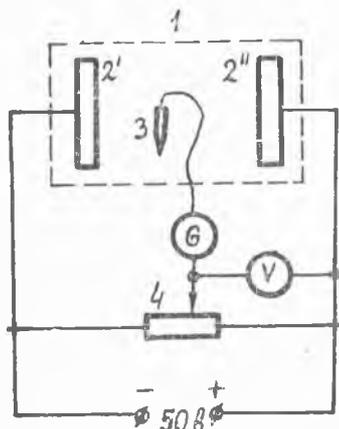


Рис. 2.

В цепь зонда включен гальванометр Г с двухсторонней шкалой. Если зонд находится в точке поля, потенциал которой равен потенциалу, установленному на движке потенциометра, то ток в цепи зонда и гальванометра будет отсутствовать. Геометрическое место всех таких точек образует эквипотенциальную поверхность в исследуемом поле.

Фиксирование положения и формы определяемой экспериментально эквипотенциальной линии производится на чистом листе

бумаги, закрепленном в специальных зажимах рядом с планшеткой. Для этой цели применяется специальный параллелограммный механизм-пантограф. Пантограф устроен таким образом, что траектория движения его ведущего конца, на котором установлен зонд, точно воспроизводится фиксатором пантографа с некоторым постоянным коэффициентом подобия. Конструктивно фиксатор выполнен в виде иглы с пружиной, которая закреплена на одном из рычагов пантографа. Если после нахождения каждой точки эквипотенциальной поверхности нажимать на иглу фиксатора, то на чистой бумаге, закрепленной под иглой, будут оставаться отметки. Соединяя эти отметки плавной линией, мы воспроизведем на бумаге геометрическую форму и размеры сечения эквипотенциальной поверхности.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему согласно рис. 2.
2. Укрепить на подставке рядом с планшеткой лист чистой бумаги.
3. Не включая схемы, перенести на бумагу с помощью пантографа сечения заранее известных эквипотенциальных поверхностей электродов.
4. Включить схему и приступить к определению эквипотенциальных поверхностей. Методика выполнения настоящего пункта следующая:

а) с помощью потенциометра установить потенциал зонда, равный  $5 \text{ в}$ ;

б) перемещая зонд вдоль линии, соединяющей электроды по оси симметрии, найти такое его положение, при котором ток, проходящий через гальванометр, равен нулю;

в) отметить соответствующую точку иглой пантографа на бумаге;

г) для нахождения следующей точки принимаем в качестве первого приближения, что искомая эквипотенциальная поверхность эквидистантна предыдущей, в данном случае — поверхности электрода. Перемещаем зонд вдоль предполагаемой эквипотенциальной поверхности на расстоянии  $15\text{--}20 \text{ мм}$ , а затем, движением зонда поперек этой предполагаемой поверхности, находим новую точку искомой эквипотенциальной поверхности; аналогичным образом находятся остальные точки эквипотенциальной поверхности;

д) соединить полученные точки на бумаге плавной кривой, записав около нее значение потенциала;

е) увеличить потенциал зонда примерно на  $5 \text{ в}$  и найти новую эквипотенциальную поверхность, руководствуясь пп. 4б—4д, затем снова увеличить потенциал зонда на  $5 \text{ в}$  и т. д., пока не будет снята полная картина распределения эквипотенциальных поверхностей в рассматриваемом поле.

Следует иметь в виду, что указанный выше шаг между эквипотенциальными поверхностями ( $5 \text{ в}$ ) является ориентировочным. В зависимости от характера поля, определяемого формой электродов, этот шаг можно изменять в ту или другую сторону.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Полученную на бумаге графическую картину распределения эквипотенциальных поверхностей следует дополнить силовыми линиями, пользуясь свойством ортогональности. При окончательной доработке графика необходимо принимать во внимание симметрию данной системы электродов, а следовательно, и поля.

2. Найти распределение напряженности поля вдоль оси симметрии электродов, которая является также силовой линией.

Для этого случая значение напряженности поля в точке, расположенной посредине между соседними эквипотенциальными поверхностями, может быть рассчитано по уравнению (5):

$$E_{\text{ср}} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta x},$$

где  $\Delta\varphi$  — разность потенциалов двух соседних эквипотенциальных поверхностей, полученных экспериментально;  $\Delta x$  — расстояние между ними по оси симметрии.

Поскольку в данной работе коэффициент подобия пантографа

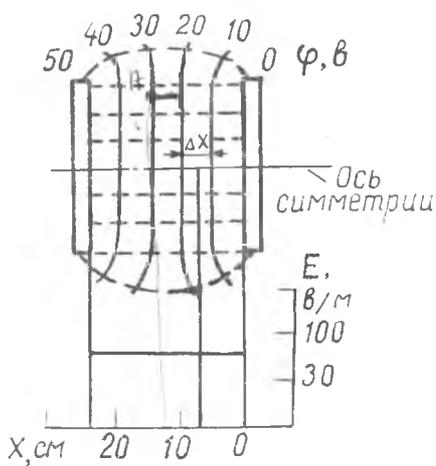


Рис. 3.

равен 1:2, то все линейные размеры, снимаемые с графика для расчета напряженности поля, следует умножать на 2.

3. Построить график зависимости напряженности поля вдоль оси симметрии системы электродов от продольного расстояния. Пример оформления результатов эксперимента приведен на рис. 3.

### Контрольные вопросы

1. Нарисуйте картину силовых линий плоского конденсатора, внутри которого находится металлический или диэлектрический шарик.

2. В чем состоит сходство между электростатическим и гравитационным полем? Чем они отличаются?

3. Напряженность  $E$  электрического поля в данной точке равна нулю. Равен ли нулю в этой точке и потенциал?

4. Электрический заряд  $q$  перемещается от одной эквипотенциальной поверхности ( $\varphi_1$ ) до другой, потенциал которой равен  $\varphi_2$ , двумя способами — по нормали и по винтовой линии. В каком случае работа перемещения заряда будет больше?

5. Начертите схему установки, используемой в данной работе, и объясните ее действие.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, Л. Б. Милковская. Курс физики, т. 2, «Высшая школа», §§ 2—1, 2—3, 3—2, 3—3. М. 1964.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

**Принадлежности:** исследуемые жидкие диэлектрики; сосуды с исследуемыми жидкостями, в крышки которых вмонтированы конденсаторы; магазин емкостей; мост переменного тока.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Как известно, сила взаимодействия между точечными электрическими зарядами  $q_1$  и  $q_2$  выражается законом Кулона

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

где  $K$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от выбора системы единиц и свойств среды, разделяющей заряды. Его численное значение определяется экспериментально.

В системе единиц СИ полагают

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{\epsilon} \quad (2)$$

и закон Кулона записывают в таком виде:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}. \quad (3)$$

Коэффициент  $\epsilon_0$  называют электрической постоянной. Его численное значение не зависит от свойств среды, в которой взаимодействуют заряды; экспериментально определено, что

$$\epsilon_0 = \frac{1}{3,6 \cdot 10^{10} \pi} \frac{\text{кулон}^2}{\text{ньютон} \cdot \text{м}^2} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{фарада}}{\text{метр}}$$

Величина  $\epsilon$ , называемая относительной диэлектрической проницаемостью, характеризует влияние среды, в которой взаимодействуют заряды.

Для вакуума  $\epsilon=1$ . Для любой другой среды  $\epsilon>1$ . Следовательно, как это видно из (3), величина  $\epsilon$  показывает, во сколько раз сила взаимодействия двух точечных зарядов в данной среде меньше, чем в вакууме.

Физический смысл диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  выясняется в теории поляризации диэлектриков (см., например, Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, Л. Б. Милковская, курс физики, т. 2, гл. VI). Здесь же мы только отметим, что величина  $\epsilon$  является одной из основных характеристик электрических свойств диэлектриков и поэтому экспериментальное определение ее представляет очень важную практическую задачу.

В данной работе экспериментально определяется относительная диэлектрическая проницаемость некоторых жидких диэлектриков. Метод основан на сравнении емкости  $C_{\text{ср}}$  конденсатора, между пластинами которого находится диэлектрик, с емкостью этого же конденсатора, когда он находится в воздухе. Строго говоря, вторично нужно было бы измерить емкость конденсатора не в воздухе, а в вакууме, так как

$$\epsilon = \frac{C_{\text{ср}}}{C_{\text{вак}}}.$$

Но для воздуха при нормальных условиях  $\epsilon=1,0006$ , а поэтому можно практически принять, что

$$\epsilon = \frac{C_{\text{ср}}}{C_{\text{возл}}}.$$

Неточность в определении  $\epsilon$ , обусловленная таким допущением, значительно меньше погрешностей, обусловленных несовершенством применяемых в данной работе приборов.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Исследуемый диэлектрик находится в сосуде, внутри которого смонтирован плоский конденсатор (рис. 1). Обкладки конденсатора соединены с клеммами на боковой стенке сосуда. Последний можно перевертывать так, что в зависимости от его положения пластины конденсатора будут находиться либо в жидком диэлектрике, либо в воздухе.

Для измерения емкости конденсатора в этих двух положениях применяется мостиковая схема на переменном токе, которая смонтирована отдельно на горизонтальной панели. Мост состоит из двух конденсаторов — исследуемого  $C_x$  и эталонного  $C_{\text{эт}}$ , и двух сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  (рис. 2). В качестве эталонного конденсатора применен магазин емкостей. К точкам 1 и 2 подключается переменное напряжение. Если потенциалы в точках А и В равны,

что может быть установлено по отсутствию тока в гальванометре  $G$ , то между сопротивлениями моста существует следующая связь:

$$R_{c_x} = R_{c_{\text{эт}}} \frac{R_1}{R_2}, \quad (10)$$

где  $R_{c_x}$  и  $R_{c_{\text{эт}}}$  — емкостные сопротивления соответственно исследуемого и эталонного конденсаторов.

В нашем случае:

$$R_{c_x} = \frac{1}{\omega C_x}; R_{c_{\text{эт}}} = \frac{1}{\omega C_{\text{эт}}}. \quad (11)$$

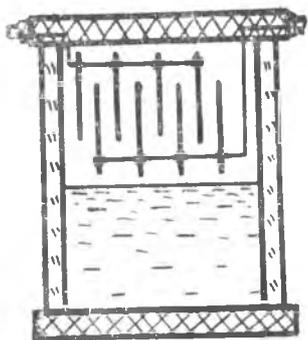


Рис. 1.

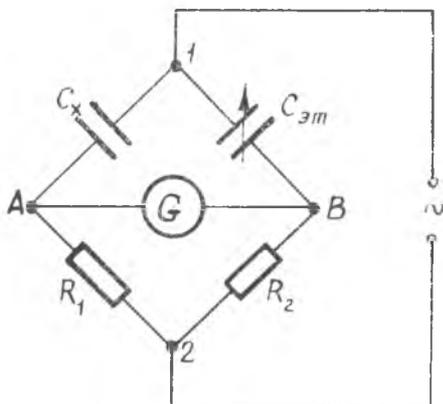


Рис. 2.

Подставив значения  $R_{c_x}$  и  $R_{c_{\text{эт}}}$  в последнюю формулу, мы получим соотношение между емкостями конденсаторов и сопротивлениями моста в виде

$$C_x = C_{\text{эт}} \frac{R_2}{R_1}. \quad (12)$$

В данной установке  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{1}{3}$  ( $R_1 = 9000 \text{ ом}$ ,  $R_2 = 3000 \text{ ом}$ ), следовательно,

$$C_x = \frac{C_{\text{эт}}}{3}. \quad (13)$$

Таким образом, методика измерения емкости неизвестного конденсатора сведена к простой операции. В схему подключается от звукового генератора переменное напряжение и на эталонном магазине подбирается такая емкость  $C_{\text{эт}}$ , чтобы ток в гальванометре отсутствовал (или был минимальным). Так как в схеме используется переменный ток, то непосредственно к точкам  $A$  и  $B$  подключить гальванометр постоянного тока нельзя. К этим точкам подключена система из четырех полупроводниковых диодов ДГЦ-27, а уже от нее ток подается к измерительному прибору. На этой же панели смонтирован генератор переменного тока

звуковой частоты. Питание генератора (переменное напряжение 6 вольт и постоянное напряжение 250 вольт) подводится от щита лабораторного стола. На панели установлены клеммы с соответствующими надписями для включения конденсатора  $C_x$  и магазина с эталонными емкостями  $C_{эт}$ . Полная схема установки дана на рис. 3.

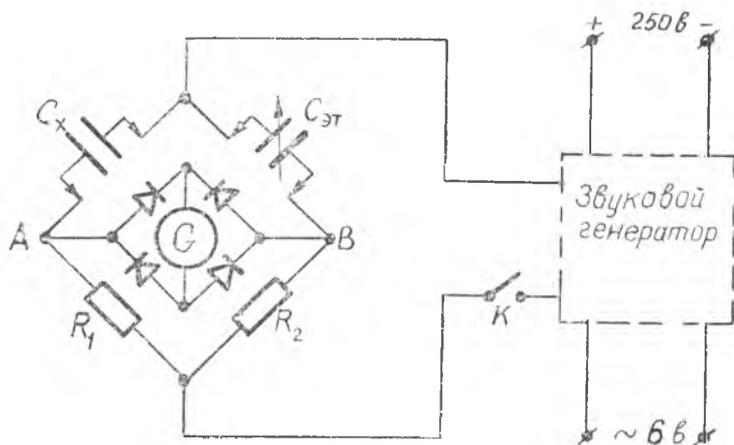


Рис. 3.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Подключить к измерительной панели конденсаторы  $C_x$ ,  $C_{эт}$  и питание к звуковому генератору.

2. Измерить емкость конденсатора  $(C_x)_{жидк.}$ , когда он погружен в исследуемую жидкость. Для этого тумблером  $K$  подключают переменное напряжение звуковой частоты к мосту и вращением рукоятки магазина с « $\times 0,0001$ » добиваются минимального тока в гальванометре. Остальные декады магазина предварительно следует установить на нуль. Если рукоятки плавной регулировки емкости не хватает для балансировки моста, то нужно включить первую декаду.

3. Перевернуть сосуд с конденсатором так, чтобы жидкость заполнила нижнюю часть сосуда. Измерить емкость конденсатора с воздушным диэлектриком —  $(C_x)_{возд.}$ .

4. Повторить указанные в пп. 2, 3 измерения до трех раз.

5. Найти значения  $(C_x)_{жидк.}$  и  $(C_x)_{возд.}$  двух других жидкостей.

## СБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Рассчитать емкости конденсаторов  $(C_x)_{\text{жидк.}}$  и  $(C_x)_{\text{возд.}}$  по формуле

$$C_x = \frac{C_{\text{шк}} + C_0}{3}, \quad (14)$$

где  $C_{\text{шк}}$  — емкость, определяемая по шкалам магазина емкостей;  
 $C_0$  — корпусная емкость магазина.

Величина  $C_0$  указана на табличке магазина.

2. Определить относительную диэлектрическую проницаемость данной жидкости для каждого измерения по формуле

$$\varepsilon = \frac{(C_x)_{\text{жидк.}}}{(C_x)_{\text{возд.}}}. \quad (15)$$

3. По данным трех измерений найти среднее значение относительной диэлектрической проницаемости для каждой жидкости.

4. Результаты всех измерений и расчетов записать в таблицу 1 по прилагаемой форме.

Таблица 1

Наименование жидкости	№ опыта	$(C_x)_{\text{жидк.}}$ , <i>пкф</i>	$(C_x)_{\text{возд.}}$ , <i>пкф</i>	$\varepsilon$	$\varepsilon_{\text{ср}}$

### Контрольные вопросы

1. Объясните, какой физический смысл имеет диэлектрическая проницаемость  $\varepsilon$ .
2. Начертите электрическую схему установки, используемой в данной работе.
3. Как будет влиять на результаты опыта изменение частоты тока в рабочей схеме данной установки?
4. Почему электрическая емкость конденсатора зависит от величины  $\varepsilon$  диэлектрика, разделяющего его пластины? Выведите формулу емкости плоского конденсатора.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, Л. Б. Милковская. Курс физики. т. II, изд. «Высшая школа», стр. 7—14; 75—84, М., 1960.

## ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОСТА ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Принадлежности:** мост постоянного тока МО-47; измеряемые сопротивления; переменное сопротивление; реохорд; гальванометр; нажимной ключ.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Измерительный мост постоянного тока, называемый также мостом Уитстона, представляет собой четырехполюсник, состоящий из сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  (рис. 1). В одну диагональ моста включается постоянное напряжение, в другую — индикатор нуля  $G$  (гальванометр). Сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  обычно называют плечами моста.

Характерной особенностью измерительного моста является то, что при определенном соотношении между сопротивлениями, составляющими его, ток через гальванометр оказывается равным нулю. Это соотношение легко найти, если записать уравнения второго правила Кирхгофа для контуров ACDA и CBDC при условии, что ток через гальванометр отсутствует:

$$\begin{aligned} I_1 R_1 - I_2 r_1 &= 0; \\ I_1 R_2 - I_2 r_2 &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Поделив первое уравнение этой системы на второе, имеем:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{r_1}{r_2}. \quad (2)$$

Соотношение (2) может служить для отыскания любого из четырех сопротивлений, если известны остальные три.

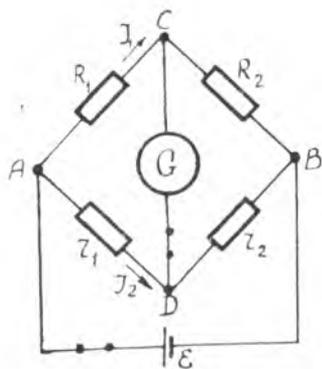


Рис. 1.

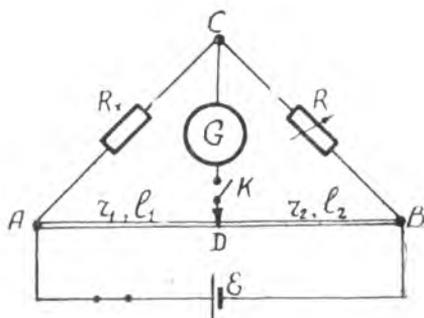


Рис. 2.

### Упражнение 1. Измерение сопротивлений с помощью моста Уитстона

На рис. 2 представлена схема моста Уитстона, используемая в данном упражнении. На этой схеме  $R_x$  — неизвестное сопротивление,  $R$  — переменное сопротивление,  $\kappa$  — нажимной ключ.

Сопротивления  $r_1$  и  $r_2$  являются участками длинной проволоки (реохорда), натянутой вдоль миллиметровой шкалы. Соединение реохорда с гальванометром (точка D) осуществляется с помощью контактного движка, скользящего вдоль реохорда. В этом случае

$$r_1 = \rho \frac{l_1}{s}; \quad r_2 = \rho \frac{l_2}{s}, \quad (3)$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление материала реохорда,  $l_1$  — длина участка AD,  $l_2$  — длина участка DB,  $s$  — сечение реохорда.

Так как реохорд калиброван, т. е.  $\rho = \text{const}$  и  $S = \text{const}$  по его длине, то из уравнений (3) следует, что

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{l_1}{l_2}, \quad (4)$$

причем соотношение (2) можно записать так:

$$\frac{R_x}{R} = \frac{l_1}{l_2},$$

откуда

$$R_x = R \frac{l_1}{l_2}. \quad (5)$$

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ УПРАЖНЕНИЯ

1. Собрать схему моста согласно рис. 2.
2. Уравновесить мост. Эту операцию следует производить в следующей последовательности:

- а) установить контактный движок на середину реохорда;
- б) включить питание схемы;
- в) изменяя величину переменного сопротивления, добиться наименьшего отклонения стрелки гальванометра от нуля (при этом гальванометр в схему следует включать на короткое время, так как в процессе предварительной настройки через него может идти значительный ток);
- г) путем перемещения движка реохорда окончательно уравновесить мост.

3. Произвести измерения каждого из двух неизвестных сопротивлений не менее трех раз. При повторных измерениях нужно изменять величину переменного сопротивления на одну ступень в большую или меньшую сторону.

4. Полученные результаты занести в таблицу 1 по прилагаемой форме.

Таблица 1

<i>N</i> сопротивл.	<i>N</i> опыта	<i>R</i> , ом	<i>l</i> <sub>1</sub> , мм	<i>l</i> <sub>2</sub> , мм	<i>R</i> <sub>х</sub> , ом

### Обработка результатов измерений

1. Найти величины неизвестных сопротивлений по формуле (5).
2. Определить среднее арифметическое ряда измерений каждого сопротивления и сделать приближенную оценку допущенных ошибок. Результаты расчетов записать в таблицу 1.

### У п р а ж н е н и е 2. Определение сопротивлений с помощью моста постоянного тока МО-47. Описание схемы и конструкции прибора

Мост постоянного тока предназначен для точных измерений омических сопротивлений в пределах от 10 до 10<sup>6</sup> ом. Класс точности моста — 0,1. Упрощенная схема моста МО-47 представлена на рис. 3.

Плечи моста *A* и *B* представляют собой штепсельные магазины сопротивлений. Установка определенного соотношения между плечами *A* и *B* осуществляется с помощью специального коммутатора, расположенного на верхней панели прибора.

Плечо *R* выполнено в виде рычажного магазина сопротивлений, имеющего пять декад.

В четвертое плечо моста включается неизвестное сопротивление *X*. Схема питается от источника постоянного тока *B*, кото-

рый подключается к одной из диагоналей моста с помощью ключа  $K_2$ . Для уравнивания моста используется внешний гальванометр  $\Gamma$ , подключаемый к схеме с помощью ключа  $K_1$ .

Так как схема моста в принципе ничем не отличается от схемы, рассмотренной в предыдущих разделах, то при равновесии моста остается справедливым соотношение (2), которое в обозначениях рис. 3 имеет вид

$$\frac{B}{R} = \frac{A}{X}, \text{ откуда } X = \frac{A}{B} R. \quad (6)$$

Таким образом, установив соотношение плеч  $\frac{A}{B}$  и уравнив мост с помощью сопротивления  $R$ , можно найти неизвестное сопротивление  $X$  по формуле (6).

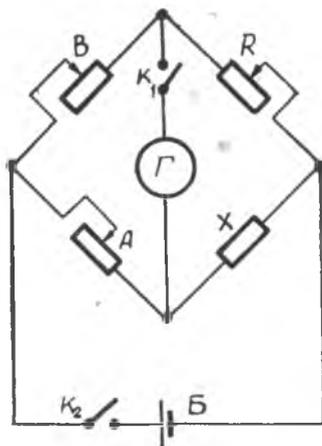


Рис. 3.

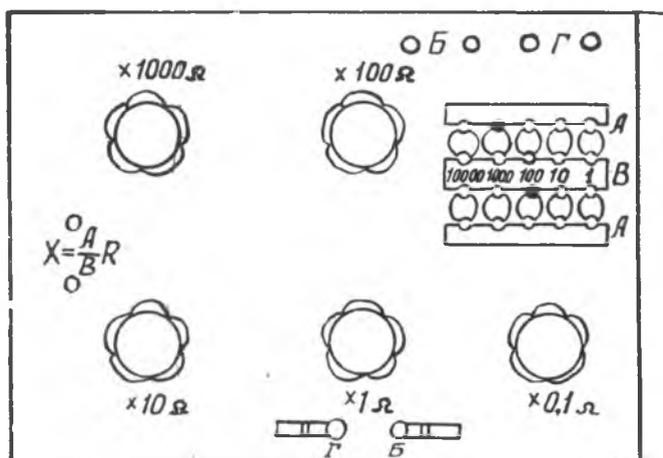


Рис. 4.

Все узлы прибора смонтированы в деревянном корпусе, закрытом панелью. На панели установлены:

1. Клеммы для подключения источника постоянного тока и гальванометра, обозначенные соответственно «Б» и «Г».
2. Зажимы «X» для подключения неизвестного сопротивления.
3. Пять ручек управления декадами переменного сопротивления, обозначенные «x1000», «x100», «x10», «x1», «x0.1».

4. Ключи «Г» и «Б», с помощью которых к схеме подключают соответственно гальванометр и источник питания.

5. Коммутатор для установки соотношения плеч  $\frac{A}{B}$ . Он состоит из трех контактных пластин и десяти круглых контактов, расположенных между пластинами в два ряда. Соединение контактов с контактными пластинами производится с помощью двух штекеров, которые устанавливаются в соответствующие гнезда: один штекер соединяет пластину  $A$  с каким-либо из контактов верхнего ряда, другой штекер соединяет пластину  $B$  с каким-либо из контактов нижнего ряда. В этом случае отношение  $\frac{A}{B}$  равно отношению цифр, нанесенных на пластине  $B$  против гнезд, в которых установлены штекеры. Например, отношение  $\frac{A}{B}$  для положения штекеров, указанного на рис. 4, равно 10.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ УПРАЖНЕНИЯ

1. Подключить к мосту источник питания, гальванометр и одно из неизвестных сопротивлений.

2. Установить на коммутаторе плечи моста  $A$  и  $B$ . Пока величина сопротивления неизвестна, соотношение плеч выбирается равным 1. В этом случае штекеры устанавливаются в гнезда с надписью 1000.

3. Вращением рукояток декадных сопротивлений добиться отсутствия тока через гальванометр. При этом следует сначала подключить к мосту питание путем замыкания ключа «Б», а затем уже подключать гальванометр — кратковременным нажатием на ключ «Г». В этом случае величина неизвестного сопротивления будет равна отсчету по декадам.

4. Для определения точного значения сопротивления следует повторить измерения несколько раз, каждый раз с новым соотношением плеч  $A$  и  $B$ , выбираемым по таблице, которая приведена на внутренней стороне крышки прибора, и сделать соответствующую оценку допустимой погрешности.

5. Произвести измерения другого неизвестного сопротивления.

6. Измерить величину этих же сопротивлений при последовательном, а затем при параллельном соединении. Полученные результаты записать в таблицу 2 по прилагаемой форме.

7. Сравнить результаты измерений с расчетными данными, полученными по формулам:

$$R_{\text{послед.}} = R_1 + R_2; \quad (7)$$

$$\frac{1}{R_{\text{парал.}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (8)$$

$N$ сопр.	$R$ , ом	$A$	$B$	$R_x$ , ом	
					$R$ посл. расч.
Последовательное соединение					
Параллельное соединение					$R$ парал. расч.

### Контрольные вопросы

1. Начертите электрическую схему моста Уитстона и выведите расчетную формулу для определения неизвестного сопротивления.
2. Применимы ли правила Кирхгофа для цепей переменного тока?
3. Выведите формулу относительной погрешности для  $R_x$  и определите, при каком положении движка на реохорде погрешность измерения будет наименьшей.
4. Какой гальванометр применяется в схеме моста Уитстона?

### ЛИТЕРАТУРА

1. Физический практикум, под редакцией В. И. Ивероновой. Задача 69. Физматгиз, 1968.
2. Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, Л. Б. Милковская. Курс физики, т. 2, стр. 138, издательство «Высшая школа», 1964.

## ГРАДУИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ВОЛЬТМЕТРА ПО АБСОЛЮТНОМУ ЭЛЕКТРОМЕТРУ

**Принадлежности:** абсолютный электрометр, изготовленный на основе технических весов I класса; источник регулируемого высоковольтного напряжения типа ИВН-1; электростатический вольтметр типа С95.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Приборы, позволяющие проводить измерения разности потенциалов без предварительной градуировки, называются абсолютными электрометрами. В данной работе представлен абсолютный электрометр, действие которого основано на явлении взаимного притяжения пластин заряженного плоского конденсатора.

Найдем силу  $f$  действия поля положительно заряженной пластины на отрицательно заряженную пластину конденсатора. Для этого можно воспользоваться уравнением

$$f = qE, \quad (1)$$

где  $q$  — заряд отрицательно заряженной пластины,  $E$  — напряженность поля, создаваемая положительно заряженной пластиной. Заряд пластины конденсатора определяется по формуле

$$q = C(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (2)$$

где  $C$  — емкость конденсатора,  $\varphi_2 - \varphi_1$  — разность потенциалов между пластинами.

Напряженность поля, создаваемая одной пластиной, равна половине напряженности поля конденсатора, т. е.

$$E = \frac{1}{2} \cdot \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{d}, \quad (3)$$

где  $d$  — расстояние между пластинами.

Подставляя выражение (2) и (3) в уравнение (1), получим

$$f = \frac{C(\varphi_2 - \varphi_1)^2}{2d}. \quad (4)$$

Очевидно, что такая же сила действует и на положительно заряженную пластину конденсатора.

Используя выражение для емкости плоского конденсатора

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \quad (5)$$

где  $S$  — площадь пластин;

$\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между пластинами;

$\epsilon_0$  — электрическая постоянная ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  ф/м),  
уравнение (4) можно записать в виде

$$f = \frac{\epsilon \epsilon_0 S (\varphi_2 - \varphi_1)^2}{2d^2}, \quad (6)$$

откуда

$$\varphi_2 - \varphi_1 = d \sqrt{\frac{2f}{\epsilon \epsilon_0 S}}, \quad (7)$$

или, окончательно,

$$u = \frac{d}{D} \sqrt{\frac{8f}{\pi \epsilon \epsilon_0}}, \quad (8)$$

где введено обозначение  $\varphi_2 - \varphi_1 = U$ , а площадь пластин, имеющих форму круглых дисков, выражена через их диаметр  $D$ .

Формула (8) показывает возможность проведения абсолютных измерений разности потенциалов путем измерения силы взаимного притяжения пластин конденсатора. В абсолютном электрометре эта сила измеряется с помощью чувствительных рычажных весов, одна из чашек которых заменена пластиной конденсатора.

Целью настоящей работы является градуирование электростатического вольтметра по абсолютному электрометру, т. е. установление связи между показаниями вольтметра и величиной приложенного к нему напряжения.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В комплект установки (рис. 1) входят: абсолютный электрометр  $I$ , источник высоковольтного напряжения  $10$  и электростатический вольтметр  $6$ , которые смонтированы на общем основании.

Главной частью электрометра является плоский конденсатор, состоящий из неподвижной пластины  $14$  и подвижной пластины  $12$ . В одной плоскости с пластиной  $12$  находится неподвижное кольцо  $13$ . Между пластиной  $12$  и кольцом  $13$  имеется зазор. Эле-

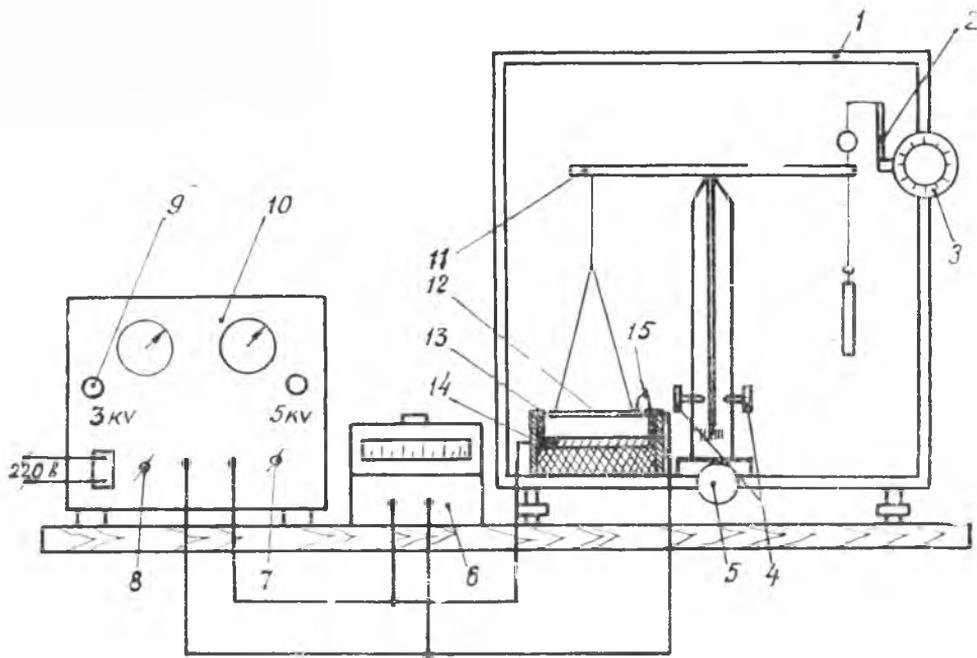


Рис. 1.

ктрическая связь кольца и пластины осуществляется посредством тонкой проволочки 15.

Если зарядить конденсатор до какой-либо разности потенциалов, то электрическое поле между пластинами 12 и 14 будет однородно, так как искажение поля заметно сказывается только у внешних краев кольца и пластины 14. Такое кольцо, обеспечивающее однородность электрического поля в плоском конденсаторе, называется охранным.

Подвижная пластина 12 подвешена к коромыслу 11 технических весов. На другое плечо коромысла можно подвешивать разновески от 10 мг до 990 мг с помощью манипулятора 2. Ручки управления 3 манипулятором выведены на переднюю панель электрометра. Наружная ручка устанавливает сотни мг, внутренняя — десятки мг.

Величина использованных разновесок при некотором положении ручек определяется числом, образованным из цифр, которые нанесены на ручках манипулятора против указательной стрелки.

Ограничение хода весов обеспечивается упорными винтами 4. Ручка 5, расположенная в нижней части электрометра, служит для арретирования коромысла 11.

Высокое напряжение к конденсатору электрометра подводится от источника высоковольтного напряжения 10. На передней

панели источника размещены выходные клеммы высокого напряжения, вход питания от сети 220 в и ручки управления прибором. Включение прибора производится путем поворота специального ключа 8. Тумблер 7 служит для включения блока высокого напряжения прибора. Регулировка высокого напряжения производится ручкой 9. Параллельно конденсатору электрометра включен электростатический вольтметр 6, подлежащий градуировке.

**Внимание!** В работе используется высокое напряжение до 3 кв, опасное для жизни. Поэтому необходимо тщательно соблюдать правила техники безопасности. Все действия с электрометром: установку разновесок манипулятором и арретирование коромысла— следует производить плавно и медленно во избежание срыва коромысла с приз и замыкания пластин конденсатора.

### Категорически запрещается:

1. Включать установку без предварительной проверки ее преподавателем.
2. Открывать дверцы электрометра и производить там какие-либо регулировочные работы.
3. Изменять монтажную схему установки.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. После проверки исправности установки преподавателем включить установку в сеть 220 в.
2. Включить источник высоковольтного напряжения ключом 8 (рис. 1):
3. Через 2—3 минуты, после прогрева источника, включить блок высокого напряжения тумблером 7. При этом загорается красная лампочка на передней панели прибора, а контрольный вольтметр показывает наличие напряжения на выходе источника.
4. Установить ручками манипулятора 3 наименьшую величину нагрузки согласно таблице 1.

Таблица 1

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7
Нагрузка, мг	50	100	200	300	400	500	600

5. Медленным поворотом ручки 5 освободить коромысло электрометра.
6. Плавно увеличивать напряжение ручкой 9, одновременно наблюдая за положением стрелки электрометра. Зафиксировав момент отрыва стрелки от левого упорного винта 4, записать соответствующее показание вольтметра, после чего уменьшить напряжение поворотом ручки 9 влево до упора.

7. Провести повторное измерение согласно п. 6.

8. Арретировать электрометр плавным поворотом ручки 5.

Увеличить нагрузку на правое плечо коромысла в соответствии с таблицей 1.

9. Провести градуировочные измерения при новой нагрузке согласно пп. 5—6.

10. Измерения производятся до тех пор, пока не будет пройдена вся шкала вольтметра.

После окончания измерений необходимо немедленно выключить блок высокого напряжения тумблером 7, арретировать электрометр и полностью снять нагрузку с коромысла.

11. Результаты измерений записать в таблицу 2 по прилагаемой форме.

Таблица 2

№ п/п	$f$ , мг	$u'$ , вольт	$u''$ , вольт	$u_{\text{ср}}$ , вольт	$u_{\text{расч}}$ , вольт

Здесь  $U'$  и  $U''$  — показания электростатического вольтметра при постоянной нагрузке (соответствующей пп. 6, 7), а

$$u_{\text{ср}} = \frac{u' + u''}{2}$$

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Рассчитать значения разности потенциалов на пластинах по формуле (8). При проведении расчетов следует учесть, что сила  $f$  в формуле (8) должна быть выражена в ньютонах. Значения  $d$  и  $D$  приведены на панели установки.

2. Результаты расчетов занести в таблицу. 2.

3. Построить градуировочную кривую вольтметра, т. е. зависимость

$$u_{\text{расч.}} = f(u_{\text{ср.}})$$

### Контрольные вопросы

1. Как устроен абсолютный электрометр? Почему он называется абсолютным?

2. Чем замечателен электростатический вольтметр?

3. Что является носителем энергии в плоском конденсаторе, заряды или поле?

4. Вычислите силу, действующую на каждую из пластин плоского конденсатора, если разность потенциалов между пластинами 100 в, расстояние между пластинами  $d = 10$  см и на каждой из них находится заряд  $[q] = 2 \cdot 10^{-6}$  к.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, Л. Б. Милковская. Курс физики, т. 2, §§ 5, 4, М., 1964.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ИСТОЧНИКА ТОКА МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ

**Принадлежности:** нормальный элемент Вестона; исследуемый элемент; гальванометр; реохорд; двойной ключ; перекидной двухполюсный переключатель; потенциометр типа Р-300.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

**Электродвижущая сила источника тока.** Если два заряженных до различных потенциалов тела соединить проводником, то под действием электрического поля в проводнике возникнет направленное движение зарядов, т. е. электрический ток. Наличие тока в проводнике приводит к выравниванию потенциалов на его концах и к прекращению тока.

Для поддержания разности потенциалов на концах проводника, а, следовательно, и тока в проводнике, необходимо действие сил, совершающих разделение зарядов на концах проводника. Такие силы называются сторонними, а устройства, обеспечивающие возникновение их, называются источниками тока (напряжения).

Важнейшей характеристикой источника тока является его электродвижущая сила (э. д. с.). Электродвижущей силой источника тока называется физическая величина, равная работе сторонних сил по перемещению единицы положительного электрического заряда по замкнутому контуру «источник — внешняя цепь». Таким образом, э. д. с. источника тока является его энергетической характеристикой. Согласно определению э. д. с. единицы измерения электродвижущей силы совпадают с единицами измерения разности потенциалов.

**Измерение э. д. с. источника тока методом компенсации.** При определении э. д. с. как напряжения на клеммах источника тока неизбежна приборная ошибка, зависящая от соотношения внутреннего сопротивления источника тока и сопротивления вольтметра. Действительно, на основании закона Ома для полной цепи ток в цепи равен

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}, \quad (1)$$

где  $R$  — сопротивление внешнего участка цепи;  
 $r$  — внутреннее сопротивление источника тока.

С другой стороны, для внешнего участка цепи можно записать

$$I = \frac{U}{R}, \quad (2)$$

где  $U$  — напряжение на клеммах источника тока или, что то же самое, напряжение на внешнем участке цепи.

Приравняв выражение (1) и (2), получим:

$$\frac{U}{R} = \frac{\varepsilon}{R + r} \quad \text{или} \quad \varepsilon = U \left( 1 + \frac{r}{R} \right), \quad (3)$$

откуда следует, что только при бесконечно большом внешнем сопротивлении э. д. с. равна разности потенциалов на клеммах источника тока.

Более точное измерение электродвижущей силы источника тока основано на методе компенсации. Сущность метода компенсации заключается в том, что действие измеряемой величины уравновешивается действием однородной с ней известной величины таким образом, что суммарное действие этих величин на измерительный прибор равно нулю. Согласно этому, при определении э. д. с. источника тока методом компенсации падение напряжения на некотором сопротивлении, создаваемое источником с известной э. д. с., уравновешивается э. д. с. исследуемого источника так, что ток, проходящий через исследуемый источник, равен нулю.

Принципиальная схема установки для определения э. д. с. источника тока методом компенсации приведена на рис. 1.

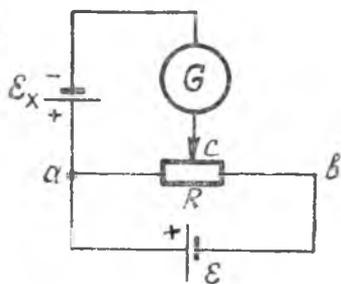


Рис. 1.

Обозначения на схеме:  $\varepsilon$  — вспомогательный источник тока;  $\varepsilon_x$  — исследуемый источник;  $G$  — гальванометр;  $R$  — переменное сопротивление.

Переменное сопротивление выполнено таким образом, что при перемещении контакта  $c$  меняется сопротивление между точками  $a$  и  $c$ ,  $c$  и  $b$ , а сопротивление между точками  $a$  и  $b$  остается постоянным.

Рассмотрим работу схемы. Если

э. д. с. исследуемого источника  $\varepsilon_x$  меньше, чем э. д. с. вспомогательного источника  $\varepsilon$ , то можно найти такое положение контакта  $c'$ , при котором ток через гальванометр будет равен нулю. В этом случае э. д. с. исследуемого источника компенсируется падением напряжения на участке  $ac'$ , т. е.

$$\varepsilon_x = I_1 R_{ac'}, \quad (4)$$

где  $I_1$  — сила тока на этом участке при отсутствии тока через гальванометр.

Итак, э. д. с. исследуемого элемента можно найти по формуле (4), если измерить  $I'$  и  $R_{ac'}$ . Погрешность рассмотренного метода определяется, в основном, погрешностью измерения силы тока, т. е. величиной порядка  $10^{-1}\%$ .

Повышение точности достигается обычно следующим способом. Вместо исследуемого источника включается элемент с известной э. д. с.  $\varepsilon_n$ , называемый нормальным элементом. Затем находится новое положение контакта  $c''$ , при котором ток через гальванометр будет равен нулю. В этом случае, аналогично предыдущему, можно записать

$$\varepsilon_n = I_2 R_{ac''}. \quad (5)$$

Токи  $I_1$  и  $I_2$  равны, т. к. при отсутствии тока через гальванометр  $I_1$  и  $I_2$  определяются лишь величиной э. д. с. вспомогательного источника, его внутренним сопротивлением и сопротивлением  $R_{ав}$ . Тогда из уравнений (4) и (5) следует, что

$$\varepsilon_x = \varepsilon_n \frac{R_{ac'}}{R_{ac''}}. \quad (6)$$

Таким образом, для определения неизвестной э. д. с. достаточно найти отношение двух сопротивлений, полученных при компенсационных измерениях с исследуемым источником тока и с нормальным элементом. Погрешность этого метода определяется, в основном, погрешностью изготовления сопротивления, т. е. величиной порядка  $10^{-2}\%$  (на порядок ниже, чем при непосредственном измерении силы тока с последующим расчетом по формуле (4)).

### Упражнение 1. Измерение э. д. с. источника тока компенсационным методом

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки.

В качестве сопротивления  $ab$  в схеме применен реохорд — длинная калиброванная проволока, натянутая вдоль миллиметровой шкалы. Вдоль реохорда по направляющему стержню может перемещаться движок (на схеме — точка  $c$ ),

Конструктивной особенностью схемы является применение двойного ключа  $K_1$ — $K_2$ , который позволяет включать в цепь сначала вспомогательный источник тока, а затем — исследуемый (либо эталонный) элемент. Указанная последовательность необ-

ходима для предохранения исследуемого (либо эталонного) элемента и гальванометра от больших токов, которые могут возникнуть, если включить сначала исследуемый элемент на малое сопротивление реохорда, а затем уже — вспомогательный источник тока.

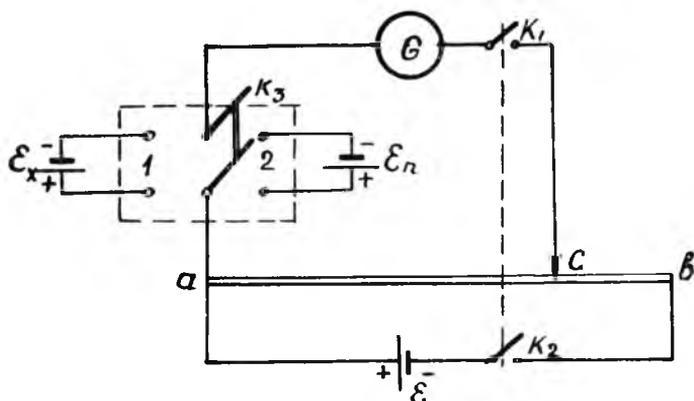


Рис. 2.

С помощью перекидного ключа  $K_3$  в цепь гальванометра можно включить либо исследуемый источник тока, либо нормальный элемент.

Пусть при компенсационных измерениях с исследуемым источником тока длина участка реохорда от точки «а» до движка равна  $l_1$ , а при измерениях с нормальным элементом —  $l_2$ . Тогда сопротивления этих участков будут равны соответственно:

$$R_{ac'} = \rho \frac{l_1}{S}; \quad R_{ac''} = \rho \frac{l_2}{S},$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление материала реохорда,

$S$  — сечение реохорда.

Используя эти выражения, формуле (6) можно придать вид

$$\varepsilon_x = \varepsilon_n \frac{l_1}{l_2}. \quad (7)$$

Зная величину  $\varepsilon_n$  и измеряя  $l_1$  и  $l_2$ , легко определить э. д. с. исследуемого источника тока.

В качестве нормального элемента в данной работе применен элемент Вестона. Э. д. с. элемента Вестона, хотя и слабо, но зависит от температуры. Эта зависимость выражается формулой

$$\varepsilon_n = 1,01830 - 4,06 \cdot 10^{-5}(t - 20) - 9,5 \cdot 10^{-7}(t - 20)^2. \quad (8)$$

При выполнении упражнения 1 можно принять с достаточной точностью  $\varepsilon_n = 1,018$  в. В упражнении 2 следует учитывать температурную зависимость  $\varepsilon_n$ .

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ УПРАЖНЕНИЯ

1. Собрать схему согласно рис. 2, соблюдая полярность включения источников тока.
2. Поставить переключатель  $K_3$  в положение I.
3. Замкнуть двойной ключ  $K_1-K_2$  и, перемещая движок реохорда, добиться, чтобы ток через гальванометр был равен нулю. Записать значение  $l_1$ .
4. Поставить переключатель  $K_3$  в положение 2 и, следуя п. 3, найти значение  $l_2$ .
5. Повторить измерение  $l_1$  и  $l_2$  три раза.
6. Результаты измерений записать в таблицу 1 по прилагаемой форме.

Таблица 1

№ опыта	l <sub>1</sub> , мм	l <sub>2</sub> , мм	ε <sub>n</sub> , в	ε <sub>x</sub> , в	(ε <sub>x</sub> ) <sub>ср</sub> , в

### ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Вычислить значения ε<sub>x</sub> по формуле (7).
2. Найти среднее значение (ε<sub>x</sub>)<sub>ср</sub> и дать приближенную оценку погрешности. Результаты расчетов записать в таблицу 1.

### Упражнение 2. Измерение э. д. с. источника тока с помощью потенциометра Р-300

При измерении э. д. с. источников тока на практике пользуются потенциометрами постоянного тока различных типов, в основе которых лежит компенсационная схема.

Упрощенная принципиальная схема потенциометра Р-300 приведена на рис. 3. Если поставить переключатель  $K$  в положение «НЭ», то нормальный элемент будет подключен к сопротивлению  $a-b$ . Величину этого сопротивления можно менять в небольших пределах в зависимости от значения э. д. с. нормального элемента так, чтобы отношение  $\frac{\varepsilon_n}{R_{ab}}$  оставалось постоянным. С помощью переменного сопротивления  $R$  устанавливается рабочий ток потенциометра, т. е. такой ток, при котором падение напряжения на сопротивлении  $R_{ab}$  компенсирует э. д. с. нормального элемента. Величина этого тока равна

$$I_1 = \frac{\varepsilon_n}{R_{ab}}$$

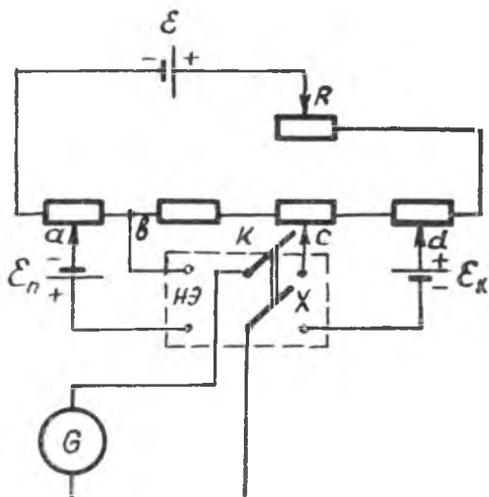


Рис. 3.

Для данной конструкции потенциометра рабочий ток является постоянным. Таким образом, нормальный элемент служит для установления определенной величины рабочего тока.

Если теперь поставить переключатель  $K$  в положение «X» и изменяя сопротивление  $c-d$ , добиться компенсации э. д. с. исследуемого источника, то величина искомой э. д. с. может быть найдена по формуле

$$\varepsilon_x = I_1 \cdot R_{cd}. \quad (8)$$

Т. к.  $I_1 = \text{const}$ , то  $\varepsilon_x$  является функцией лишь сопротивления  $R_{cd}$ . Величина этого сопротивления устанавливается рукоятками потенциометра, с которыми связаны специальные шкалы, проградуированные в единицах напряжения. Поэтому при компенсации численное значение  $\varepsilon_x$  получается непосредственно на шкалах.

### КОНСТРУКЦИЯ ПОТЕНЦИОМЕТРА

Все узлы прибора смонтированы в деревянном корпусе, который закрыт панелью (рис. 4). На панель выведены:

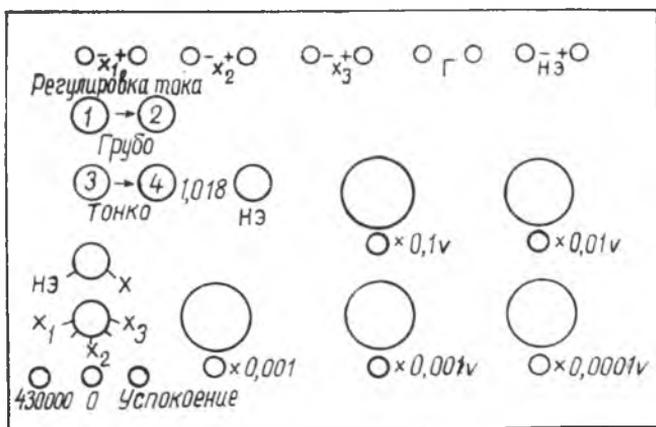


Рис. 4.

1. Три пары клемм « $X_1$ », « $X_2$ », « $X_3$ » для подключения трех исследуемых источников тока.

2. Клеммы «Г» — для подключения гальванометра.

3. Клеммы «НЭ» — для подключения нормального элемента.

4. Рукоятки 1—2—3—4, предназначенные для грубой и тонкой регулировки рабочего тока (на схеме — сопротивление  $R$ ).

5. Рукоятка «НЭ», с помощью которой устанавливается величина сопротивления  $R_{ab}$  в соответствии со значением э. д. с. нормального элемента.

6. Рукоятка «НЭ—Х» (на схеме — переключатель К).

7. Рукоятка « $X_1$ —ВЫКЛ— $X_2$ —ВЫКЛ— $X_3$ », предназначенная для подключения к схеме какого-либо из трех исследуемых источников.

8. Рукоятки « $\times 0,1$ », « $\times 0,01$ », « $\times 0,001$ », « $\times 0,0001$ », « $\times 0,00001$ », (на схеме — сопротивление  $c-d$ ). Э. д. с. исследуемого источника определяется суммированием произведений цифр, видимых в окошках около ручек, на соответствующие множители.

9. Кнопки управления гальванометром:

кнопка «430000» предназначена для грубой установки нуля гальванометра (начальный период компенсации);

кнопка «0» предназначена для тонкой установки нуля гальванометра (заключительный период компенсации);

кнопка «УСПОКОЕНИЕ» прекращает сильные колебания стрелки гальванометра.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ УПРАЖНЕНИЯ 2

1. Подключить нормальный элемент Вестона, гальванометр и исследуемый источник  $\epsilon_x$  к зажимам потенциометра «НЭ», «Г» и «Х» (любая пара) с соблюдением полярности.

2. Рассчитать э. д. с. нормального элемента по формуле (8).

3. Установить рабочий ток потенциометра. Для этого рукоятку «НЭ» установить на контакт, номер которого равен числу сотых долей вольта в значении э. д. с. нормального элемента при данной температуре. Установить рукоятку «НЭ—Х» в положение «НЭ». С помощью рукояток регулировки рабочего тока установить нуль тока через гальванометр. При этом гальванометр следует включать сначала кнопкой «430000 ом», а в конце регулировки — кнопкой «0».

4. Поставить рукоятку «НЭ—Х» в положение «Х». Нажав кнопку «430000 ом», установить с помощью рукояток « $\times 0,1$ », « $\times 0,01$ » и т. д. нуль тока через гальванометр. Затем, нажав кнопку «0», уточнить нуль тока через гальванометр, пользуясь рукоятками, как и в первом случае.

5. Определить величину измеряемой э. д. с. суммированием произведений цифр, видимых в окошках около рукояток, на соответствующие множители.

6. Сравнить полученный результат с данными расчетов э. д. с. в упражнении 1.

### Контрольные вопросы

1. Компенсация каких величин имеется ввиду в данной лабораторной работе? Начертите принципиальную схему потенциометра Р-300.
2. В чем заключается различие между э.д.с. и напряжением?
3. В каком случае измерение э.д.с. источника можно произвести непосредственно вольтметром путем подключения его к клеммам источника?

### ЛИТЕРАТУРА

1. Физический практикум под ред. В. И. Ивероновой, задача 74, изд. «Наука», М., 1968.

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ Э. Д. С. ТЕРМОПАРЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

**Принадлежности:** электропечь, в которой установлены термопара и термометр; микроамперметр.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Если привести в соприкосновение два разнородных металла 1 и 2 (рис. 1), то один из них зарядится положительно, а другой — отрицательно, и между ними возникнет так называемая контактная разность потенциалов

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2.$$

А. Вольт экспериментально исследовал это явление и установил два следующих закона:

1. Контактная разность потенциалов зависит только от химического состава и температуры проводников.

2. Разность потенциалов между концами цепи, которая состоит из последовательно соединенных металлических проводников, находящихся при одинаковой температуре, не зависит от химического состава промежуточных проводников и равна разности потенциалов, которая возникла бы при непосредственном соединении крайних проводников.

Классическая электронная теория объясняет происхождение контактной разности потенциалов следующим образом. Валентные электроны в атомах металлов, слабо связанные со своими ядрами, могут покидать атом. Они образуют так называемый электронный газ внутри проводника. Вследствие хаотического

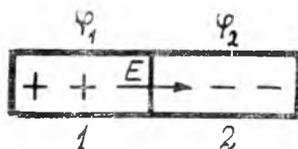


Рис. 1.

теплового движения свободные электроны обладают кинетической энергией. Те электроны, у которых кинетическая энергия достаточно велика, могут выйти из проводника, при этом их энергия расходуется на преодоление, в основном, сил поверхностного притяжения со стороны положительных зарядов тех атомов, которые располагаются на поверхности проводника. Затрачиваемая электроном работа на преодоление указанных сил, когда он покидает проводник, называется работой выхода  $A$ . Работа выхода обычно измеряется в электронвольтах. Величина ее зависит от химической природы проводника и чистоты его поверхности. У различных проводников работа выхода электрона разная. Кинетическая же энергия свободных электронов зависит только от температуры.

Рассмотрим поведение электронов в контактном слое двух разных проводников, у которых температура и концентрация электронов одинаковая, а работы выхода различные. Предположим, что у первого проводника работа выхода меньше, чем у второго ( $A_1 < A_2$ ) и пусть  $N_1$  — число электронов, переходящих из проводника 1 в проводник 2 в единицу времени, а  $N_2$  — число электронов, переходящих из проводника 2 в проводник 1 в единицу времени. Так как  $A_1 < A_2$ , то  $N_1 > N_2$ . Вследствие этого первый проводник будет заряжаться положительно, а второй отрицательно.

Такой процесс приведет к созданию разности потенциалов между проводниками  $\varphi_1' - \varphi_2'$  и появлению внутреннего электрического поля  $E$ , направленного в области контакта от первого проводника ко второму. Это поле  $E$  будет препятствовать дальнейшему переходу электронов из первого металла во второй и, напротив, способствовать их переходу из второго металла в первый. В результате установится динамическое равновесие, при котором величина разности потенциалов между проводниками будет равна

$$\varphi_1' - \varphi_2' = - \frac{A_1 - A_2}{e}, \quad (1)$$

где  $e$  — заряд электрона.

Знак минус показывает, что при  $A_1 < A_2$  соответственно  $\varphi_1 > \varphi_2$  (первый проводник заряжается положительно).

Теперь предположим, что у двух проводников 1 и 2 работы выхода одинаковые,  $A_1 = A_2$ , а концентрации свободных электронов разные. Пусть  $n_{01} > n_{02}$ . При контактировании таких проводников начнется диффузия электронов. Преимущественный переход электронов будет происходить из проводника 1, где больше плотность электронного газа, в проводник 2 с меньшей плотностью. Таким образом, проводники 1 и 2 будут заряжаться противоположными зарядами и между ними возникнет разность потенциалов  $\varphi_1'' - \varphi_2''$ . Эта разность потенциалов, как показывает теоретический расчет, определяется соотношением

$$\varphi_1'' - \varphi_2'' = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}}. \quad (2)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — абсолютная температура обоих проводников,  $n_{01}$  и  $n_{02}$  — соответственно концентрации свободных электронов в первом и втором проводниках.

Если же проводники имеют различные работы выхода и различные концентрации свободных электронов, то общая контактная разность потенциалов определяется алгебраической суммой указанных выше разностей потенциалов

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = (\varphi_1' - \varphi_2') + (\varphi_1'' - \varphi_2''),$$

т. е.

$$\Delta\varphi = -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}}. \quad (3)$$

Составим замкнутую цепь из 2 разнородных проводников 1 и 2 с различными работами выхода  $A_1$  и  $A_2$  и с различными концентрациями свободных электронов  $n_{01}$  и  $n_{02}$  и будем поддерживать на контактах различные температуры  $T_1$  и  $T_2$  (рис. 2). Такая система называется термопарой или термоэлементом.

В образовавшейся замкнутой цепи возникнут разности потенциалов:  $\Delta\varphi_1$  — на первом контакте, где температура  $T_1$  и  $\Delta\varphi_2$  — на втором контакте, температура которого равна  $T_2$ . На основании уравнения (3), примененного к первому и второму контактам рассматриваемой цепи, величина термоэлектродвижущей силы определится равенством

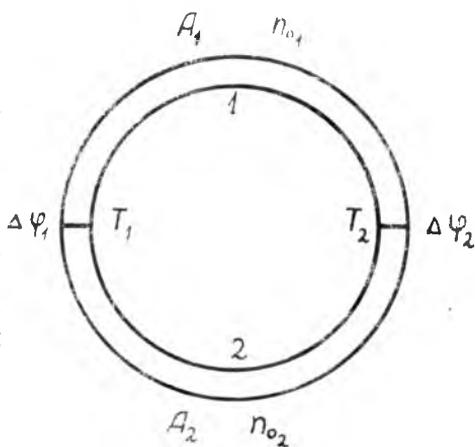


Рис. 2.

$$\varepsilon = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = \left( -\frac{A_1 - A_2}{e} + \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} \right) + \left( -\frac{A_2 - A_1}{e} + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_{02}}{n_{01}} \right),$$
 откуда

$$\varepsilon = \frac{k}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} \cdot (T_1 - T_2). \quad (4)$$

Концентрации свободных электронов  $n_{01}$  и  $n_{02}$  в проводниках при температурах порядка сотен градусов изменяются незначительно. Поэтому величину  $\frac{k}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}}$  можно приблизительно считать постоянной. Обозначим ее через  $C$

$$C = \frac{k}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}}.$$

Разность температур между спаями проводников по шкале Кельвина равна разности температур по шкале Цельсия

$$T_1 - T_2 = t_1 - t_2.$$

Таким образом, величина термо- э. д. с. определяется простой формулой

$$\varepsilon = C(t_1 - t_2). \quad (5)$$

Величина  $C = \frac{\varepsilon}{t_1 - t_2}$  называется постоянной термопары (термоэлемента). Она численно равна э.д.с. при разности температур между спаями термопары в один градус. Для большинства пар металлов  $C$  составляет десятки микровольт на градус.

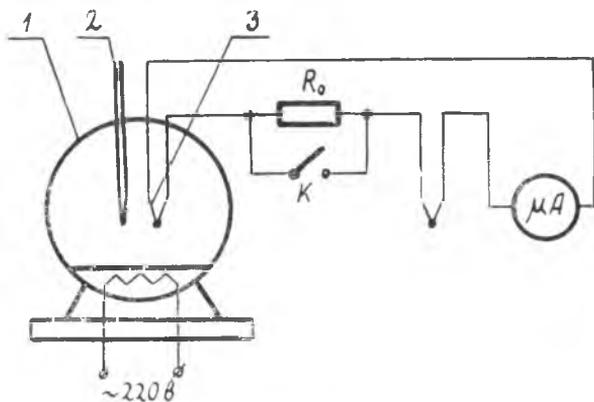


Рис. 3.

Термопары широко применяются на практике, в частности, для измерения температуры. Для этой цели один спай термопары поддерживают при постоянной температуре, а другой помещают в том месте, где измеряется температура. При этом величину э. д. с. и ток в цепи измеряют приборами, шкалы которых градуируют в градусах Цельсия или Кельвина. Для измерения температур ниже  $800^\circ C$  наиболее употребительными являются пары: хромель—копель, хромель—алюмель, константан—железо, константан—медь, никель—железо, никель—платина. Для измерения температур до  $1700^\circ C$ .

В данной работе предлагается градуировать термопару по ртутному термометру, т. е. найти зависимость термо э.д.с. от температуры и определить постоянную термопары  $C$  для исследуемого интервала температур.

**Описание установки.** Схема экспериментальной установки показана на рис. 3. В электропечи 1 установлена хромель-копелевая термопара 3. Температура в печи определяется с помощью термометра 2. Измерение термотока в цепи термопары осуществляется с помощью микроамперметра  $\mu A$ , в котором роль указательной стрелки выполняет луч света.

Все элементы схемы смонтированы на панели. В цепи термопары установлено сопротивление  $R_0$ , которое может шунтироваться тумблером К. Питание установки (спираль электропечи и подсветка микроамперметра) производится от сети переменного тока 220 вольт.

**Методика определения э.д.с. термопары.** Если в цепь термопары включен только микроамперметр (рис. 4а), который показывает величину тока  $I_1$ , то по закону Ома для полной цепи ток  $I_1$  определится по формуле

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{r}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon$  — э.д.с. термопары,  $r$  — полное сопротивление цепи термопары, состоящее из сопротивлений измерительного прибора, контактов и подводящих проводов. Если же в эту цепь включено также известное добавочное сопротивление  $R_0$ , то микроамперметр будет показывать уже другой ток —  $I_2$  (рис. 4б). По закону Ома

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{R_0 + r}. \quad (7)$$

Решая совместно уравнения (6) и (7), получим для э.д.с. выражение

$$\varepsilon = \frac{I_1 I_2}{I_1 - I_2} R_0. \quad (8)$$

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. В данной установке горячий спай термопары находится в печи, а холодный спай — в специальной коробочке на панели. Температура холодного спая равна температуре воздуха в лаборатории. Перед началом работы необходимо записать температуру холодного спая  $t_2$ .

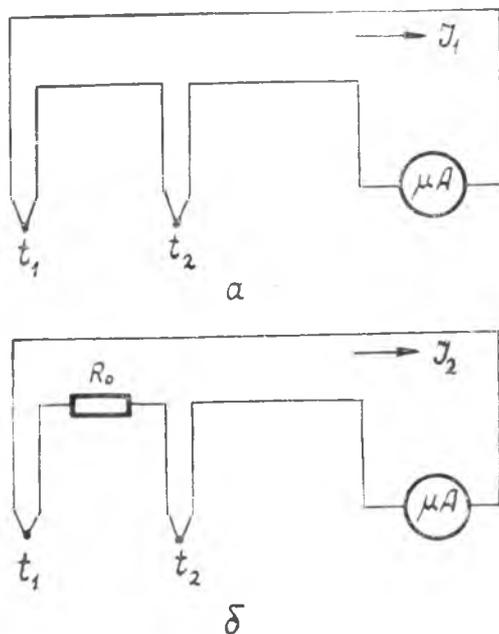


Рис. 4.

2. Включить установку в сеть. Включить электропечь тумблером на передней панели печи. При этом загорается красная сигнальная лампочка.

3. Наблюдать за повышением температуры печи по показаниям ртутного термометра, измерять через каждые 15—20°C ток  $I_1$  без добавочного сопротивления  $R_0$  и ток  $I_2$  с включенным добавочным сопротивлением.

Результаты измерений записать в таблицу 1.

Таблица 1

$t_1, ^\circ\text{C}$	$I_1, \text{мкА}$	$I_2, \text{мкА}$	$\varepsilon, \text{мкВ}$	$t_2, ^\circ\text{C}$

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным таблицы 1 рассчитать значения  $\varepsilon$  (в микровольтах), пользуясь формулой (8). Результаты расчетов записать в таблицу 1.

2. Построить график  $\varepsilon = f(t_1 - t_2)$ .

3. Найти постоянную термопары  $C$  по формуле

$$C = \frac{\varepsilon}{I_1 - I_2}$$

Для определения  $C$  разность температур  $t_1 - t_2$  следует брать из графика. Численное значение  $C$  обычно выражается в микровольтах на градус.

### Контрольные вопросы

1. Как объясняет классическая электронная теория возникновение э. д. с. термопары?

2. Сформулируйте законы Вольта.

3. На чем основан метод определения э. д. с. в данной работе?

4. Приведите примеры применения термоэлементов в практике измерения температур.

5. Каков физический смысл постоянной термопары? В каких единицах она измеряется?

6. Работа выхода электрона из металла обычно измеряется в электронвольтах. Можно ли выразить ее в джоулях?

### ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Савельев. Курс общей физики, т. 2, §§ 76—77. Изд. Наука, М., 1964 г.

2. Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, Л. Б. Милковская. Курс физики, т. II, гл. X, изд. Высшая школа, М., 1964.

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

**Принадлежности:** электропечь, в которой закреплена U-образная трубка с исследуемым электролитом; милливольтметр; реохорд; постоянное сопротивление; вибрационный гальванометр.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Наиболее широкий класс электролитов составляют водные растворы солей, кислот и щелочей. Электролитическая проводимость обусловлена наличием в растворе ионов, которые возникают в результате диссоциации молекул растворяемого вещества при взаимодействии их с молекулами растворителя, причем степень диссоциации зависит от природы как молекул растворенного вещества, так и растворителя.

При отсутствии внешнего электрического поля ионы в электролите движутся хаотично, вследствие чего результирующий ток равен нулю. При наличии поля на беспорядочное тепловое движение накладывается упорядоченное движение ионов, и в растворе возникает электрический ток.

Рассмотрим движение положительного иона с зарядом  $Z_+e$ , где  $Z_+$  — валентность иона, а  $e$  — элементарный заряд, равный  $1,6 \cdot 10^{-19}$  кулона. На этот ион в электрическом поле с напряженностью  $E$  действует сила

$$\vec{F}_e = Z_+ e \vec{E}. \quad (1)$$

под действием которой он движется ускоренно.

С другой стороны, по мере увеличения скорости иона возрастает

сила трения, которая в первом приближении пропорциональна скорости, т.е.

$$\vec{F}_r = K_+ \vec{V}_+, \quad (2)$$

где  $K_+$  — коэффициент пропорциональности, зависящий, в основном, от вязкости растворителя.

Практически через очень короткий промежуток времени сила трения станет равной по величине силе электрического поля, и ион будет двигаться равномерно с некоторой постоянной скоростью, которую можно найти из соотношения

$$\vec{F}_e + \vec{F}_r = 0, \quad (3)$$

т. е.

$$Z_+ e \vec{E} - K_+ \vec{V}_+ = 0, \quad (4)$$

откуда

$$V_{+} = \frac{Z_+ e}{K_+} E = U_+ E, \quad (5)$$

где

$$U_+ = \frac{Z_+ e}{K_+}. \quad (6)$$

Величина  $U_+$  называется подвижностью иона.

Аналогичным образом можно получить для отрицательных ионов

$$\vec{V}_- = \mu_- \vec{E} \quad (7)$$

При комнатной температуре подвижность ионов в воде имеет порядок  $10^{-7} - 10^{-8} \frac{\text{м} \cdot \text{сек}}{\text{в} \cdot \text{м}}$ . Направленное движение ионов в электролите представляет собою электрический ток, плотность которого можно выразить формулой:

$$j = n_+ Z_+ e V_+ + n_- (Z_- e) V_-, \quad (8)$$

где  $n_+ = n_- = n$  — концентрация ионов.

Учитывая выражения (5) и (7), можно уравнение (8) написать так:

$$\vec{j} = n Z_e (U_+ + U_-) \vec{E}. \quad (9)$$

Соотношение (9) представляет по существу закон Ома в дифференциальной форме:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E},$$

а величина

$$\sigma = n Z e (U_+ + U_-) \quad (10)$$

— удельную проводимость электролита.

При повышении температуры электролита его проводимость увеличивается по двум основным причинам: во-первых, возрастает концентрация ионов вследствие повышения степени диссоциации; во-вторых, возрастают подвижности ионов вследствие уменьшения вязкости растворителя.

Целью данной работы является изучение зависимости удельного сопротивления электролитов от температуры.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Для измерения сопротивления электролита обычно используется мостиковая схема, питаемая от источника переменного тока. Применение переменного тока необходимо по той причине, что под действием постоянного тока происходит поляризация электродов продуктами электролиза, и измеренное сопротивление не соответствует истинному значению сопротивления электролита. Кроме помех в измерении, связанных с поляризацией электродов, существенно и то, что при прохождении постоянного тока постепенно меняется состав электролита вследствие электролиза.

Мостиковая схема для измерения сопротивления электролита изображена на рис. 1. Она представляет собой замкнутый четырехугольник, составленный из сопротивлений  $R_x$ ,  $R$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ . В одну из диагоналей схемы включается источник переменного напряжения, в другую диагональ — вибрационный гальванометр  $G$ .

Сопротивления  $r_1$  и  $r_2$  являются участками реохорда; они разделены контактом  $D$ .  $R$  — постоянное сопротивление известной величины.

В схеме через  $R_x$  обозначено сопротивление электролита, который находится в  $U$ -образной трубке, снабженной неокисляющимися металлическими электродами (рис. 2).

Трубка 1 с электролитом находится в электропечи 2, которая нагревается переменным током напряжением 220 в. Температура в печи измеряется с помощью термопары 3, соединенной с милливольтметром 4. Для перехода от показаний милливольтметра к температуре электролита необходимо пользоваться тарировочным графиком, который имеется на установке. При построении тарировочного графика учтена разница в температурах электролита и воздуха в печи. Термопара дает возможность определять лишь разность между температурой электролита и комнатной температурой.

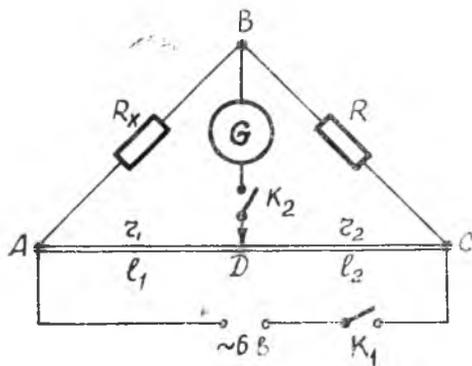


Рис. 1.

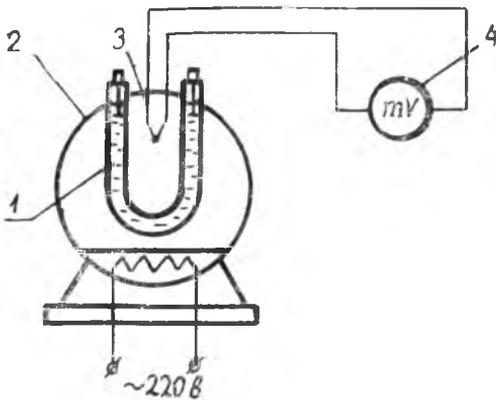


Рис. 2.

ток через гальванометр будет равен нулю. При этом условия легко показать, опираясь на второй закон Кирхгофа, что

$$\frac{R_x}{R} = \frac{r_1}{r_2},$$

или

$$R_x = R \frac{r_1}{r_2}. \quad (12)$$

Реохорд калиброван, следовательно, отношение сопротивлений  $\frac{r_1}{r_2}$  можно заменить отношением длин соответствующих участков реохорда. Тогда уравнение (12) принимает вид:

$$R_x = R \frac{l_1}{l_2}. \quad (13)$$

Следует отметить, что для моста переменного тока соотношение (12) будет справедливо лишь при пренебрежимо малых индуктивных и емкостных сопротивлениях его элементов.

В качестве индикатора нуля в мостовых схемах переменного тока часто применяются вибрационные гальванометры. Работа вибрационного гальванометра основана на взаимодействии между катушкой возбуждения, по которой пропускается переменный ток, и подвижным постоянным магнитом. При отсутствии переменного тока в катушке, подвижный магнит устанавливается в нулевое положение. Переменный ток, включаемый в катушку, вызывает вибрации магнита около нулевого положения. Вибрации подвижного магнита можно наблюдать по размытию световой полоски на шкале, получающейся в результате отражения лучей от зеркала, связанного с магнитом.

Таким образом, чем меньше переменный ток, проходящий через гальванометр, тем уже световая полоска на шкале.

В данной работе используется вибрационный гальванометр типа ВГ. Правила обращения с прибором приведены на боковой панели гальванометра.

поэтому истинная температура электролита должна вычисляться по формуле

$$t_{\text{эл}} = t_{\text{приб.}} + t_{\text{комп.}} \quad (11)$$

где  $t_{\text{приб.}}$  — температура, найденная по показаниям прибора и тарировочному графику,  $t_{\text{комп.}}$  — комнатная температура.

Процесс измерения на мостовой схеме заключается в отыскании такого положения движка реохорда, при котором

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему согласно рис. 1. В данной работе ключ  $K_1$  находится на щитке лабораторного стола, ключ  $K_2$  — на верхней панели вибрационного гальванометра.

2. Включить электропечь, осветитель вибрационного гальванометра и питание моста.

3. Сделать несколько измерений сопротивления электролита при различных температурах (рекомендуется найти 6—7 экспериментальных точек). Эту операцию необходимо каждый раз производить в следующей последовательности: а) включить в схему гальванометр; б) перемещая движок реохорда, добиться наименьшей ширины световой полоски на шкале гальванометра.

4. Записать в таблицу 1 длины участков реохорда  $l_1$  и  $l_2$ , соответствующие положению равновесия моста, и показания милливольтметра, соединенного с термопарой.

5. После окончания измерений следует выключить электропечь и открыть дверцу.

Таблица 2

№ п/п	$u_{\text{приб.}}$	$t_{\text{приб.}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{э.т.}}, ^\circ\text{C}$	$l_1, \text{ м.м.}$	$l_2, \text{ м.м.}$	$R, \text{ ом}$	$R_x, \text{ ом}$	$P, \text{ ом. м}$

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Определить температуру электролита для каждого опыта, пользуясь тарировочным графиком и формулой (11).

2. Рассчитать сопротивление электролита по формуле (13).

3. Определить величину удельного сопротивления электролита для соответствующих значений температуры. Удельное сопротивление связано с геометрическими размерами и полным сопротивлением проводника зависимостью

$$R_x = \rho \frac{l}{S}, \quad (14)$$

откуда

$$\rho = \frac{R_x S}{l}, \quad (15)$$

где  $l$  — длина столба исследуемого электролита в м,  $S$  — площадь поперечного сечения в  $\text{м}^2$ .

Численные значения величин  $l$  и  $S$  приведены на корпусе печи.

4. Все полученные результаты записать в таблицу 1.

5. По данным таблицы построить график  $\rho = f(t)$ .

### Контрольные вопросы

1. Вывести формулу, связывающую между собой плотность тока и подвижности ионов в электролите.
2. Почему сопротивление электролита уменьшается с повышением температуры?
3. Почему питание измерительного моста в данной работе производится от источника переменного, а не постоянного напряжения?
4. Начертите схему применяемой в данной работе экспериментальной установки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Савельев. Курс общей физики, т. 2, §§ 79, 82, изд. Наука, М., 1968.

## ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

**Принадлежности:** селеновый выпрямитель; вольтметр; трех-предельный миллиамперметр; потенциометр; осциллограф; сопротивление 1000 ом; перекидной ключ.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

**Физические свойства полупроводников.** Типичными представителями класса полупроводниковых материалов являются германий ( ${}_{32}\text{Ge}^{12}$ ), кремний ( ${}_{14}\text{Si}^{28}$ ), селен ( ${}_{34}\text{Se}^{78}$ ) и др., нашедшие широкое применение в различных полупроводниковых приборах.

По величине удельного сопротивления ( $\rho = 10^{-3} - 10^7$  ом.м) полупроводники занимают промежуточное положение между проводниками ( $\rho = 10^{-7} - 10^{-8}$  ом.м) и диэлектриками ( $\rho = 10^7 - 10^{15}$  ом.м).

Большинство полупроводников имеет кристаллическое строение. Связи между двумя соседними атомами пространственной кристаллической решетки полупроводника осуществляются парой валентных электронов — по одному от каждого атома. На рис. 1 в качестве примера представлена схема взаимного расположения атомов германия в кристаллической решетке с указанием ковалентных связей.

Согласно квантовой теории, электроны в атоме могут занимать определенные, так называемые разрешенные, энергетические уровни. В твердом теле энергетические уровни электронов образуют энергетические зоны. Совокупность энергетических уровней валентных электронов составляет нормальную, или валентную зону.

Совокупность более высоких энергетических уровней, соответствующих свободным электронам, составляет зону проводимости. Между валентной зоной и зоной проводимости находится запрещенная зона уровней энергии электронов. Расположение энергетических зон в твердом теле представлено на диаграмме (рис. 2).

В полупроводниках ширина запрещенной зоны незначительна.

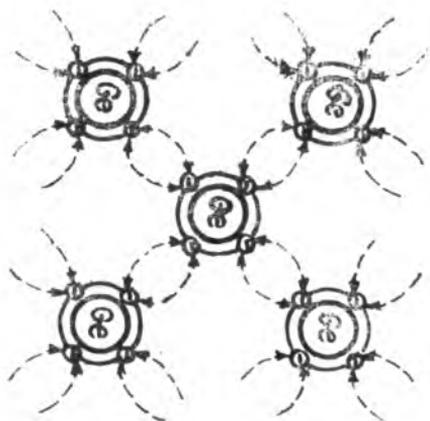


Рис. 1.



Рис. 2.

Так, например, для германия она составляет 0,72 эв, а для кремния — 1,11 эв. Под действием внешних факторов (главным образом, тепла) некоторые валентные электроны атома полупроводника приобретают энергию, достаточную для освобождения от ковалентных связей и перехода в зону проводимости. Вследствие малой ширины запрещенной зоны, полупроводники имеют заметную проводимость уже при комнатных температурах.

**Виды проводимости полупроводников.** При освобождении электронов от ковалентной связи в кристаллической решетке возникает свободное место, которое как бы обладает положительным зарядом, равным заряду электрона. Такое освободившееся место в электронной связи называется **ДЫРКОЙ**. Дырки, подобно электронам проводимости, хаотически перемещаются во всем объеме полупроводника, обмениваясь местами с электронами из соседних ковалентных связей. Если создать в полупроводнике электрическое поле, то движение освободившихся электронов и соответствующего числа дырок станет упорядоченным, и в полупроводнике возникнет ток.

Проводимость, обусловленная перемещением равного числа электронов и дырок, называется собственной проводимостью полупроводника. Однако при изготовлении полупроводниковых приборов необходимо иметь полупроводники, проводимость которых определяется каким-либо одним из видов носителей тока — или электронами, или дырками.

Это достигается путем внесения в кристаллическую решетку полупроводника атомов такого элемента, у которого валентность отличается от валентности атомов полупроводника. Так, если в кристалл германия ввести атомы мышьяка, имеющие по пяти валентных электронов, то четыре электрона каждого из них образуют ковалентные связи с атомами германия, а пятый останется избыточным (свободным) электроном. При этом дырок в кристалле не будет. Такие полупроводники называются полупроводниками с электронной проводимостью, или полупроводниками  $n$ -типа.

Введение же в кристалл германия атомов трехвалентного элемента, например индия, приводит к образованию избытка дырок. Такие полупроводники называются полупроводниками с дырочной проводимостью, или полупроводниками  $p$ -типа. Электроны в полупроводниках  $n$ -типа и дырки в полупроводниках  $p$ -типа принято называть основными носителями тока, а небольшое количество электронов в полупроводниках  $p$ -типа и дырок в полупроводниках  $n$ -типа — неосновными носителями тока.

**Электронно-дырочный переход.** Электронно-дырочным, или  $p-n$  переходом, называется граница соединения полупроводника  $p$ -типа с полупроводником  $n$ -типа. Явления, происходящие в  $p-n$  переходе, лежат в основе работы полупроводниковых диодов и триодов.

Движение электрических зарядов через  $p-n$  переход, при отсутствии приложенного извне напряжения, носит характер диффузии основных носителей тока через границу раздела полупроводников, поскольку концентрации свободных электронов и дырок в  $n$ -области и в  $p$ -области различны. При этом электроны переходят в область  $p$ , а дырки — в область  $n$ .

Диффундируя во встречных направлениях, электроны и дырки рекомбинируют друг с другом. В результате этого в области  $p-n$  перехода уменьшается число основных носителей тока. Кроме того, с обеих сторон границы раздела образуются пространственные электрические заряды противоположных знаков. Так, в полупроводнике  $p$ -типа возникает нескомпенсированный отрицательный заряд ионов примесей, т. е. дырки частично диффундируют в  $n$ -область, а частично рекомбинируют за счет электронов, пришедших из  $n$ -области. Подобным же образом возникает нескомпенсированный положительный заряд в полупроводнике  $n$ -типа (рис. 3). Распределение плотности  $\rho$  этих зарядов графически представлено на рис. 4.

Пространственные заряды создают в области  $p-n$  перехода электрическое поле, препятствующее дальнейшей диффузии основных носителей тока. обеднение области  $p-n$  перехода основными носителями тока ведет к повышению сопротивления этой области, и поэтому  $p-n$  переход часто называют запирающим слоем.

Рассмотрим влияние электрического поля, наложенного на запирающий слой. Пусть к  $p-n$  переходу приложена разность

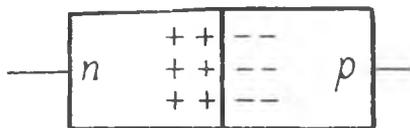


Рис. 3.

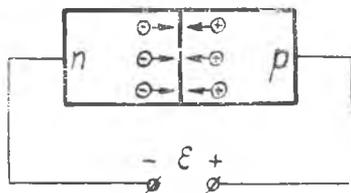


Рис. 4.

потенциалов согласно рис. 5. Возникающее при этом электрическое поле будет ослаблять поле  $p-n$  перехода, что приведет к увеличению диффузии основных носителей через  $p-n$  переход, а следовательно, к увеличению тока. Это направление тока называется прямым.

Если изменить полярность приложенного напряжения, то электроны и дырки областей  $n$ — и  $p$ — проводимости будут удаляться от границы раздела (рис. 6). В этом случае ток через  $p-n$  переход резко падает. Величина этого тока, называемого обратным, определяется наличием в каждой области небольшого числа неосновных носителей зарядов.

Таким образом,  $p-n$  переход обладает односторонней проводимостью, зависящей от полярности приложенного напряжения.

**Вольт-амперная характеристика  $p-n$  перехода.** Односторонняя проводимость  $p-n$  перехода наглядно иллюстрируется вольт-амперной характеристикой, показывающей зависимость величины тока через  $p-n$  переход от величины и полярности приложенного напряжения (рис. 7).

Следует отметить, что повышение обратного напряжения свыше  $U_{пр}$  может привести к резкому возрастанию обратного тока в результате внутренней электростатической эмиссии и лавинной ударной ионизации атомов полупроводника. В этих случаях наступает пробой  $p-n$  перехода.

Используя вольт-амперную характеристику, можно показать,

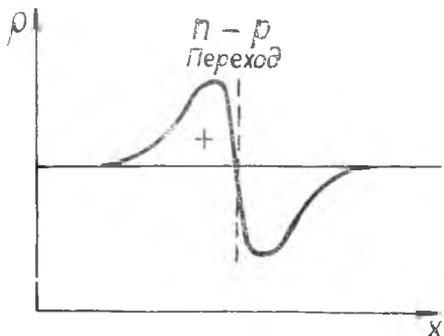


Рис. 5.

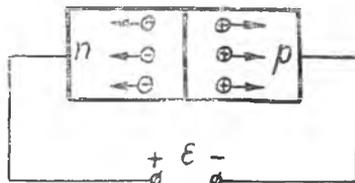


Рис. 6.

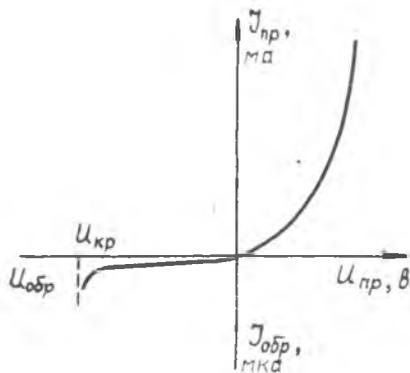


Рис. 7.

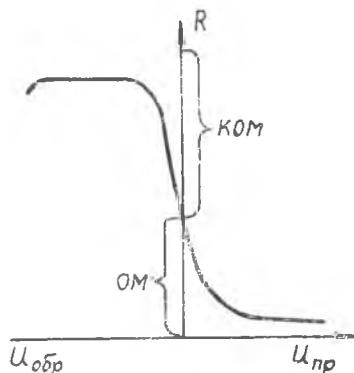


Рис. 8.

что дифференциальное сопротивление  $p-n$  перехода  $R = \frac{dU}{dI}$  также зависит от величины и полярности приложенного напряжения (рис. 8).

Свойства  $p-n$  перехода характеризуются коэффициентом выпрямления  $\alpha$ , равным отношению величин  $I_{пр}$  к  $I_{обр}$ , измеренных при одинаковых по величине прямом и обратном напряжениях

$$\alpha = \frac{I_{пр}}{I_{обр}} \quad (1)$$

**Селеновый выпрямитель как полупроводниковый прибор.** Селеновый выпрямитель состоит из двух металлических электродов, между которыми имеется тонкий слой кристаллического селена. Одним из электродов является железная никелированная шайба, служащая контактным электродом. Второй электрод представляет собой тонкий слой сплава легкоплавких металлов — кадмия, висмута и олова. Он называется вентильным электродом. В селеновом выпрямителе запирающий слой, т. е.  $p-n$  переход, имеет место на границе слоя селена с вентильным электродом.

Схематически разрез селенового выпрямителя представлен на рис. 9. Здесь: 1 — железная шайба, 2 — слой никеля (контактный электрод), 3 — слой селена, 4 — запирающий слой, 5 — слой сплава  $Bi-Cd-Sn$ .

Указанная на рис. 9 полярность соответствует прохождению прямого тока.

Если включить селеновый выпрямитель последовательно в цепь пе-

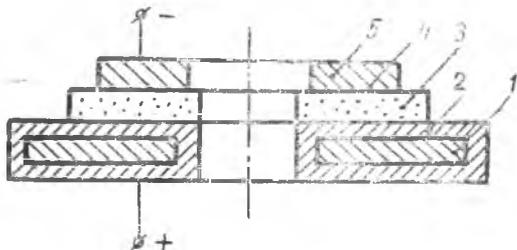
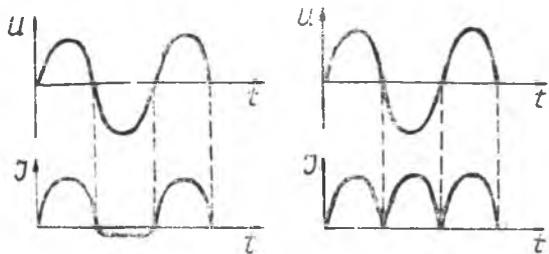


Рис. 9.



$U$  — напряжение на выпрямителе  
 $J$  — ток в цепи

Рис. 10.

ременного тока, то ток через выпрямитель пойдет лишь в течение тех полупериодов, когда на вентильном элементе будет минус, а на железной шайбе — плюс напряжения. Такая схема выпрямления называется однополупериодной.

Для того, чтобы использовать оба полупериода переменного напряжения, применяют

два селеновых выпрямителя, включенных параллельно нагрузке (см. ниже рис. 13).

График изменения тока при одно- и двухполупериодном выпрямлении показан на рис. 10.

### Упражнение 1. Получение вольт-амперной характеристики селенового выпрямителя

На рис. 11 представлена схема установки, предназначенной для получения вольт-амперной характеристики выпрямителя.

Здесь: А—В — потенциометр, позволяющий плавно регулировать величину напряжения, подаваемого на селеновый выпрямитель Д. С помощью перекидного ключа К, можно изменять направление тока через выпрямитель. В схему включены вольтметр V и трехпредельный миллиамперметр mA.

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ УПРАЖНЕНИЯ

1. Собрать схему согласно рис. 11, соблюдая полярность.
2. Установить предел измерения миллиамперметра — 50 мА.

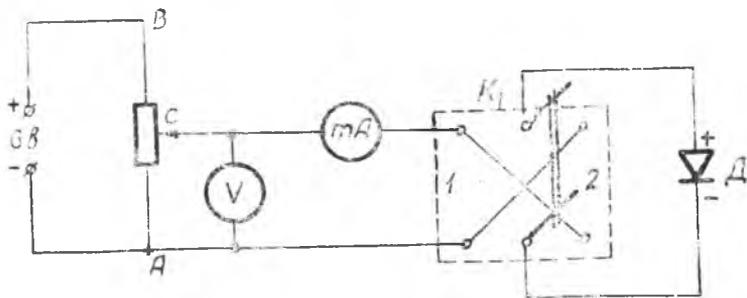


Рис. 11.

поставить перекидной ключ в положение 1, переместить ползун С в положение А и включить источник питания схемы.

3. Изменяя потенциометром напряжение примерно через 0,1 в, определить для каждого значения напряжения величину тока через выпрямитель. При переходе от малых к средним значениям напряжения миллиамперметр следует переключить на предел изменения 500 ма. Измерения произвести до тока 500 ма. Полученные результаты занести в таблицу 1.

4. Переместив ползун С в положение А, поставить перекидной ключ в положение 2. Переключить предел измерения миллиамперметра на 50 ма.

5. Следуя п. 3, снять зависимость величины обратного тока от напряжения (обратный ток не должен превышать 10—15 ма).

Результаты измерений занести в таблицу 1.

## Упражнение 2. Получение характеристики выпрямителя с помощью осциллографа

На рис. 12 представлена схема установки для получения характеристики выпрямителя непосредственно на экране осциллографа.

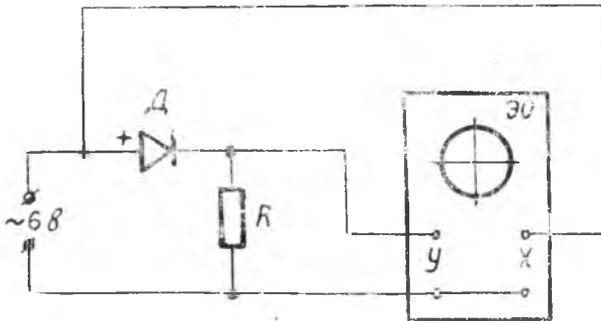


Рис. 12.

Здесь: ЭО — электронный осциллограф, Д — селеновый выпрямитель, R — нагрузочное сопротивление.

Падение напряжения на сопротивлении R, пропорциональное текущему через выпрямитель току, подводится к клеммам «У» вертикального отклонения луча осциллографа.

На клеммы «Х» горизонтального отклонения луча подводится

напряжение, подаваемое на выпрямитель. Таким образом, при включенной схеме луч осциллографа описывает кривую в следующих координатах: по вертикали — ток через выпрямитель, по горизонтали — напряжение на выпрямителе. Полученная кривая и является вольт-амперной характеристикой.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ УПРАЖНЕНИЯ

1. Собрать схему согласно рис. 12.
2. Включить осциллограф в сеть. Выключить генератор развертки и вывести луч в центр координатной сетки. Включить переменное напряжение  $\sim 6$  в.
3. Изменяя усиление ручками «Усиление Y» и «Усиление X», добиться изображения на экране кривой вольт-амперной характеристики, подобной рис. 7.
4. Зарисовать полученную кривую.

### Упражнение 3. Исследование выпрямительных схем с помощью осциллографа

На рис. 13 представлена схема установки, позволяющей осуществлять одно- и двухполупериодное выпрямление переменного тока.

Здесь:  $D_1$  и  $D_2$  — селеновые выпрямители;  $R$  — нагрузочное сопротивление; А—В — переменное сопротивление, являющееся, по существу, делителем напряжения.

Если движок сопротивления (точка С) находится посредине, то на выпрямители подаются одинаковые по величине напряжения. В этом случае за один полупериод ток проходит через выпрямитель  $D_1$  и сопротивление  $R$ . Выпрямитель  $D_2$  тока не пропускает. В следующий полупериод ток идет через выпрямитель  $D_2$  и сопротивление  $R$ .

Выпрямитель  $D_1$  тока не пропускает. Таким образом, установка работает как двухполупериодный выпрямитель.

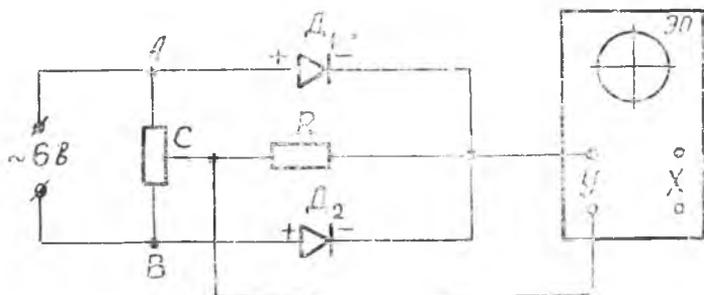


Рис. 13.

Если движок находится в каком-либо из крайних положений, то установка работает как однополупериодный выпрямитель.

Для наблюдения картины одно- или двухполупериодного выпрямления на экране осциллографа к клеммам  $У$  подводится напряжение с нагрузочного сопротивления  $R$ , которое пропорционально току. Развертка процесса во времени вдоль оси  $X$  осуществляется с помощью внутреннего генератора развертки осциллографа.

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ УПРАЖНЕНИЯ

1. Собрать схему согласно рис. 13.

2. Подготовить осциллограф к работе. Для этого следует включить генератор развертки и вращением рукоятки «Усиление  $X$ » получить на экране непрерывную горизонтальную линию. Рукочку «Синхронизация» установить в положение «Сеть».

3. Переместить ползун  $C$  в положение  $A$  и включить источник напряжения  $\sim 6$  в.

4. Манипулируя ручками «Диапазон частот», «Частота плавно», «Усиление  $У$ » и «Усиление  $X$ », добиться получения на экране картины, характерной для однополупериодного выпрямления. Зарисовать форму кривой.

5. Перемещая ползун  $C$  в положение  $B$ , наблюдать за изменением кривой на экране.

6. Установить ползун  $C$  так, чтобы на экране наблюдалась картина двухполупериодного выпрямления, с равными амплитудами в каждый полупериод. Кривую зарисовать.

#### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По измеренным значениям тока и напряжения через выпрямитель (упражнение 1) вычислить величину сопротивления выпрямителя при каждом измерении. Результаты расчетов записать в таблицу 1.

2. Вычислить значение  $\alpha$  для трех напряжений — 0,5; 1,0; 2,0 в.

3. Построить характеристики выпрямителя  $I=f(u)$  и  $R=f(u)$ . При этом рекомендуется использовать различный масштаб по оси  $У$  для областей прямого и обратного тока, подобно тому, как это сделано на рис. 7 и 8.

#### Контрольные вопросы

1. Объясните с точки зрения зонной теории различия электрических свойств проводников, полупроводников и диэлектриков.

2. Чем отличается примесная проводимость от собственной проводимости полупроводника?

3. Как изменяется проводимость полупроводников с изменением температуры?

4. Объясните процесс выпрямления переменного тока с помощью  $p-n$  перехода.
5. Нарисуйте схему двухполупериодного выпрямителя (на 2-х или 4-х диодах) и объясните принцип его работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Савельев. Курс общей физики, т. 2, изд. Наука, §§ 71, 72, 73, М., 1968.

## ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ГАЛЬВАНОМЕТРА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

**Принадлежности:** гальванометр с осветительной системой; вольтметр; реостат; делитель напряжения; магазин сопротивлений; перекидной ключ.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

**Назначение и принцип действия гальванометра.** Гальванометры магнитоэлектрической системы служат для измерения слабых токов и напряжений. Самые совершенные гальванометры позволяют измерять токи до  $10^{-11}$  ампер и напряжения до  $10^{-3}$  вольт.

Устройство гальванометра схематически представлено на рис. 1. В зазоре, образованном полюсными наконечниками постоянного магнита 1 и цилиндром из мягкого железа свободно вращается легкая катушка 5 прямоугольного (реже круглого) сечения, называемая обычно рамкой. Рамка подвешена на упругой нити 3.

Если по виткам рамки про-

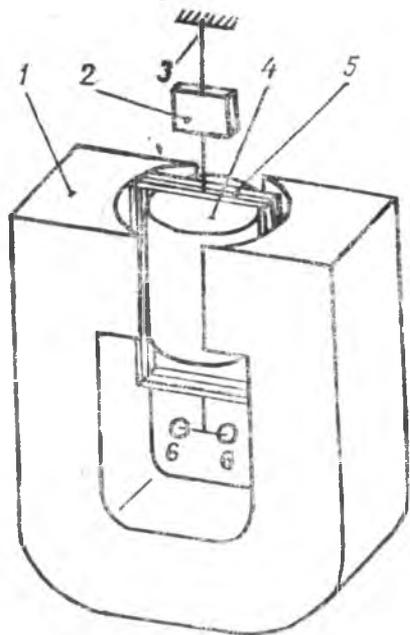


Рис. 1.

пускать ток, то, в результате взаимодействия магнитного поля тока и постоянного магнита, возникнет вращающий момент сил, который будет поворачивать рамку вокруг вертикальной оси. Перемещение рамки будет продолжаться до тех пор, пока упругий момент кручения нити не уравновесит вращающий момент. В результате этого рамка повернется на некоторый угол  $\alpha_n$ , пропорциональный величине тока.

Для измерения угла поворота рамки применяется оптическая система, которая создаст на матовой шкале изображение тонкой нити (светового указателя). Прежде чем попасть на шкалу, луч света отражается от зеркальца 2, связанного с рамкой, поэтому изображение светового указателя на шкале будет смещаться на величину, пропорциональную углу поворота рамки (при малых углах).

**Режимы работы гальванометра.** Характер движения рамки гальванометра при прохождении по ней тока можно установить на основании основного закона механики для вращательного движения

$$I \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = \sum_{i=1}^n M_i, \quad (1)$$

где  $I$  — момент инерции подвижной системы;  $\alpha$  — угол поворота рамки;  $M_i$  — момент  $i$ -ой силы, действующей на рамку.

На рамку действуют:

1. Вращающий момент  $M_1$ , обусловленный взаимодействием тока в магнитном поле:

$$M_1 = BINS, \quad (2)$$

где  $B$  — индукция магнитного поля в воздушном зазоре, в котором находится рамка;  $I$  — сила тока, протекающего по виткам рамки;  $N$  — число витков рамки;  $S$  — площадь витка рамки.

2. Тормозящий момент  $M_2$ , пропорциональный скорости вращения рамки:

$$M_2 = -r \frac{d\alpha}{dt}, \quad (3)$$

где  $r$  — коэффициент торможения.

Если пренебречь торможением рамки, обусловленным трением о воздух, то коэффициент торможения будет определяться величиной индукционных токов, наводимых в рамке при ее движении в магнитном поле. Можно показать, что в этом случае коэффициент торможения будет выражаться формулой

$$r = \frac{B^2 N^2 S^2}{R_g + R}, \quad (4)$$

где  $R_g$  — внутреннее сопротивление гальванометра;  $R$  — сопротивление внешней цепи.

3. Противодействующий момент  $M_3$ , созданный силой упругости нити:

$$M_3 = -K\alpha, \quad (5)$$

где  $K$  — модуль кручения нити.

Подставляя выражения (2), (3) и (5) в уравнение (1), получим дифференциальное уравнение движения рамки гальванометра

$$I \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + r \frac{d\alpha}{dt} + K\alpha = BINS. \quad (6)$$

Уравнение (6) представляет собой уравнение затухающих колебаний при действии постоянной силы  $BINS$ . Частота этих колебаний определяется хорошо известной формулой

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{I} - \frac{r^2}{4I^2}} = \sqrt{\frac{4IK - r^2}{4I^2}}. \quad (7)$$

Рассмотрим следующие частные случаи:

1. Если  $r^2 = 4IK$ , то  $\omega = 0$ , и рамка будет поворачиваться аperiodически, т. е. рамка будет асимптотически подходить к положению равновесия, не переходя его (рис. 2, кривая I). В этом случае гальванометр называется **критически успокоенным**.

2. Если  $r^2 > 4IK$ , то рамка также будет поворачиваться аperiodически, но с меньшей скоростью (рис. 2, кривая II). В этом случае гальванометр называется **переуспокоенным**.

3. Если  $r^2 < 4IK$ , то рамка будет совершать затухающие колебания относительно положения равновесия (рис. 2, кривая III).

Режим работы гальванометра, близкий к критическому, является практически наиболее удобным для измерений, т. к. он обеспечивает минимальное время подхода подвижной системы гальванометра к положению равновесия. Для критического режима необходимо выполнение соотношения  $r^2 = 4IK$ , которое после подстановки выражения (4) и преобразований принимает вид:

$$R_g + R = \frac{B^2 N^2 S^2}{2 \sqrt{IK}}. \quad (8)$$

Величина  $R_g + R = R_{кр}$ , называется полным критическим сопротивлением гальванометра.

Из формулы (8) следует, что критический режим работы гальванометра легче всего можно получить путем выбора соответствующего значения внешнего сопротивления —  $R$ . Часто гальванометры снабжают магнитным шунтом, который

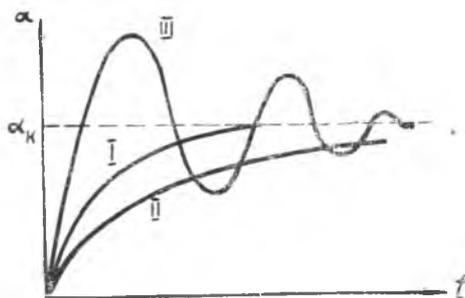


Рис. 2.

позволяет устанавливать критический режим путем изменения магнитной индукции  $B$ , что является удобным, когда внешнее сопротивление задано.

**Основные параметры гальванометра.** Если пропускать через гальванометр постоянный ток, то, при установившемся угле отклонения рамки гальванометра  $\alpha_k$ , величину тока можно определить из уравнения (6), если положить, что  $\frac{dt}{dt} = 0$  и  $\frac{d^2t}{dt^2} = 0$ .

Тогда

$$K \alpha_k = BINS, \quad (9)$$

или

$$I = C_i \alpha_k, \quad (10)$$

где величина

$$C_i = \frac{K}{BNS} \quad (11)$$

называется динамической постоянной гальванометра. Динамическая постоянная численно равна силе тока, отклоняющего рамку на угол  $\alpha = 1$ .

Величина

$$S_i = \frac{1}{C_i} = \frac{BNS}{K} \quad (12)$$

называется чувствительностью гальванометра по току.

Величина

$$S_v = \frac{S_i}{R_g} = \frac{BNS}{KR_g} \quad (13)$$

называется чувствительностью гальванометра по напряжению. Чаще пользуются понятием критической чувствительности по напряжению

$$S_{v_{кр}} = \frac{S_i}{R_{кр}} = \frac{BNS}{KR_{кр}}, \quad (14)$$

поскольку критический режим работы гальванометра наиболее часто встречается на практике.

Целью данной работы является экспериментальное определение основных параметров гальванометра и режимов его работы.

Следует иметь в виду, что гальванометр является точным, высокочувствительным прибором, требующим бережного обращения. Поэтому все описанные ниже операции нужно проводить внимательно и осторожно, не допуская зашкаливания гальванометра.

### Упражнение 1. Определение внутреннего сопротивления гальванометра

На рис. 3 представлена схема экспериментальной установки.

Здесь:  $R$  — реостат;  $D$  — делитель напряжения, состоящий из двух сопротивлений —  $R_1$  и  $R_0$ ;  $R_2$  — магазин сопротивлений;

$K_1$  — перекидной ключ;  $K_2$  — ключ, шунтирующий гальванометр. Он предназначен для быстрой остановки рамки гальванометра,  $V$  — вольтметр;  $G$  — гальванометр.

Если ключ  $K_1$  поставить в положение 1, то через гальванометр пойдет ток, величина которого определяется из уравнения

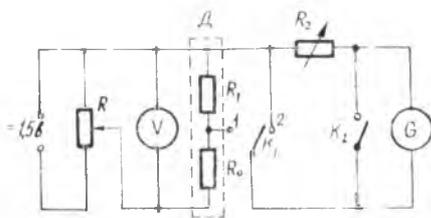


Рис. 3.

$$i_g = \frac{U_1}{R_g + R_2}, \quad (15)$$

где  $R_g$  — внутреннее сопротивление гальванометра,  $U_1$  — падение напряжения на сопротивлении  $R_1$ .

В данной работе  $R_1 \ll R_0$ , поэтому для нахождения  $U_1$  можно воспользоваться условием

$$U_1 = U \frac{R_1}{R_0}, \quad (16)$$

где  $U$  — напряжение, подаваемое на делитель  $D$  с регулируемого реостата  $R$ .

Подставляя (16) в уравнение (15), получим

$$i_g = \frac{U \frac{R_1}{R_0}}{R_g + R_2}. \quad (17)$$

Если подобрать две пары значений  $U$  и  $R_2$  так, чтобы ток оставался постоянным, то внутреннее сопротивление может быть найдено из соотношения

$$i_g = \frac{U' \frac{R_1}{R_0}}{R_g + R_2'} = \frac{U'' \frac{R_1}{R_0}}{R_g + R_2''}. \quad (18)$$

После преобразования найдем, что

$$R_g = \frac{U'' R_2' - U' R_2''}{U' - U''}. \quad (19)$$

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ УПРАЖНЕНИЯ

1. Собрать схему согласно рис. 3.
2. Включить освещение гальванометра.
3. Поставить ключ  $K_1$  в положение 1, а ключ  $K_2$  — в положение «ВЫКЛ».
4. Включить магазин сопротивлений  $R_2$  на 9999 ом.
5. Включить питание схемы и установить с помощью реостата  $R$  максимальное напряжение.

6. Поставить ключ  $K_2$  в положение «ВКЛ». Изменяя сопротивление  $R_2$ , установить отклонение светового указателя по шкале на 150 м.м. Записать полученные значения напряжения  $U'$  и сопротивления  $R_2'$ .

7. Уменьшая напряжение и величину сопротивления  $R_2$ , найти новую пару значений  $U''$  и  $R_2''$ , при которых световой указатель отклонится также на 150 м.м. Для получения большей точности при расчете внутреннего сопротивления необходимо, чтобы  $U''$  значительно отличалось от  $U'$ .

## У п р а ж н е н и е 2. Определение внешнего критического сопротивления гальванометра

Схема установки остается без изменений.

1. Установить значение сопротивления  $R_2$ , равное 9999 ом. Изменяя напряжение с помощью реостата  $R$ , добиться отклонения светового указателя примерно на 150 м.м.

2. Быстро переключить ключ  $K_1$  в положение 2. При этом гальванометр замыкается на сопротивление  $R_2$ .

3. Наблюдать, в каком режиме движения указатель подходит к нулевому положению.

4. Повторять наблюдения, постепенно уменьшая величину сопротивления  $R_2$  до тех пор, пока движение рамки не станет аperiodическим. Следует иметь в виду, что одновременно с уменьшением сопротивления  $R_2$  необходимо уменьшать и напряжение так, чтобы световой указатель не выходил за пределы отклонения в 150—200 м.м.

Значение сопротивления  $R_2$ , при котором движение рамки становится аperiodическим, будет равно внешнему критическому сопротивлению гальванометра  $R$ .

## ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. По данным упражнения 1 рассчитать внутреннее сопротивление гальванометра  $R_g$ .

2. Определить силу тока  $i_g$ , протекающего через гальванометр, по формуле (17) с использованием расчетного значения  $R_g$  и какой-либо пары значений  $U$  и  $R_2$  из упражнения 1.

3. Для расчета динамической постоянной можно воспользоваться уравнением (10), из которого следует

$$C_i = \frac{i_g}{a_R}. \quad (20)$$

При малых углах поворота рамки

$$\alpha_R = \frac{N}{2L}, \quad (21)$$

где  $N$  — число миллиметров отклонения светового указателя по шкале от нулевого положения,  $L$  — расстояние в метрах от шкалы до зеркальца гальванометра. Для данной установки  $L=1,6$  м. Подставив соотношение (21) в уравнение (20), получим окончательную формулу для определения динамической постоянной в следующем виде:

$$C_i = \frac{2 i_g L}{N} \quad (22)$$

Размерность  $C_i$  — а/мм/м.

4. Рассчитать чувствительность по току  $S_i = \frac{1}{C_i}$ .

5. Найти полное критическое сопротивление гальванометра  $R_{кр} = R_g + R$ .

6. Рассчитать критическую чувствительность гальванометра по напряжению  $S_{V_{кр}} = \frac{S_i}{R_{кр}}$ .

7. Результаты расчетов занести в таблицу 1.

Таблица 1

$R_g$ , ом	$R$ , ом	$R_{кр}$ , ом	$C_i$ , а/мм/м	$S_i$ , мм/а·м	$S_{V_{кр}}$ , мм/в·м

### Контрольные вопросы

1. Почему с помощью приборов магнитоэлектрической системы можно измерять только постоянный ток? Начертите схему, поясняющую действие гальванометра.

2. Что характеризует динамическая постоянная гальванометра и в каких единицах она измеряется?

3. К гальванометру подключено внешнее сопротивление  $R$ , которое может принимать любое значение от 0 до бесконечности. Каков будет характер движения рамки гальванометра, если: 1)  $R=0$ ; 2)  $R=R_{кр}$ ; 3)  $R>R_{кр}$ .

4. Объясните электрическую схему установки, применяемой в данной работе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Физический практикум, под редакцией В. И. Иверзеновой, изд. «Наука», задача 83, М., 1968.

2. Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, Л. Б. Милковская. Курс физики, т. II, изд. «Высшая школа», §§ 17, 2, М., 1964.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТИТАНАТА БАРИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

**Принадлежности:** электропечь с образцом титаната бария; вольтметр; микроамперметр.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Сегнетоэлектриками называются кристаллические диэлектрики, которые могут обладать спонтанной (т. е. самопроизвольной) поляризацией. Такие диэлектрики состоят из отдельных областей, называемых доменами. В каждом домене электрические моменты всех молекул ориентированы в каком-либо определенном направлении, поэтому домены оказываются полностью поляризованными даже при отсутствии электрического поля. Однако вектор поляризации достаточно большого кристалла сегнетоэлектрика равен нулю, т. к. электрические моменты доменов имеют различные направления и в целом компенсируют друг друга.

Процесс поляризации сегнетоэлектрика происходит благодаря ориентации электрических моментов доменов в направлении внешнего электрического поля. При этом величина относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  может достигать весьма больших значений — порядка несколько тысяч — даже в слабых электрических полях.

Следует отметить, что сегнетоэлектрики сохраняют свои свойства лишь в некотором интервале температур, вне которого они ведут себя как обычные диэлектрики. Граничные значения температур называются нижней и верхней точками Кюри.

Вблизи точек Кюри происходит внутренний фазовый переход в кристалле сегнетоэлектрика, который сопровождается резким увеличением относительной диэлектрической проницаемости.

Одним из наиболее известных сегнетоэлектриков является титанат бария, широко применяемый в электро- и радиотехнике.

Целью данной работы является изучение зависимости относительной диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры и определение верхней точки Кюри.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА. ОПИСАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ $\epsilon$ ТИТАНАТА БАРИЯ

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки.

В электропечи 1 помещен плоский конденсатор 2, который представляет собой пластинку титаната бария с посеребренными боковыми поверхностями, играющими роль обкладок конденсатора. Обкладки соединены с клеммами, установленными на панели в верхней части корпуса печи.

Для нагрева печи используется спиральный нагревательный элемент 4, питаемый от сети переменного тока через регулировочное сопротивление  $R$ .

Температура в рабочем объеме печи может быть определена с помощью термопары 3, соединенной с милливольтметром 5.

Если на обкладки конденсатора подать переменное напряжение  $U$ , то через образец титаната бария будет протекать ток, который можно найти по закону Ома для цепи переменного тока:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = U \omega C, \quad (1)$$

где  $Z = \frac{1}{\omega C}$  — емкостное сопротивление конденсатора,  $\omega$  — круговая частота переменного тока. Для  $\nu = 50$  гц,  $\omega = 314$  сек<sup>-1</sup>. Емкость плоского конденсатора определяется по формуле

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad (2)$$

где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  ф/м),  $S$  — площадь обкладок конденсатора,  $d$  — расстояние между обкладками.

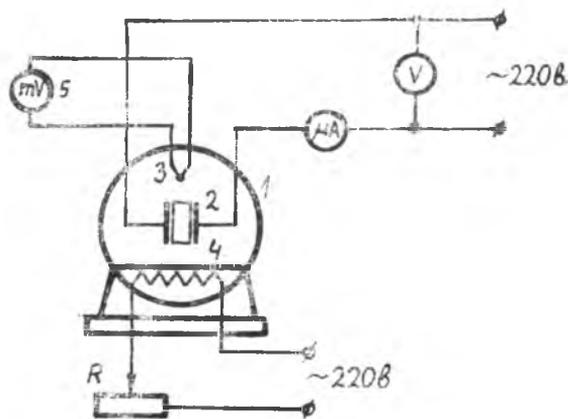


Рис. 1.

Подставляя выражение (2) в формулу (1) и решая полученное уравнение относительно  $\epsilon$ , находим

$$\epsilon = \frac{Id}{U_{0\epsilon_0} S} \quad (3)$$

Таким образом, зная ток  $I$ , проходящий через образец, геометрические размеры конденсатора и напряжение  $U$ , можно найти относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$ .

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему (рис. 1). Обратить особое внимание на правильное включение микроамперметра.

2. Включить электропечь тумблером, расположенным на передней панели печи. Реостат печи должен быть выведен.

3. В процессе нагревания титаната бария следует регистрировать напряжение  $U$  и силу тока  $I$ , проходящего через образец, а также соответствующее значение показаний милливольтметра, соединенного с термопарой —  $U_{тн}$ . Измерения необходимо проводить через 20 мка.

4. После того, как ток начнет уменьшаться, что свидетельствует о прохождении точки Кюри, печь следует выключить и продолжать измерения при охлаждении образца.

Обратить внимание на вторичное прохождение точки Кюри. Измерения заканчиваются, когда температура в печи снизится примерно до 60°C.

5. Результаты измерения записать в таблицу (столбцы 4 и 5 заполняются при обработке результатов измерений).

Таблица 1

Нагрев образца					Охлаждение образца				
$U$ , в	$I$ , мка	$U_{тн}$ , мв	$t_n$ , °C	$t$ , °C	$U$ , в	$I$ , мка	$U_{тн}$ , мв	$t$ , °C	$t$ , °C
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Пользуясь градуировочной шкалой, найти значения температуры  $t_n$  и  $t_0$ , соответствующие показаниям милливольтметра  $U_{тн}$  и  $U_{т0}$  и записать их в таблицу 1.

2. Вследствие малой теплопроводности титаната бария, температура образца несколько отличается от температуры воздуха в печи. Поэтому зависимость силы тока от температуры при нагревании и охлаждении будет различной (рис. 2).

Обозначим через  $t_1$  и  $t_2$  температуры максимума кривых для нагревания и охлаждения образца. Если считать, что разница между температурой образца и температурой в печи при нагревании и охлаждении будет одинаковой по абсолютной величине, то с достаточной степенью точности можно принять, что значение температуры  $t_K = \frac{t_1 + t_2}{2}$  будет являться точкой Кюри.

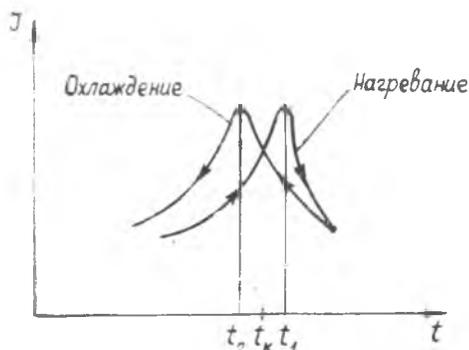


Рис. 2.

Тогда истинная температура образца при нагревании определится по формуле

$$t = t_H + \Delta t_H, \quad (4)$$

где

$$\Delta t = t_K - t_1 = \frac{t_2 - t_1}{2}. \quad (5)$$

Соответственно и при охлаждении

$$t = t_0 + \Delta t_0, \quad (6)$$

где

$$\Delta t = t_K - t_2 = \frac{t_1 - t_2}{2}. \quad (7)$$

Таким образом, результаты измерения температуры, представленные в таблице 1, необходимо скорректировать с учетом  $\Delta t_H$  и  $\Delta t_0$ . Для этого в столбцах 5 таблицы 1 записываются значения  $t_H + \Delta t_H$  и соответственно  $t_0 + \Delta t_0$ .

3. По скорректированным данным строится результирующий график зависимости  $I = j(t)$ .

4. Чтобы перейти к зависимости  $\epsilon = j(t)$ , нахождение которой является одной из задач данной работы, следует умножить каждую ординату полученного графика  $I = j(t)$  на некоторую величину  $k$ , которая легко находится из уравнения (3):

$$k = \frac{d}{U \omega \epsilon_0 S}. \quad (8)$$

Переход от  $I$  к  $\epsilon$  удобно выполнять следующим образом:

а) выписать в таблицу 2 значения  $I$ , взятые из графика  $I = j(t)$  при различных значениях температуры, которые отлича-

Таблица 2

$t$	$I$	$\epsilon$

ются друг от друга на  $10^{\circ}\text{C}$ , а вблизи точки Кюри — на  $5^{\circ}\text{C}$ ;

б) вычислить коэффициент пропорциональности  $k$  по формуле (8);

в) рассчитать  $\varepsilon$  для соответствующих значений температуры; результаты расчета записать в таблицу 2;

г) построить график зависимости  $\varepsilon = f(t)$ .

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит отличие процесса поляризации обычного диэлектрика от процесса поляризации сегнетоэлектрика?

2. Как бы вы объяснили зависимость диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от температуры?

3. Начертите схему установки, используемой в данной работе, и поясните ее.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, Л. Б. Милковская. Курс физики, т. 2, изд. «Высшая школа», §§ 6. 2, 6, 4, М., 1964.

2. И. В. Савельев. Курс общей физики, т. 2, гл. 2, М., 1968.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

**Принадлежности:** установка, смонтированная из 2-х взаимно перпендикулярных кругов, с магнитной стрелкой, осветителем и шкалой; амперметр; лабораторный автотрансформатор (ЛАТР); перекидной рубильник; выпрямитель.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Наша Земля представляет собой естественный магнит, ее магнитные полюсы находятся сравнительно недалеко от географических полюсов (рис. 1). Южный магнитный полюс Земли расположен примерно в 1500 км (в сторону Канады) от Северного географического полюса ( $\varphi = 75^\circ$  с. ш.,  $\lambda = 101^\circ$  з. д.). Северный магнитный полюс Земли имеет координаты:  $\varphi = 67,5^\circ$  ю. ш.,  $\lambda = 140^\circ$  в. д. Положение этих полюсов очень медленно меняется с течением времени (вековые изменения). Приведенные выше координаты относятся к эпохе 1962 года.

Кроме вековых изменений магнитного поля Земли наблюдаются периодические небольшие изменения его в течение года и в течение суток, имеющие сравнительно плавный и спокойный характер. На фоне этих изменений спорадически возникают неперiodические, резкие и сильные изменения магнитного поля Земли, получившие название магнитных бурь или магнитных возмущений.



Рис. 1.

Магнитные возмущения непродолжительны (6—12 часов), но они иногда приводят в высоких широтах почти к полному прекращению радиосвязи.

В среднем, напряженность магнитного поля Земли равна  $\sim 55$  а/м и представляет собой вектор, направленный в северном полушарии к северу и вниз, а в южном полушарии к северу и вверх. Поэтому вектор напряженности  $\vec{H}$  обычно раскладывают на две компоненты — горизонтальную  $H_r$  и вертикальную  $H_v$ , которые соответственно направлены параллельно и перпендикулярно горизонту

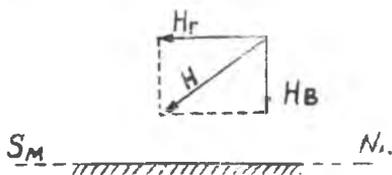


Рис. 2.

(рис. 2). В северном полушарии горизонтальная составляющая  $\vec{H}_r$  всегда направлена на Север, а вертикальная  $\vec{H}_v$  по радиусу Земли к ее центру.

Так как

$$\vec{H} = \vec{H}_r + \vec{H}_v,$$

то

$$H = \sqrt{H_r^2 + H_v^2}.$$

Как уже упоминалось, численное значение напряженности магнитного поля Земли над ее поверхностью везде примерно одинаково, хотя составляющие этого поля  $H_r$  и  $H_v$  различны на различных широтах. На экваторе  $H_v=0$ ,  $H_r=H$ , а на полюсах  $H_r=0$ ,  $H_v=H$ .

Для целей навигации и географических исследований составлены магнитные карты почти для всей нашей планеты, где по выполненным измерениям указаны величины и направления компонент магнитного поля.

Направление горизонтальной составляющей  $H_r$  всегда образует с направлением на географический Северный полюс некоторый угол, различный для разных широт и долгот, который называется углом магнитного склонения. В местах с крупными залежами железных руд величины и направления  $H_r$  и  $H_v$  резко отличаются от обычных, нормальных. Такие отклонения называют магнитными аномалиями.

В данной работе экспериментально определяется численное значение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли  $H_r$ .

Известно, что вектор напряженности магнитного поля  $H_k$ , образованного круговым электрическим током (рис. 3) перпендикулярен плоскости круга и равен

$$H_k = \frac{NI}{2R}, \quad (1)$$

где  $N$  — число витков на круге,  $I$  — сила тока в витках,  $R$  — радиус круга.

Если в центр кругового тока поместить горизонтально установленную магнитную стрелку, а плоскость круга установить в плоскости магнитного меридиана, то магнитная стрелка окажется под действием двух взаимно перпендикулярных полей — горизонтальной составляющей поля Земли  $H_{\Gamma}$  и магнитного поля

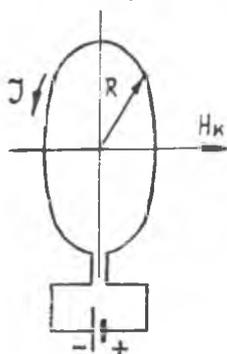


Рис. 3.

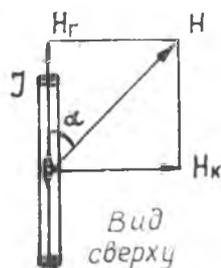


Рис. 4.

кругового тока  $H_k$ . Естественно, что магнитная стрелка в этом случае установится по направлению результирующего поля  $H$  (рис. 4), отклонившись от своего первоначального положения на угол  $\alpha$ . В этом случае соотношение между  $H_k$ ,  $H_{\Gamma}$  и  $\alpha$  имеет вид

$$H_{\Gamma} = \frac{H_k}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (2)$$

Если в формулу (2) подставить значение  $H_k$  из формулы (1), то для величины  $H_{\Gamma}$  получаем

$$H_{\Gamma} = \frac{NI}{2R \cdot \operatorname{tg} \alpha}. \quad (3)$$

Таким образом, горизонтальная составляющая Земного магнитного поля  $H_{\Gamma}$  вычисляется по измеренным значениям  $N$ ,  $I$ ,  $R$ ,  $\alpha$ . Угол  $\alpha$  отсчитывается между направлением магнитной стрелки без тока в круге и направлением стрелки при включенном токе. Следует иметь в виду, что, если плоскость кругового тока не совпадает с плоскостью магнитного меридиана, то  $H_{\Gamma}$  будет иметь более сложную математическую зависимость от измеренных значений  $N$ ,  $I$ ,  $R$  и  $\alpha$ , чем соотношение, определяемое формулой (3).

### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Два взаимно перпендикулярных круга, выполненных из немагнитного материала (дюралю) установлены на осях деревянного кронштейна (рис. 5). Кронштейн жестко укреплен на капитальной стене, чтобы свести к минимуму случайные механические вибрации. На вертикальном круге сделана обмотка из 5 витков, по

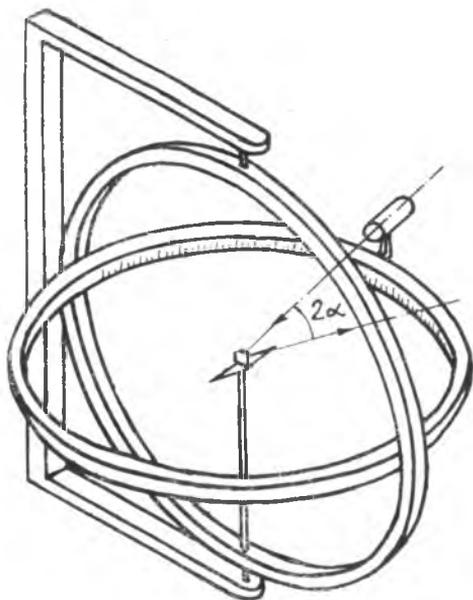


Рис. 5.

горизонтально установлена на острье магнитная стрелка, на которой укреплено небольшое вертикальное зеркальце. Стрелка с зеркалом находится под прозрачным колпаком, чтобы на ее движение не влияли воздушные потоки. Световой луч осветителя, отразившись от зеркальца стрелки, проектируется на круговую шкалу. Известно, что если зеркало поворачивается на угол  $\alpha$ , то отраженный от зеркала луч поворачивается на  $2\alpha$ .

Таким образом, в данной установке, угол поворота магнитной стрелки будет  $\alpha = \frac{\alpha'}{2}$ , где  $\alpha'$  — угол, отсчитанный по шкале с помощью светового «зайчика».

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Установка подключается к источнику электрического тока по схеме, указанной на рис. 6.

Напряжение с выходных клемм автотрансформатора (латра) обозначенных «Нагрузка», подключается к входным клеммам выпрямителя, обозначенным « $\sim 220$  в». После выпрямителя постоянное напряжение, величину которого можно регулировать поворотом рукоятки латра, подключается к перекидному рубильнику «Р» через амперметр «А». К другим клеммам этого рубильника подключаются концы витков на круге «К». Осветитель шкалы «ОСВ.» включается тумблером, расположенном на щитке стола.

которым можно пропускать электрический ток. Плоскость вертикального круга можно поворачивать вокруг вертикальной оси, но в данной установке вертикальный круг точно зафиксирован на кронштейне в плоскости магнитного меридиана.

Горизонтально расположенный круг служит для крепления отсчетной шкалы и осветителя.

Сетка шкалы имеет диапазон от  $0^\circ$  до  $180^\circ$  и разделена на угловые градусы. Каждый градус еще разделен на 3 деления. Таким образом, самое малое деление шкалы составляет 20 угловых минут.

В центре кругов на подставке из дюрала и эбонита

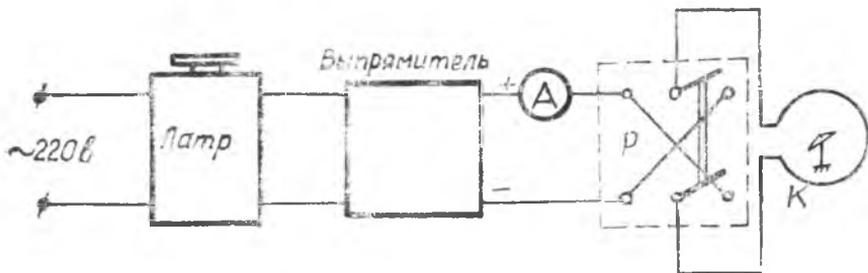


Рис. 6.

Перед тем, как включить питание лампы, следует повернуть его регулировочную рукоятку влево до упора. До включения тока в витки круга световой «зайчик» проектируется приблизительно на середину круговой шкалы. Рукоятку перекидного рубильника «Р» устанавливают в одно из положений, например, вправо, и рукояткой лампы устанавливают ток в витках круга  $L_1 = 0,5$  а. При этом «зайчик» отклонится от среднего положения и постепенно, затухающими колебаниями, установится на каком-то делении шкалы  $\alpha'$ . Записывают в таблицу ток  $I_1$  и деление шкалы  $\alpha_1$ . Рукоятку перекидного рубильника переводят теперь влево. Так как ток в витках изменил направление, то «зайчик» теперь отклонится в противоположную сторону шкалы и также постепенно установится на новом делении  $\alpha''$ , которое записывают в таблицу. Для тока  $I_1$  угол отклонения стрелки  $\alpha_1$  определится соотношением

$$\alpha_1 = \frac{\alpha'_1 - \alpha''_1}{2}$$

Ток  $I_1 = 0,5$  а перекидным рубильником коммутируют 3 раза и определяют 3 значения углов  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ . Среднее значение из них

$$\bar{\alpha}_1 = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{3}$$

подставляют в формулу (3) и вычисляют первое значение горизонтальной составляющей  $H_{Г1}$ .

В таком же порядке выполняются опыты с другими токами в витках:  $I_2 = 1$  ампер,  $I_3 = 1,5$  ампера. Соответственно вычисляются  $H_{Г2}$  и  $H_{Г3}$ . Вычисление напряженности магнитного поля выполняется в  $\frac{H}{\Delta l}$  (в амперах на метр) с точностью до десятых долей.

Все отсчеты и вычисления записываются в таблицу.

Величина горизонтальной составляющей магнитного поля Земли для данного места определяется по данным опыта

$$H_{Г1} = \frac{H_{Г1} + H_{Г2} + H_{Г3}}{3}$$

Таблица измерений

Ток в витках	№ опыта	Отклонение зайчика в градусах и минутах		$\alpha = \frac{\alpha' - \alpha''}{4}$	$\alpha_{cp} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{3}$	$H_{\Gamma} = \frac{NI}{2R \operatorname{tg} \alpha}$
		$\alpha'$	$\alpha''$			
$I_1$	1			$\alpha_1$	$\alpha_{cp_1}$	$H_{\Gamma_1}$
	2			$\alpha_2$		
	3			$\alpha_3$		
$I_2$	1			$\alpha_1$	$\alpha_{cp_2}$	$H_{\Gamma_2}$
	2			$\alpha_2$		
	3			$\alpha_3$		
$I_3$	1			$\alpha_1$	$\alpha_{cp_3}$	$H_{\Gamma_3}$
	2			$\alpha_2$		
	3			$\alpha_3$		

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИИ

В данной работе к числу величин, которые входят в расчетную формулу (3), но не подлежат измерению, относятся: число витков на вертикальном круге  $N = 5$ , радиус круга  $R = 0,360$  м.

Измеряемыми величинами являются ток в витках  $I$  (в амперах) и угол поворота стрелки  $\alpha$  (в градусах).

Используя формулу (3), можно получить выражение для нахождения абсолютной ошибки  $\Delta H$ .

$$\Delta H = \frac{N}{2R} \left[ \frac{\Delta I \operatorname{tg} \alpha + \frac{I \cdot \Delta \alpha}{\cos^2 \alpha}}{\operatorname{tg}^2 \alpha} \right] \quad (4)$$

На данной установке ток можно измерять с точностью  $\Delta I = \pm 0,01$  а, а угол с точностью  $\Delta \alpha = \pm 10'$ .

Подставив значения  $\Delta I$ ,  $\Delta \alpha$  и ток  $I = 1$  а, который отклоняет стрелку примерно на  $30^\circ$ , в формулу (4), убеждаемся, что лабораторная установка позволяет определить напряженность поля с относительной погрешностью  $\pm 1\%$ .

**Подсчет ошибок.** По результатам измерений определяются абсолютные ошибки отдельных измерений, средняя абсолютная ошибка и средняя относительная ошибка.

Среднюю относительную ошибку, полученную в опыте, сравнивают с ошибкой, допускаемой установкой.

### Контрольные вопросы

1. Почему на экваторе  $H_n=0$ ,  $H_r=H$ , а на полюсах (каких?)  $H_r=0$ ,  $H_n=H$ ?
2. Начертите схему используемой в данной работе установки и объясните, как с ее помощью определяется величина  $H_r$ .
3. Известен ли вам какой-либо другой метод определения напряженности магнитного поля Земли? Опишите его.
4. Однородно ли магнитное поле во всех точках поверхности, ограниченной круговым электрическим током?

### ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Савельев. Курс общей физики, т. 2. изд. «Наука», М., 1968.
2. Н. В. Кашин. Курс физики, т. II, М. 1963.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ ФЕРРОМАГНЕТИКА

**Принадлежности:** термостат с исследуемым образцом, милливольтметр, миллиамперметр.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Вещество, помещенное в магнитное поле, под его воздействием приходит в особое состояние, которое называется состоянием намагниченности. Одинаковые внешние магнитные поля сообщают разным веществам различную намагниченность.

Вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ , который характеризует магнитное поле в веществе, связан с напряженностью намагничивающего поля  $\vec{H}$ , которое создается токами проводимости, соотношением

$$B = \mu \mu_0 \vec{H}, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная. Магнитная индукция поля в вакууме равна  $\vec{B}_{\text{вак}} = \mu_0 \vec{H}$ .

Величина, определяемая формулой

$$\mu = \frac{B}{B_{\text{вак}}} = \frac{B}{\mu_0 H},$$

называется относительной магнитной проницаемостью вещества. Она показывает, во сколько раз магнитная индукция в веществе больше магнитной индукции поля в вакууме, и представляет собой характеристику магнитных свойств вещества. Относительная магнитная проницаемость связана с другой характеристикой вещества — магнитной восприимчивостью  $\chi$

$$\mu = 1 + \chi. \quad (2)$$

В общем случае направление намагниченности (т. е. направление вектора  $\vec{B}$ ) в веществе не совпадает с направлением напряженности внешнего намагничивающего поля, и только в магнитоизотропных веществах имеет место совпадение этих направлений.

Вещества, у которых магнитная восприимчивость отрицательна (следовательно,  $\mu < 1$ ), называются диамагнетиками. Вещества с положительной магнитной восприимчивостью ( $\mu > 1$ ) называются парамагнетиками. О приблизительной величине магнитной восприимчивости и относительной магнитной проницаемости указанных типов магнетиков можно судить по табличным данным для некоторых веществ:

диамагнетики:	медь	$\chi = -0,7 \cdot 10^{-6}$ ,	$\mu = 1 - 0,7 \cdot 10^{-6}$ ,
	висмут	$\chi = -14 \cdot 10^{-6}$ ,	$\mu = 1 - 14 \cdot 10^{-6}$ ,
парамагнетики:	алюминий	$\chi = +0,6 \cdot 10^{-6}$ ,	$\mu = 1 + 0,6 \cdot 10^{-6}$ ,
	кислород	$\chi = +1,0 \cdot 10^{-4}$ ,	$\mu = 1 + 1,0 \cdot 10^{-4}$ .

Вещества, у которых магнитная восприимчивость во много раз больше единицы (сотни, тысячи и десятки тысяч), называются ферромагнетиками. Ферромагнетиками являются железо, никель, кобальт, гадолиний и их сплавы. Характерно, что сплавы некоторых неферромагнитных элементов (марганец—висмут, хром—теллур и др.) имеют большое значение магнитной восприимчивости. Такие сплавы также называют ферромагнетиками.

Процесс намагничивания ферромагнитных тел сопровождается изменением их линейных размеров и, следовательно, объемов. Это явление носит название магнитоэстрикции.

Существенной особенностью ферромагнитных материалов является зависимость относительной магнитной проницаемости от величины намагничивающего поля. Вначале она быстро возрастает с возрастанием напряженности внешнего намагничивающего поля  $H$ , достигает максимума, а затем медленно убывает, стремясь к единице при сильных намагничивающих полях (рис. 1).

В основе теории магнитных свойств вещества лежат представления об орбитальных и спиновых магнитных моментах электронов, из которых складываются магнитные моменты взаимодействующих между собою атомов. Как известно, магнитный момент электрического тока, текущего по плоскому контуру, который охватывает площадь  $S$  (рис. 2), определяется произведением силы тока на площадь:

$$P_m = IS. \quad (3)$$

Следовательно, орбитальному движению электрона в атоме должен соответствовать магнитный момент

$$P_m = \frac{1}{2} e v r, \quad (4)$$

где  $e$  — заряд электрона,  $v$  — линейная скорость орбитального движения электрона,  $r$  — радиус орбиты электрона (рис. 3). Учет

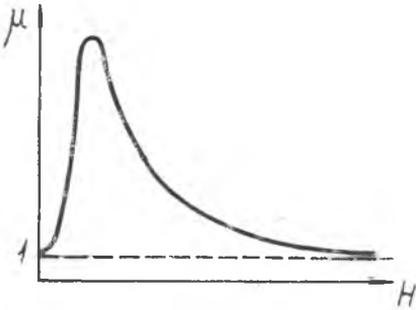


Рис. 1.

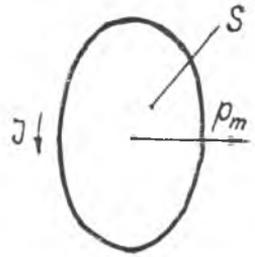


Рис. 2.

орбитальных магнитных моментов позволяет объяснить диамагнетизм и парамагнетизм.

Ферромагнетизм объясняется взаимодействием собственных магнитных моментов электронов. Каждый электрон, как показывают экспериментальные исследования, обладает собственным магнитным моментом  $P_{ms}$ , так называемым спиновым магнитным моментом:

$$P_{ms} = \frac{h}{4\pi} \cdot \frac{e}{m}.$$

Здесь  $h$  — постоянная Планка,  $e$  — заряд электрона,  $m$  — масса электрона. Величина  $\frac{h}{4\pi} \cdot \frac{e}{m} = 9,27 \cdot 10^{-24} \frac{дж}{тл}$  называется магнетон Бора, так что спиновый момент электрона равен одному магнетону Бора.

Большие значения  $\mu$  для ферромагнитных веществ и то, что их намагниченность достигает почти насыщения в относительно слабых полях, объясняется сильным взаимодействием между электронами соседних атомов. Это взаимодействие приводит к тому, что спиновые магнитные моменты отдельных электронов ориентируются параллельно друг другу в относительно небольших объемах порядка  $10^{-10} \text{ см}^3$ . Такие микроскопические области ферромагнитного кристалла с однородной самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью называются доменами. Их существование является основным признаком, отличающим ферромагнетики от диамагнетиков и парамагнетиков.

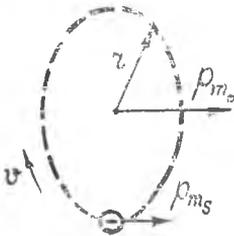


Рис. 3.

Когда отсутствует внешнее магнитное поле, магнитные моменты областей спонтанного намагничивания ориентированы хаотично, в результате чего тело в среднем не намагничено. Наложение сравнительно небольшого внешнего поля вызывает поворот вектора намагничивания каждой области вдоль поля, и тело становится намагниченным почти до насыщения.

Ферромагнетики сохраняют свои свойства лишь до определенной для каждого вещества

температуры, называемой точкой Кюри. Вблизи точки Кюри энергия теплового движения становится близкой к энергии взаимодействия электронов, и силы взаимодействия уже не могут сохранить определенную ориентацию магнитных моментов спинов. При этом области спонтанного намагничивания разрушаются, и тело становится парамагнитным.

Для различных ферромагнетиков точка Кюри различная. Например, для железа  $T_K=1048^\circ\text{K}$ , для никеля  $T_K=633^\circ\text{K}$ , для кобальта — около  $1400^\circ\text{K}$ .

#### ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Исследуемый образец-феррит, точку Кюри которого необходимо определить, выбран в виде прямоугольной рамы, которая используется в качестве сердечника трансформатора переменного тока (рис. 4).

В качестве изолирующего материала между витками обмоток применена слюда. Ферритовый трансформатор помещен в термостат. Температура в термостате измеряется с помощью термометра.

Рассмотрим режим работы трансформатора. Во вторичную обмотку включен только измерительный прибор с омическим сопротивлением. Ток в этой обмотке  $I_2$  составляет несколько миллиампер, поэтому работа трансформатора близка к работе его холо-

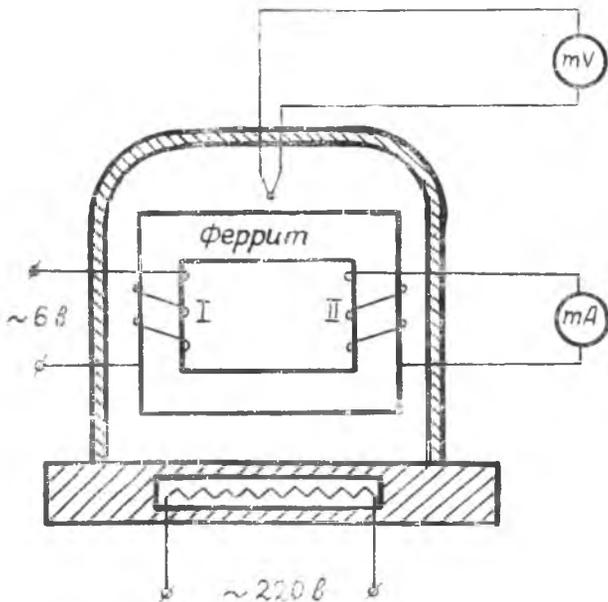


Рис. 4.

стого хода. По закону Ома для участка цепи с омическим  $R_1$  и индуктивным сопротивлением  $\omega L_1$  ток в первичной обмотке  $I_1$  определится по формуле

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} \quad (5)$$

где  $U$  — переменное напряжение, приложенное к первичной обмотке;  $R_1$  — омическое сопротивление первичной обмотки;  $H\omega L_1$  — индуктивное сопротивление этой обмотки;  $\omega$  — круговая частота переменного тока.

При нагревании трансформатора до точки Кюри, его сердечник превращается из ферромагнетика в парамагнетик, и индуктивность  $L_1$  уменьшается почти до нуля. Поэтому индуктивное сопротивление трансформатора стремится к нулю  $[\omega L_1 \rightarrow 0]$ . Чтобы не допустить в этом случае сильного возрастания тока  $I_1$  в первичной обмотке, ее витки выполнены не из медного, а из константанового провода с омическим сопротивлением около 200 ом.

Вторичная обмотка имеет омическое сопротивление  $R_2$ , индуктивное —  $\omega L_2$  и нагружена омическим сопротивлением измерительного прибора  $R_n$ .

Воспользуемся законом Фарадея для электромагнитной индукции и законом Ома для замкнутой цепи, чтобы определить величину тока  $I_2$  во вторичной обмотке

$$\varepsilon_{\text{инд}} = -L_{12} \frac{dI_1}{dt}, \quad (6)$$

где  $L_{12}$  — взаимная индукция обмоток:

$$L_{12} = \frac{\mu_0 \mu S N_1 N_2}{e}. \quad (7)$$

Ток во вторичной обмотке можно найти по формуле

$$I_2 = \frac{\varepsilon_{\text{инд}}}{R_{\text{общ}}}, \quad (8)$$

где  $R_{\text{общ}}$  — общее сопротивление вторичной обмотки и включенной нагрузки

$$R_{\text{общ}} = \sqrt{(R_n + R_2)^2 + (\omega L_2)^2}. \quad (9)$$

Подставляя (9), (6) и (7) в формулу (8), получим

$$I_2 = \frac{1}{\sqrt{(R_n + R_2)^2 + (\omega L_2)^2}} \cdot \frac{\mu_0 \mu S N_1 N_2}{e} \cdot \frac{dI_1}{dt}. \quad (10)$$

Здесь  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость сердечника трансформатора;  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $S$  — площадь поперечного сечения сердечника;  $l$  — средняя длина рамки сердечника;  $N_1$  и  $N_2$  — число витков в первичной и вторичной обмотках

$/N_1 \gg N_2/; \frac{dI_1}{dt}$  — скорость изменения тока в первичной обмотке.

Для данной конструкции трансформатора омическое сопротивление вторичной обмотки вместе с сопротивлением прибора значительно больше индуктивного сопротивления, т.е.  $(R_n + R_2) \gg \omega L_2$ . Поэтому для тока  $I_2$  можно написать более простое, но достаточно точное соотношение

$$I_2 = \frac{\mu_0 \mu S N_1 N_2}{e (R_n + R_2)} \cdot \frac{dI_1}{dt} \quad (11)$$

Таким образом, ток  $I_2$  во вторичной обмотке пропорционален относительной магнитной проницаемости  $\mu$  материала сердечника трансформатора. Все остальные величины, входящие в последнюю формулу, для данной установки постоянны.

При температуре Кюри, когда наступает магнитное превращение материала, его относительная магнитная проницаемость  $\mu$  стремится от больших значений к единице. При этом ток  $I_2$  во вторичной обмотке резко уменьшается. Это явление положено в основу метода для определения точки Кюри ферромагнетиков.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать установку согласно схеме, изображенной на рис.4.
2. Включить питание установки. В процессе нагревания трансформатора следует записывать в таблицу 1 величину силы тока во вторичной обмотке и показания милливольтметра, соединенного с термопарой. Измерения необходимо проводить более часто при температуре, близкой к точке Кюри, когда сила тока во вторичной обмотке быстро уменьшается.

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИИ

Зависимость тока  $I_2$  во вторичной обмотке трансформатора с ферритовым сердечником изображают графически на миллиметровой бумаге. По горизонтальной оси откладывают температуру. В данной работе температура в термостате определяется с помощью термопары. Для перехода от показаний прибора, соединенного с термопарой, к температуре необходимо пользоваться тарировочным графиком, который имеется на установке. Термопара дает лишь разность между температурой в термостате и комнатной температурой, поэтому температура в термостате должна определяться по формуле

Таблица 1

$I_2, \text{мА}$	$u_t, \text{мВ}$	$t, \text{°C}$

$$t = t_{\text{приб.}} + t_{\text{комн.}}, \quad (12)$$

где  $t_{\text{приб.}}$  — температура, най-

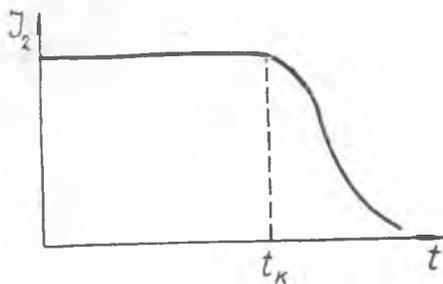


Рис. 5.

Следовательно, постепенный спад тока указывает также и на характер прогрева образца по его глубине.

Точку Кюри определяют по той температуре  $t_K$ , при которой начинается уменьшение тока (рис. 5).

Следует также иметь в виду, что малые колебания тока в цепи миллиамперметра в большую и меньшую стороны могут происходить от различных причин, в частности, от колебаний напряжения в сети.

### Контрольные вопросы

1. Объясните физический смысл величины  $\mu$ .
2. Чем отличаются диамагнетики от парамагнетиков?
3. Какова особенность ферромагнетиков? При каких условиях ферромагнетик переходит в парамагнетик? Как этот переход объясняется с точки зрения доменной теории?
4. Покажите, что между магнитной проницаемостью  $\mu$  сердечника трансформатора и током  $I_2$  во вторичной обмотке в условиях данного эксперимента должна быть прямая зависимость.

### ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Савельев. Курс общей физики, т. 2, гл. VII, М., 1968.
2. С. Г. Калашников, Электричество, гл. XI, М., 1964.

денная по тарифовочному графику и показаниям прибора;  $t_{\text{комн.}}$  — комнатная температура.

Следует иметь в виду, что материал сердечника повышает свою температуру не одинаково по всему сечению. В процессе нагрева сначала только верхние его слои имеют температуру, которую мы измеряем с помощью термомпары, а температура более глубоких слоев еще низкая.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ФЕРРОМАГНЕТИКЕ ОТ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

**Принадлежности:** исследуемый образец (тороид, изготовленный из железа «армко», с двумя обмотками); нормальная катушка; баллистический гальванометр типа М25/3; многопредельный амперметр типа М104; перекидные ключи; реостаты.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Известно, что внесение диэлектриков в электрическое поле вызывает изменение этого поля, обусловленное **поляризацией** диэлектриков. Аналогично и внесение магнетиков в магнитное поле вызывает изменение этого поля, обусловленное **намагничиванием** магнетиков. При этом магнетиками мы называем все тела, присутствие которых способно либо видоизменять, либо возбуждать магнитное поле.

Результаты экспериментов показывают, что лишь часть магнетиков полностью размагничивается при исчезновении внешнего поля. Существует еще класс магнетиков (т.н. ферромагнетики), способных оставаться намагниченными и после исчезновения внешнего поля, т.е. способных не только видоизменять, но и самостоятельно возбуждать магнитное поле независимо от наличия электрических токов. Аналогично и среди диэлектриков существует подобный класс веществ — т.н. сегнетоэлектрики, которые имеют по отношению к электрическому полю свойства, внешне сходные со свойствами ферромагнетиков (наличие остаточной поляризации, петли гистерезиса и т. д.).

Для характеристики намагничивания вещества вводится

вектор намагничивания  $\vec{I}$ , который определяется как векторная сумма магнитных моментов молекул в единице объема:

$$\vec{I} = \frac{\sum \vec{P}_M}{\Delta V}, \quad (1)$$

где  $\vec{P}_M$  — магнитный момент отдельной молекулы;  $\Delta V$  — физически бесконечно малый объем, взятый в окрестности рассматриваемой точки. Одной из основных задач теории магнетизма является установление связи между намагниченностью  $\vec{I}$  и напряженностью магнитного поля  $\vec{H}$ .

По характеру зависимости  $\vec{I}$  от  $\vec{H}$  магнетики разделяются на три класса. В парамагнетиках и диамагнетиках вектор пропорционален  $\vec{H}$

$$\vec{I} = \chi \vec{H}, \quad (2)$$

где  $\chi$  — магнитная восприимчивость вещества. Для парамагнетиков  $\chi > 0$ , т. е. направление намагниченности совпадает с направлением поля, а для диамагнетиков  $\chi < 0$ , т. е. направление намагниченности противоположно направлению поля. Величина  $\chi$  для указанных двух классов магнетиков зависит только от физико-химических свойств веществ. Она имеет численное значение порядка  $10^{-6}$ .

Для третьего класса магнетиков — **ферромагнетиков** — связь между  $\vec{I}$  и  $\vec{H}$  весьма сложная, и она не может быть описана простой формулой. Так, в ферромагнетиках наблюдается явление гистерезиса, т. е. зависимость намагниченности от предшествующей истории данного образца: находился ли он раньше в поле, какова была величина и направление поля и т. д. Формально и для ферромагнетиков можно определить  $\chi$  как отношение намагниченности к напряженности поля, но в этом случае  $\chi$  не является материальной константой, зависящей лишь от химического состава вещества и его физических свойств. Магнитная восприимчивость ферромагнетика зависит и от способа изготовления образца, от его термообработки, от напряженности поля, в котором находился образец, и от ряда других факторов.

Чрезвычайная сложность ферромагнитных явлений обуславливается весьма значительными силами взаимодействия между смежными атомами ферромагнетика (т. н. обменными силами). Природа этих сил может быть объяснена только в рамках квантовой механики. Однако формальное введение зависящих от ориентации сил взаимодействия между атомами позволило и в рамках классической теории ферромагнетизма, разработанной Вейс-

сом, разобраться в целом ряде основных закономерностей ферромагнетизма.

Согласно Вейссу, энергия атома будет тем меньше, чем ближе совпадает направление его магнитного момента с направлением намагниченности  $\vec{I}$ , т. е. наличие сильного поля обменных сил должно проявляться в тенденции магнитных моментов атомов ориентироваться в одном и том же направлении, иначе говоря, в тенденции к самопроизвольному (спонтанному) намагничиванию вещества. При установлении собственных магнитных моментов всех атомов в одном направлении имеет место состояние, т. н. **насыщения намагниченности**. Однако, как показывает опыт, обычное состояние ферромагнетика, вообще говоря, немагнитное. Это обстоятельство объясняется с точки зрения принципа минимума суммарной свободной энергии ферромагнетика. Действительно, представим себе ферромагнетик в состоянии насыщения и подсчитаем его свободную энергию. Затем мысленно будем дробить его и представлять состоящим из отдельных участков, магнитные моменты которых ориентированы произвольно по отношению друг к другу. Такое изменение должно было бы привести к увеличению потенциальной энергии поверхностей раздела (поскольку именно там действуют обменные силы) и к уменьшению объемной энергии магнитного поля, возбуждаемого ферромагнетиком в целом, т. е. к уменьшению свободной энергии.

При таком дроблении на достаточно мелкие области намагничивания мы должны дойти до минимума свободной энергии. При этом, по нашему предположению, микроскопические области, на которые мы поделили объем ферромагнетика намагничены до насыщения даже в отсутствии внешнего поля. Эксперимент подтверждает наличие таких областей спонтанного намагничивания (доменов). Линейные размеры доменов невелики — порядка  $10^{-3}$  см.

Исследования показали, что, вообще говоря, процесс намагничивания ферромагнетиков происходит скачкообразно. Объясняется это тем, что под действием внешнего намагничивающего поля происходит скачкообразное изменение ориентации магнитных моментов отдельных доменов или целых группы доменов. Таким образом, процесс намагничивания ферромагнетиков представляет собой процесс ориентации по полю магнитных моментов доменов вплоть до насыщения.

При намагничивании вещества суммарное магнитное поле характеризуется вектором магнитной индукции  $\vec{B}$ , который определяется напряженностью внешнего магнитного поля и вектором намагничивания

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{I}, \quad (3)$$

откуда, воспользовавшись формулой (2), получим

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi \vec{H} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H}, \quad (4)$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  гн/м — магнитная постоянная.

Величина  $\mu = 1 + \kappa$  называется относительной магнитной проницаемостью данного вещества.

Как указывалось выше,  $\kappa$ , а следовательно, и  $\mu$ , являются сложной функцией многих величин. В данной работе предлагается произвести экспериментальное определение зависимости магнитной индукции  $\vec{B}$  ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля, после чего следует найти функцию  $\mu = f(H)$ .

## ОПИСАНИЕ МЕТОДА СНЯТИЯ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Впервые полное экспериментальное исследование зависимости  $\vec{B}$  от  $\vec{H}$  было проведено в 1871/72 гг. профессором Московского университета А. Г. Столетовым. Предложенный им баллистический метод дает надежные количественные результаты при использовании простых экспериментальных средств.

А. Г. Столетов указал также, как учитывать влияние геометрической формы образца на результаты измерения  $\vec{B}$ . Только после этого из магнитных измерений стали получаться данные, характеризующие свойства вещества независимо от формы образца.

А. Г. Столетов показал, что при точных измерениях форма образца должна быть такой, чтобы намагниченность была однородной. Это имеет место только для образцов эллипсоидальной и тороидальной формы с небольшим отношением ширины сечения к его диаметру.

Сущность метода А. Г. Столетова заключается в следующем. Баллистический гальванометр включается в цепь катушки, помещаемой в магнитное поле, напряженность которого надо определить. Полный магнитный поток (потокосцепление) через катушку выражается формулой

$$\Psi = \vec{B} n_1 S N, \quad (5)$$

где  $S$  — сечение одного витка,  $N$  — число витков,  $\vec{n}_1$  — единичный вектор нормали к плоскости витка.

При изменении потокосцепления в катушке возникает э. д. с. индукции

$$\varepsilon = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (6)$$

и, следовательно, в цепи гальванометра появляется ток

$$I = - \frac{1}{R} \cdot \frac{d\Psi}{dt} = \frac{dq}{dt}, \quad (7)$$

где  $q$  — количество электричества,  $R$  — сопротивление цепи катушка-гальванометр.

Последнее равенство позволяет сделать заключение, что при изменении магнитного потока, сцепленного с катушкой, на величину  $\Delta\Psi$  через рамку гальванометра пройдет количество электричества

$q = -\frac{\Delta\Phi}{R}$ . В данном методе используется баллистический гальванометр с большим периодом собственных колебаний  $T$ . Если время протекания тока  $i \ll T$ , то движение рамки гальванометра в основном происходит уже **после** прохождения тока, вызывающего ее поворот. Легко показать, что при этом величина максимального угла поворота рамки гальванометра оказывается пропорциональной количеству электричества, протекшего через нее (см. работу № 16).

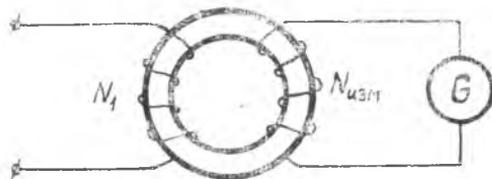


Рис. 1.

Таким образом, с помощью баллистического гальванометра можно определить величину изменения магнитного потока, а затем — его индукцию.

Этот метод нашел широкое применение в практике магнитных измерений.

Обычно на тороидальный образец, изготовленный из испытуемого материала, наматываются две обмотки: намагничивающая, с числом витков  $N_1$ , и измерительная — с числом витков  $N_{\text{тор}}$  (рис. 1). Магнитный поток в тороиде изменяется путем перемены направления тока в намагничивающей обмотке на обратное. (Процесс переключения тока принято называть коммутацией. Этот термин и будем употреблять в дальнейшем).

При коммутации вектор  $\vec{B}$  меняет направление на обратное, в результате чего изменение магнитного потока через сечение измерительной обмотки оказывается равным

$$\Delta\Phi = \vec{B}n_1SN_{\text{тор}} - (-\vec{B})n_1SN_{\text{тор}}, \quad (8)$$

или, учитывая, что в тороиде  $\vec{B} \parallel \vec{n}_1$ , т. е.  $\vec{B}n_1 = B$ ,

$$\Delta\Phi = 2BSN_{\text{тор}},$$

откуда

$$B = \frac{\Delta\Phi}{2SN_{\text{тор}}} = \frac{qR}{2SN_{\text{тор}}}. \quad (9)$$

Напряженность поля находится расчетным путем:

$$H = n_{\text{тор}} I_{\text{тор}}, \quad (10)$$

где  $n_{\text{тор}}$  — число витков на единицу длины средней линии тороида;

$I_{\text{тор}}$  — сила тока в намагничивающей обмотке тороида.

Измерив баллистическим гальванометром величину заряда  $q$  при различных силах тока  $I$ , можно построить кривую намагничивания, т. е. найти функцию  $B = f(H)$ .

На практике подобные измерения обычно проводятся путем сравнения индукции в испытуемом образце с индукцией известного

магнитного поля. Для этого пользуются длинным прямым соленоидом, называемым нормальной катушкой, на котором намотана короткая измерительная обмотка. Поле нормальной катушки рассчитывается также по формуле (11), причем длина катушки обеспечивает достаточную точность в оценке  $H$ .

При коммутации тока в нормальной катушке показание  $\beta$  гальванометра пропорционально изменению полного магнитного потока через измерительную обмотку нормальной катушки

$$\Delta\Phi_{\text{норм}} = 2BS_{\text{норм}}N_{\text{изм}} = 2\mu_0 n_{\text{норм}} I_{\text{норм}} S_{\text{норм}} N_{\text{норм}} = AB, \quad (11)$$

где  $n_{\text{норм}}$  — число витков на единицу длины нормальной катушки;  $S_{\text{норм}}$  — сечение нормальной катушки;  $N_{\text{норм}}$  — число витков измерительной обмотки;  $A$  — постоянная данной установки.

Пусть, с другой стороны, при коммутации тока в намагничивающей обмотке тороида показание гальванометра будет  $\alpha$ . Тогда изменение полного магнитного потока через измерительную обмотку тороида определится по формуле

$$\Delta\Phi_{\text{тор}} = 2BS_{\text{тор}}N_{\text{тор}} = A\alpha, \quad (12)$$

где  $S_{\text{тор}}$  и  $N_{\text{тор}}$  соответственно сечение тороида и полное число витков его измерительной обмотки.

Отсюда

$$B = \frac{A\alpha}{2S_{\text{тор}}N_{\text{тор}}}. \quad (13)$$

Если исключить  $A$  из уравнения (12) и (13), то для индукции в тороиде получим:

$$B = \frac{\mu_0 n_{\text{норм}} S_{\text{норм}} N_{\text{норм}}}{S_{\text{тор}} \cdot N_{\text{тор}}} \cdot \frac{I_{\text{норм}}}{\beta} \alpha. \quad (14)$$

Таким образом, измерения индукции в тороиде сводятся к сравнению показаний гальванометра при коммутации тока в намагничивающей обмотке нормальной катушки, а затем в намагничивающей обмотке тороида.

Величину относительной магнитной проницаемости  $\mu = 1 + \kappa$  можно найти из формулы (4)

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (15)$$

В системе СИ единица измерения магнитной индукции называется *тесла* или *вебер/м<sup>2</sup>* [ $\text{кг} \cdot \text{сек}^{-2} \cdot \text{а}^{-1}$ ].

Единица измерения напряженности магнитного поля называется *ампер/м* [ $\text{М}^{-1} \cdot \text{а}$ ].

Относительная магнитная проницаемость  $\mu$  — безразмерная величина, одинаковая в различных системах единиц.

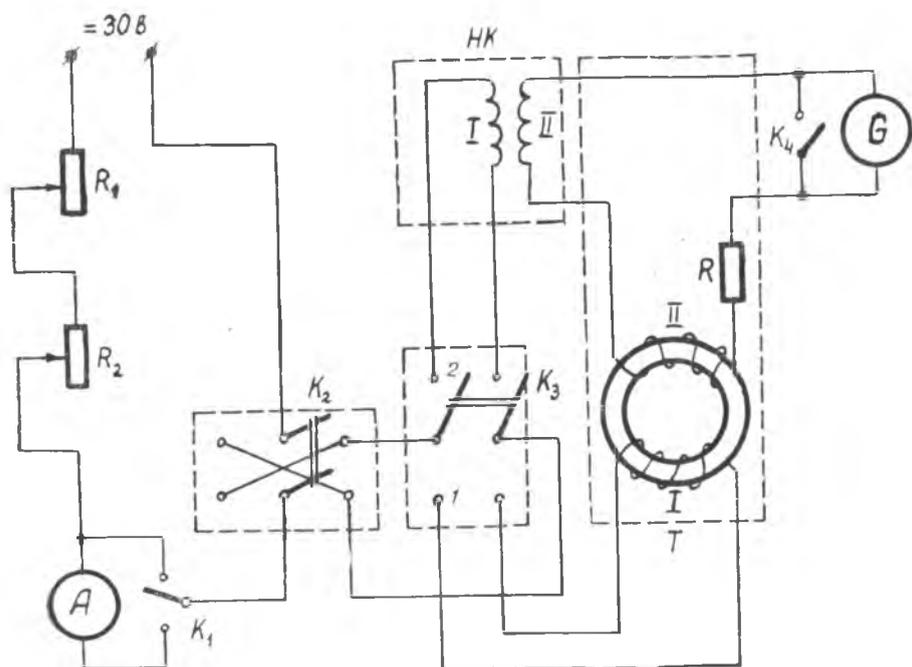


Рис. 2.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему установки согласно рис. 2.

Особенностью данной схемы является последовательное включение измерительных обмоток тороида и нормальной катушки в цепь гальванометра, что обеспечивает постоянство сопротивления измерительной цепи при всех измерениях.

Обозначения на схеме:

$R_1$  и  $R_2$  — реостаты регулировки тока в намагничивающих обмотках;  $A$  — многопредельный амперметр;  $K_1$  — ключ шунтирования амперметра;  $K_2$  — ключ коммутации тока в намагничивающих обмотках;  $K_3$  — перекидной ключ для подключения к цепи постоянного тока, либо тороида, либо нормальной катушки;  $K_4$  — тумблер, предназначенный для успокоения колебаний гальванометра после проведения измерения. Он расположен на клеммной коробке гальванометра; НК — нормальная катушка (I — намагничивающая обмотка, II — измерительная обмотка); Т — тороид (I — намагничивающая обмотка, II — измерительная обмотка); G — гальванометр; R — сопротивление, служащее для регулирования полного сопротивления цепи гальванометра с целью максимального использования световой шкалы гальванометра в исследуемом диапазоне силы тока.

При сборке схемы тороид следует расположить как можно дальше от нормальной катушки и от амперметра, чтобы избежать индуктивных помех. После сборки необходимо предъявить схему преподавателю для проверки.

2. Поставить перекидной ключ  $K_3$  в положение 1 (на тороид). Включить освещение гальванометра тумблером на щитке лабораторного стола.

3. Провести размагничивание тороида, необходимое для устранения предыдущего остаточного магнетизма. Для этого нужно:

а) отключить амперметр ключом  $K_1$ . (Внимание! Невыполнение данной операции приводит к поломке амперметра);

б) отключить гальванометр тумблером  $K_4$ ;

в) полностью вывести реостаты;

г) включить тумблер постоянного тока на щитке лабораторного стола и, производя быструю и непрерывную коммутацию тока ключом  $K_2$ , одновременно плавно снижать величину тока путем постепенного введения реостатов  $R_1$  и  $R_2$  до упора.

4. Все измерения проводятся, начиная с минимальных значений силы тока в намагничивающей обмотке. Предварительное случайное пропускание большого тока в этой обмотке исказит все полученные результаты и потребует возобновления процесса размагничивания.

Перед экспериментом следует ознакомиться со шкалой и пределами измерения амперметра, которые могут быть установлены от  $0,015a$  до  $30a$  переключателем на приборе. Пределы измерения должны выбираться так, чтобы максимально использовать шкалу прибора, т. е. чтобы измерения проводились в правой части шкалы. При этом нужно не допускать зашкаливания прибора и своевременно переходить на новый предел измерения.

Значение силы тока можно определить по формуле:

$$I = \frac{Nn}{150}, a \quad (16)$$

где  $N$  — предел измерения (отсчитывается по переключателю прибора);  $n$  — отсчет по прибору (в делениях шкалы).

Поскольку после выполнения п. 3 реостаты  $R_1$  и  $R_2$  введены полностью, то сила тока в этом случае будет минимальной для данной установки. После этого следует перекинуть ключ  $K_1$ , защищающий амперметр от повреждений при размагничивании тороида, и включить гальванометр тумблером  $K_4$ .

5. Успокоить колебания светового «зайчика» гальванометра с помощью тумблера  $K_4$ .

5. Быстро перекинуть ключ  $K_2$  и заметить величину отброса «зайчика» гальванометра  $\alpha_1$ , после чего успокоить колебания тумблером  $K_4$ . Затем также быстро перекинуть ключ  $K_2$  в обратную сторону и заметить величину отброса «зайчика» гальванометра  $\alpha_2$ , который, очевидно, будет противоположен первому отбросу. Успокоить колебания «зайчика».

7. Повторить п. 6 еще один раз при установленном значении силы тока.

8. Плавно повысить силу тока с помощью реостатов  $R_1$  и  $R_2$  и снова выполнить измерения, описанные в пп. 6 и 7. Измерения следует производить до тех пор, пока не будут полностью выведены реостаты.

### Замечания

А) Для регулировки силы тока необходимо пользоваться сначала высокоомным реостатом  $R_2$  и затем уже, когда реостат  $R_2$  будет выведен полностью, следует работать реостатом  $R_1$ .

Б) При выполнении работы нужно постоянно следить за соответствием предела измерения амперметра и измеряемой величины.

Рекомендуется следующий шаг экспериментальных точек по току:

$0 \div 0,040 \text{ а}$	шаг 0,005 а
$0,040 \div 0,100 \text{ а}$	шаг 0,020 а
$0,10 \div 0,50 \text{ а}$	шаг 0,10 а
Свыше 0,50 а	шаг 0,25 а

Для удобства проведения измерений можно предварительно составить таблицу используемых значений силы тока, выбрать пределы измерения для каждого значения и рассчитать число делений по шкале амперметра, используя формулу (17):

$$n = \frac{150 \cdot I}{N} \quad (17)$$

9. После проведения всех измерений с тороидом, следует приступить к калибровке установки с помощью нормальной катушки. Для этого ключ  $K_3$  переключается в положение НК (на нормальную катушку). Реостаты  $R_1$  и  $R_2$  вводятся полностью. Измерения производятся аналогично предыдущим, т. е. согласно пп. 6, 7, 8.

Рекомендуется следующий шаг экспериментальных точек по току при работе с нормальной катушкой:

$0,10 \div 2,00 \text{ а}$	шаг 0,20 а
----------------------------	------------

10. Результаты измерений представить в виде таблиц 1 и 2 по предлагаемой форме:

Таблица 1

#### 1. Тороид ( $N_{\text{тор}} =$ , $n_{\text{тор}} =$ )

$I_{\text{тор}}, \text{ а}$	Показания гальванометра					$H, \text{ а/м}$	$V, \text{ тл}$	$\mu$
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_{\text{ср}}$			

Нормальная катушка ( $N_{\text{норм}} = , n_{\text{норм}} = )$ 

$I_{\text{норм}}, a$	Показания гальванометра					$\frac{I_{\text{норм}}}{\beta_{\text{ср}}}$
	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_{\text{ср}}$	

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным таблицы 2 рассчитать значения  $\frac{I_{\text{норм}}}{\beta_{\text{ср}}}$  для каждого измерения с нормальной катушкой. Проверить наличие линейной зависимости между магнитным потоком и показаниями гальванометра. В этом случае для каждого опыта отношение должно быть постоянным (см. формулу 12).

Определить среднее значение —  $\left(\frac{I_{\text{норм}}}{\beta_{\text{ср}}}\right)_{\text{ср}}$ .

2. По данным таблицы 1 рассчитать:

а) напряженность магнитного поля в тороиде (формула 11);

б) магнитную индукцию поля (формула 15);

в) относительную магнитную проницаемость (формула 16).

Для проведения расчетов магнитной индукции формулу (15) удобно представить в следующем виде:

$$B = K a, \quad (18)$$

где

$$K = \frac{\mu_0 n_{\text{норм}} S_{\text{норм}} \cdot N_{\text{норм}}}{S_{\text{тор}} N_{\text{тор}}} \left(\frac{I_{\text{норм}}}{\beta_{\text{ср}}}\right)_{\text{ср}} \quad (19)$$

Рекомендуется вначале найти численное значение коэффициента  $K$ , пользуясь данными установки и экспериментальным значением  $\left(\frac{I_{\text{норм}}}{\beta_{\text{ср}}}\right)_{\text{ср}}$ , а затем рассчитать магнитную индукцию в тороиде для каждого измерения.

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

## Контрольные вопросы

1. Чем отличаются ферромагнетики от парамагнетиков? Как объясняет доменная теория особенности ферромагнетиков?

2. Опишите метод А. Г. Столетова, определения индукции магнитного поля и магнитных характеристик ферромагнетиков. Начертите принципиальную схему экспериментальной установки.

3. Почему в данной работе показания баллистического гальванометра пропорциональны количеству электричества, протекающего через его рамку? В каких случаях указанная пропорциональность нарушается?

4. Какое имеет значение в данной работе тот факт, что исследуемому образцу придана форма тороида?

## ЛИТЕРАТУРА

Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, Л. Б. Милковская. Курс физики, т. II, изд. Высшая школа, §§ 20. 5, 20. 6, 20. 7, М., 1964.

## ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАМПЫ

**Принадлежности:** панель, на которой установлены электронная лампа 6Н8С и нагрузочное сопротивление; вольтметры; миллиамперметр; блок питания.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

**Термоэлектронная эмиссия.** Электронные вакуумные лампы (диоды, триоды, тетроды, пентоды) представляют собой приборы, в которых происходит управление потоком электронов, испускаемых катодом. Прежде чем перейти к изучению основных характеристик лампы, следует рассмотреть явление испускания электронов нагретыми телами, которое носит название термоэлектронной эмиссии.

Опытным путем установлено, что в металлах имеются свободные электроны проводимости, образующие так называемый электронный газ. Если какой-нибудь электрон приближается к границе раздела металла с внешней средой, то равнодействующая всех сил притяжения со стороны положительных ионов препятствует выходу его из металла.

Таким образом, на границе раздела металла с внешней средой существует потенциальный барьер. Если энергия электронов достаточна для преодоления этого потенциального барьера, то они вылетают из металла, образуя вблизи его поверхности электронное облако. Между электронным облаком и металлом устанавливается динамическое равновесие, при котором число электронов, вылетающих из металла, равно числу электронов, возвращающихся обратно.

Чем выше температура металла, тем больше плотность электронного облака.

Для количественной характеристики эмиссионных свойств металла вводится понятие работы выхода электрона. Работой выхода называется наименьшая энергия, которую необходимо сообщить электрону, чтобы удалить его из металла в вакуум. Так, например, для чистого вольфрама работа выхода равна 4,5 эв.

Методы получения потока электронов за счет термоэлектронной эмиссии с поверхности катода являются основными в электронных приборах. При этом на практике широкое применение нашли оксидные катоды, позволяющие при более низких температурах нагрева, чем для катодов из чистых тугоплавких металлов, получить высокие токи эмиссии. Оксидный катод содержит металлическую подложку (кern), на которую наносится слой оксидов щелочно-земельных металлов. Специальная технология обработки катода позволяет получить на его поверхности мономолекулярный слой оксидов, который значительно снижает работу выхода и тем самым увеличивает эмиссионную способность катода.

**Двухэлектродная лампа (диод).** Рассмотрим работу простейшей двухэлектродной лампы-диода. Если между анодом и катодом диода включить источник напряжения, то в анодной цепи появится ток. По мере повышения напряжения на аноде происходит постепенное рассасывание пространственного отрицательного заряда у катода за счет движения электронов к аноду, вследствие чего ток через лампу возрастает. В этом случае связь между током  $i$  и напряжением на аноде  $U_a$  определяется формулой Ленгмюра

$$i = CU_a^{3/2}, \quad (1)$$

где  $C$  — постоянная, зависящая от конструкции и материала катода лампы.

Наконец, при некотором значении анодного напряжения все электроны, вылетевшие из катода, достигают анода. Пространственный отрицательный заряд полностью рассасывается. При этом ток достигает максимальной величины, не зависящей от потенциала анода. Это максимальное значение тока, называемое током насыщения, выражается по формуле Ричардсона-Дешмена

$$i_n = aT^2 e^{-\frac{e\varphi}{kT}}, \quad (2)$$

где  $a$  — некоторый коэффициент. Для большинства чистых металлов  $a = 1,2 \cdot 10^6 \frac{a}{\text{м}^2 \cdot \text{град}^2}$ ,  $T$  — температура катода,  $e\varphi$  — работа выхода электрона из катода.

Таким образом, ток через диод зависит от анодного напряжения (при постоянной температуре катода). Это обстоятельство значительно сужает область применения двухэлектродных ламп — обычно они используются в выпрямительных схемах.

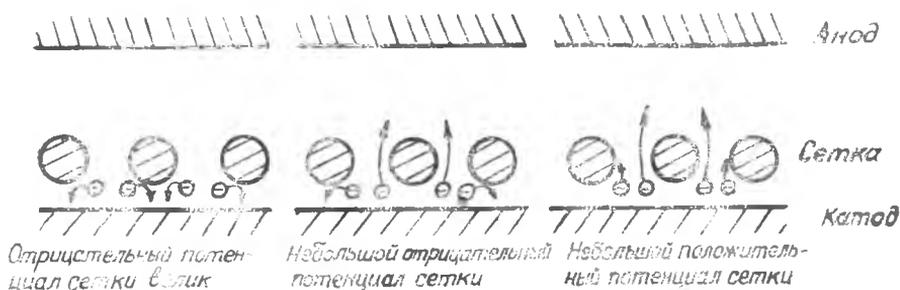


Рис. 1.

**Трехэлектродная лампа (триод).** Более эффективное управление анодным током может быть достигнуто путем регулирования величины пространственного отрицательного заряда лампы с помощью третьего электрода — сетки. Такая трехэлектродная лампа получила название триод.

Конструктивно сетка обычно выполняется в виде спирали из тонкой проволоки, которая располагается между катодом и анодом. Поскольку сетка находится ближе к катоду, чем анод, то изменение потенциала сетки оказывает на пространственный заряд большее влияние, чем изменение потенциала анода.

Если подать на сетку более низкий относительно катода потенциал, то сетка будет отталкивать электроны, уменьшая анодный ток.

При некотором, достаточно большом отрицательном потенциале сетки, называемом потенциалом запирания лампы, все электроны отталкиваются от сетки, и анодный ток становится равным нулю. При положительных потенциалах сетки появляется сеточный ток из числа электронов, перехватываемых сеткой.

Действие сетки в триоде при различных ее потенциалах показано на рис. 1.

**Статические параметры триодов.** Опыт показывает, что анодный ток триода является функцией линейной комбинации анодного и сеточного напряжений

$$I_a = f(U_a + \mu U_c), \quad (3)$$

где  $\mu$  — постоянная, называемая коэффициентом усиления лампы.

Выясним смысл величины  $\mu$ . Для этого найдем приращение тока  $dI_a$  из уравнения (3)

$$dI_a = (dU_a + \mu dU_c) \cdot f', \quad (4)$$

где  $f'$  означает производную  $f$  по ее аргументу.

Если совместное изменение потенциалов сетки и анода не изменяет анодного тока ( $dI_a = 0$ ), то

$$dU_a + \mu dU_c = 0, \quad (5)$$

откуда

$$\mu = - \left( \frac{dI_a}{dU_c} \right)_{I_a} \cdot \quad (6)$$

Значок  $I_a$  при производной означает, что дифференцирование следует производить при постоянном анодном токе.

Таким образом, коэффициент усиления  $\mu$  показывает, во сколько раз изменение потенциала сетки более эффективно, чем изменение анодного напряжения.

Продифференцируем уравнение (3), учитывая, что  $I_a$  является функцией двух независимых переменных —  $U_a$  и  $U_c$ .

$$dI_a = \left( \frac{\partial I_a}{\partial U_a} \right)_{U_c} \cdot dU_c + \left( \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \right)_{U_a} \cdot dU_a. \quad (7)$$

Величина

$$S = \left( \frac{\partial I_a}{\partial U_a} \right)_{U_c} \quad (8)$$

называется крутизной характеристики лампы. Она показывает насколько эффективно сетка управляет анодным током. Крутизна характеристики обычно выражается в миллиамперах на вольт.

Величина

$$R_i = \left( \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \right)_{U_a} \quad (9)$$

называется внутренним сопротивлением лампы.  $R_i$  измеряется в омах.

С учетом введенных определений выражение (7) примет вид:

$$dI_a = S dU_c + \frac{1}{R_i} dU_a. \quad (10)$$

Если выбрать  $dU_c$  и  $dU_a$  так, чтобы анодный ток не изменялся, то

$$S dU_c + \frac{1}{R_i} dU_a = 0, \quad (11)$$

откуда можно поручить соотношение, связывающее статические параметры триода:

$$S R_i = - \left( \frac{dI_a}{dU_c} \right)_{I_a} \quad \text{или} \quad S R_i = \mu. \quad (12)$$

Статические параметры триода можно определить с помощью сеточных и анодных характеристик.

Сеточная характеристика лампы показывает зависимость анодного тока от сеточного напряжения при постоянном анодном напряжении.

Анодная характеристика лампы показывает зависимость анодного тока от анодного напряжения при постоянном сеточном напряжении.

Типичный вид семейства анодных характеристик, построенных при различных сеточных напряжениях, представлен на рис. 2.

Для практического определения  $\mu$ ,  $S$  и  $R_i$  по характеристикам обычно используются не дифференциальные выражения этих параметров, а приближенные формулы в конечных приращениях:

$$\mu = - \left( \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} \right)_{I_a} = \text{const}; \quad (13)$$

$$S = \left( \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \right)_{U_a} = \text{const}; \quad (14)$$

$$R_i = \left( \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \right)_{U_c} = \text{const}. \quad (15)$$

Если задана система анодных характеристик (см. рис. 2), то для нахождения параметров лампы, например, в точке  $A$ , следует провести через эту точку прямые, параллельные осям координат. После этого можно найти изменение тока  $\Delta I_a$ , происходящее при изменении сеточного напряжения на  $\Delta U_c = U_{c3} - U_{c2}$ , а затем вычислить крутизну характеристики по формуле (14).

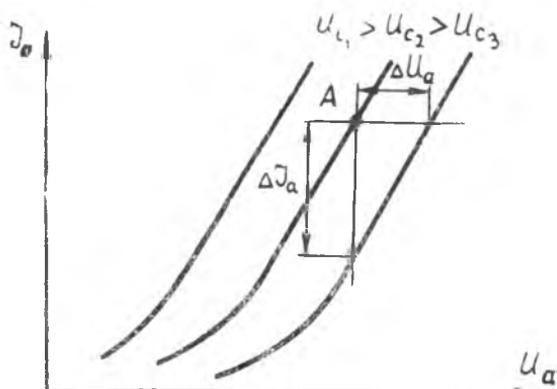


Рис. 2.

Аналогично находится изменение анодного напряжения  $\Delta U_a$ , происходящее при изменении сеточного напряжения на  $\Delta U_c = U_{c3} - U_{c2}$ , после чего можно определить коэффициент усиления по формуле (13).

Внутреннее сопротивление лампы определяется котангенсом угла наклона характеристики в точке  $A$ . Численное значение внутреннего сопротивления вычисляется по формуле (15) с использованием найденных значений  $\Delta I_a$  и  $\Delta U_a$ .

Следует отметить, что для определения параметров лампы выбирается прямолинейный участок характеристики, в пределах которого они меняются слабо.

**Динамические параметры триодов.** Если в анодную цепь лампы включить нагрузочное сопротивление  $R_a$ , то напряжение на аноде будет зависеть от анодного тока.

Действительно, согласно закону Ома для анодной цепи (см. рис. 3), имеем

$$U_a = \varepsilon - I_a R_a, \quad (16)$$

где  $\varepsilon$  — напряжение источника анодного питания.

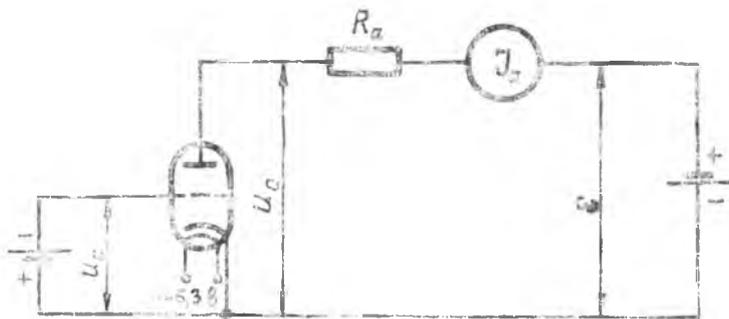


Рис. 3.

Параметры лампы при наличии в анодной цепи нагрузочного сопротивления называются динамическими. Найдем связь между динамическими и статическими параметрами.

Из уравнения (16) после дифференцирования получаем

$$dU_a = -R_a dI_a. \quad (17)$$

Подставим выражение (17) в уравнение (10):

$$dI_a = SdU_c - \frac{R_a}{R_i} dI_a \quad \text{или} \quad \left(1 + \frac{R_a}{R_i}\right) dI_a = SdU_c. \quad (18)$$

Определяемая отсюда величина

$$S_x = \frac{dI_a}{dU_c} = \frac{S}{1 + \frac{R_a}{R_i}} \quad (19)$$

называется динамической крутизной характеристики лампы.

Динамический коэффициент усиления лампы определяется формулой

$$K = -\frac{dU_a}{dU_c}. \quad (20)$$

Заменяв  $dU_a$  согласно выражению (17), получим:

$$K = -\frac{dU_a}{dU_c} = R_a \frac{dI_a}{dU_c}. \quad (21)$$

Используя понятие динамической крутизны, найдем:

$$K = R_a S_x = \frac{R_a S}{1 + \frac{R_a}{R_i}} = \frac{R_i S}{1 + \frac{R_i}{R_a}} = \frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_a}}, \quad (22)$$

т. к.  $SR_i = \mu$  (см. уравнение 12).

Из формулы (22) следует, что динамический коэффициент усиления всегда меньше статического и стремится к нему при  $R_a \rightarrow \infty$ .

Крутизна лампы и динамический коэффициент усиления находятся по семейству анодных характеристик (рис. 4) следующим

образом. На оси абсцисс отмечается точка  $\epsilon$  полного напряжения анодного источника питания, а на оси ординат — точка  $\frac{\epsilon}{R_a}$ . Через эти две точки проводится прямая (так называемая нагрузочная прямая). Все возможные рабочие точки лампы (при заданных  $\epsilon$  и  $R_a$  лежат на этой прямой, поскольку ее уравнение тождественно уравнению (16).

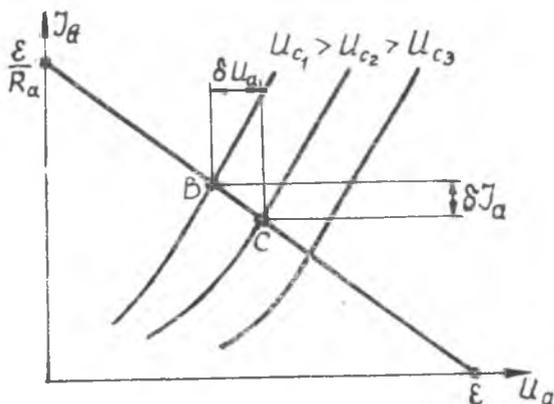


Рис. 4.

В данном случае рабочей точкой лампы при сеточном напряжении  $U_{c1}$  будет точка  $B$ .

Если изменить сеточное напряжение на  $\Delta U_c = U_{c2} - U_{c3}$ , то рабочая точка переместится в точку  $C$ . Тогда, согласно определению динамического коэффициента усиления, получим

$$K = - \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \quad (23)$$

Аналогично находится динамическая крутизна

$$S = \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \quad (24)$$

Целью данной работы является:

1. Определение семейства анодных характеристик триода.
2. Определение статических параметров лампы.
3. Нахождение динамического коэффициента усиления при определенном нагрузочном сопротивлении.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

#### Упражнение 1. Снятие семейства анодных характеристик и определение статических параметров триода

1. Собрать схему согласно рис. 5, соблюдая полярность. Питание схемы производится постоянным током от отдельного блока, обеспечивающего подачу регулируемого анодного напряжения (0—250 в), регулируемого сеточного напряжения (0—30 в) и переменного напряжения 6,3 в для нити накала лампы.

В схеме:  $V_c$  — вольтметр с пределом измерения 0—30 в,  $V_a$  — вольтметр с пределом измерения 0—300 в.

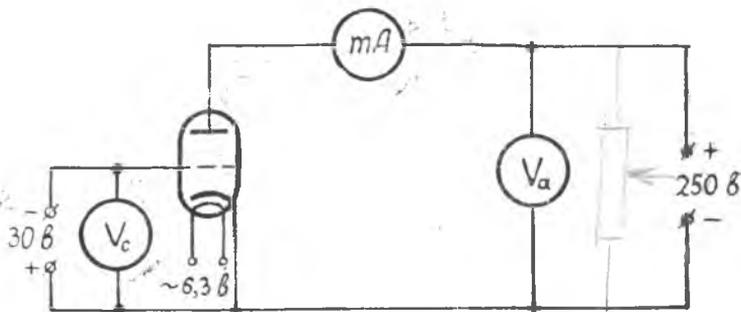


Рис. 5.

2. Ручки регулировки анодного и сеточного напряжений поставить в положение «0».

3. Включить блок питания. После прогрева лампы в течение 1—2 минут можно приступить к измерениям.

4. Установить напряжение на сетке, равное 2 в. Снять анодную характеристику лампы (не менее 10 точек). Величину анодного напряжения следует изменять в пределах от 0 до 240 в.

Результаты измерений записать в таблицу 1 по прилагаемой форме.

5. Аналогичным образом следует найти данные для построения анодных характеристик при  $U_c = -4$  в и  $-6$  в.

### Упражнение 2. Определение динамического коэффициента усиления лампы

1. Выключить блок питания, предварительно уменьшив анодное и сеточное напряжение до нуля.

2. Включить в анодную цепь — между анодом и миллиамперметром — нагрузочное сопротивление (см. рис. 3).

3. Включить блок питания и после прогрева лампы установить напряжение питания анодной цепи 240 в.

4. Записать значения анодного тока при напряжении на сетке  $-2$  в,  $-4$  в и  $-6$  в.

5. Уменьшить анодное и сеточное напряжение до нуля и выключить блок питания.

Таблица 1

$U_c = -2$ в		$U_c = -4$ в		$U_c = 6$ в	
$I_a$	$U_a$	$I_a$	$U_a$	$I_a$	$U_a$

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным таблицы 1 построить семейство анодных характеристик. Определить и

записать параметры лампы на прямолинейном участке характеристик.

2. На том же графике, где представлены анодные характеристики, построить нагрузочную прямую.

3. Проверить совпадение найденных динамических значений анодного тока со значениями, соответствующими точкам пересечения нагрузочной прямой и анодных характеристик.

4. Найти динамический коэффициент усиления по формуле (23) и сравнить его с расчетным (формула 22).

#### Контрольные вопросы

1. Что называют работой выхода электрона?
2. Начертите электрическую схему установки, с помощью которой можно снять сеточные и анодные характеристики лампы.
3. Что влияет на плотность отрицательного пространственного заряда у поверхности катода?
4. Как определить статические и динамические характеристики лампы по семейству анодных характеристик.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Савельев. Курс общей физики, т. 2, § 75, изд. «Наука», М., 1966.
2. Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, Л. Б. Милковская. Курс физики, т. 2, § 10. 3, 22. 3. Изд. «Высшая школа», М., 1964.
3. Руководство к лабораторным занятиям по физике под редакцией Л. Л. Гольдина, изд. «Наука», М., 1964.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА К ЕГО МАССЕ МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

**Принадлежности:** монтажная панель с соленоидом, внутри которого установлена радиолампа 2Ц2С; амперметр для измерения тока в обмотке соленоида; миллиамперметр для измерения анодного тока лампы; вольтметр для измерения анодного напряжения.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В данной работе определяется удельный заряд электрона, т. е. отношение заряда электрона к его массе методом магнетрона. Этот метод получил свое название вследствие того, что форма применяемых здесь электрического и магнитного полей очень напоминает форму полей в магнетроне — электронной лампе, используемой в технике сверхвысоких частот.

Для того, чтобы представить себе сущность метода магнетрона, рассмотрим движение электрона в пространстве между цилиндрическими, коаксиально расположенными электродами (рис. 1).

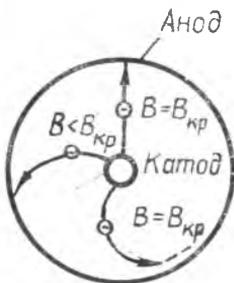


Рис. 1.

Пусть центральный электрод (катод) является источником электронов. Если к внешнему электроду (аноду) приложить положительный потенциал относительно катода, то возникнет электрическое поле, силовые линии которого будут направлены по радиусам от анода к катоду. В этом случае траектории электронов будут представлять собой прямые линии.

Внесем рассматриваемую систему электродов в однородное магнитное поле с индук-

цей, направленной по оси симметрии электродов. Тогда траекторию электронов будет определять сила  $F$ , обусловленная совместным действием электрического и магнитного полей:

$$\vec{F} = e\vec{E} + e[\vec{V} \vec{B}], \quad (1)$$

где  $e$  — заряд электрона;  $\vec{V}$  — скорость электрона;  $\vec{E}$  — напряженность электрического поля;  $\vec{B}$  — индукция магнитного поля.

Первый член этой формулы представляет электрическую кулоновскую силу  $\vec{F}_э = e\vec{E}$ , а второй — силу Лоренца

$$\vec{F}_{эл} = e[\vec{V} \vec{B}].$$

В слабом магнитном поле ( $B < B_{кр}$ ) траектории электронов искривляются, но на анод последние все же попадают. При некотором значении индукции магнитного поля ( $B = B_{кр}$ ) кривизна траекторий увеличивается настолько, что электроны перестают попадать на анод, т. е. ток между катодом и анодом резко уменьшается. На использовании этого явления и основан рассматриваемый метод определения отношения заряда электрона к его массе.

Воспользовавшись цилиндрической системой координат (рис. 2), можно выразить компоненты силы, действующей на электрон, следующими формулами:

а) электростатическая составляющая (первый член формулы 1):

$$F_{re} = eE_r, \quad (E_r = E), \quad (2)$$

$$F_{\varphi e} = 0, \quad (3)$$

$$F_{ze} = 0; \quad (4)$$

б) сила Лоренца (второй член формулы 1):

$$F_{rm} = eV_{\varphi} B_z, \quad (B_z = B); \quad (5)$$

$$F_{\varphi m} = -eV_r B_r; \quad (6)$$

$$F_{zm} = 0, \quad (7)$$

где  $V_r$  и  $V_{\varphi}$  — радиальная и угловая составляющие скорости электрона:

$$V_r = \frac{dr}{dt},$$

$$V_{\varphi} = r \frac{d\varphi}{dt}. \quad (8)$$

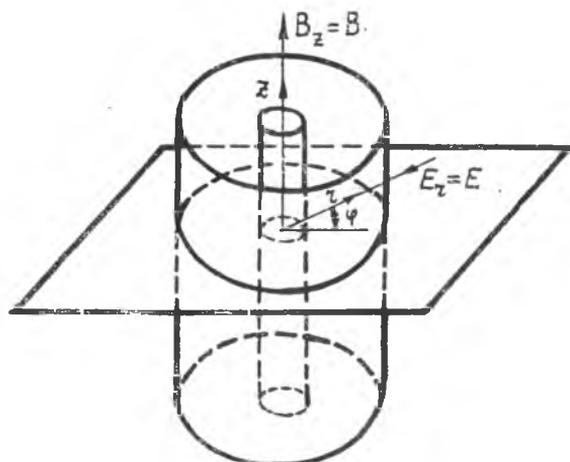


Рис. 2.

Из приведенных соотношений следует, что если начальные скорости электронов равны нулю или же перпендикулярны оси  $Z$ , то их траектории являются плоскими кривыми. В этом случае для нахождения связи между удельным зарядом электрона  $\frac{e}{m}$  и характеристиками электрического и магнитного полей можно воспользоваться уравнением основного закона динамики вращательного движения относительно оси

$$\frac{d}{dt} \left( I \frac{d\varphi}{dt} \right) = M_z, \quad (9)$$

где  $I = mr^2$  — момент инерции электрона относительно оси  $Z$ , а  $M_z$  — момент внешних сил относительно той же оси.

Приняв во внимание, что

$$M_z = r(F_{\varphi \text{ эл}} + F_{\varphi \text{ магн}}) = -erV_r B_z, \quad (10)$$

уравнение (9) можно представить в таком виде

$$\frac{d}{dt} \left( mr^2 \frac{d\varphi}{dt} \right) = -erV_r B = -\frac{eB}{2} \cdot \frac{d(r^2)}{dt}. \quad (11)$$

Интегрируя уравнение (11) и учитывая, что заряд электрона отрицателен, получим

$$r^2 \frac{d\varphi}{dt} + A = \frac{e}{2m} Br^2. \quad (12)$$

Для нахождения постоянной интегрирования  $A$  предположим, что электроны вылетают нормально к поверхности катода, т. е. что

$$\frac{d\varphi}{dt} = 0 \text{ при } r = r_k.$$

Тогда из уравнения (12) следует, что

$$A = \frac{e}{2m} \cdot Br_k^2,$$

и вместо (12) для данного случая получается:

$$\frac{d\varphi}{dt} = \frac{eB}{2m} \left( 1 - \frac{r_k^2}{r^2} \right), \quad (13)$$

где  $r_k$  — радиус катода.

Под действием силы Лоренца изменяется направление движения электрона, работа при этом не производится. Следовательно, кинетическая энергия электрона, если пренебречь начальной скоростью его движения, будет определяться только работой электрического поля, т. е.

$$eU_a = \frac{mV^2}{2} = \frac{m}{2} (V_r^2 + V_\varphi^2) = \frac{m}{2} \left[ \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + \left( r \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \right] \quad (14)$$

или, с учетом (13),

$$eU_a = \frac{m}{2} \left\{ \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 + \left[ \frac{reB}{2m} \left( 1 - \frac{r_k^2}{r^2} \right) \right]^2 \right\}. \quad (15)$$

Пусть резкое уменьшение тока между электродами наступает при некотором критическом значении индукции магнитного поля —  $B_{кр}$ . Это означает, что радиальная составляющая скорости большинства электронов у анода будет равна нулю, т. е.

$$V_r = 0 \text{ при } r = r_a.$$

где  $r_a$  — радиус анода.

Для этого случая выражение (15) принимает вид

$$eU_a = \frac{e^2 B_{кр}^2}{8m} \left( 1 - \frac{r_k^2}{r_a^2} \right)^2 r_a^2 \quad (16)$$

откуда следует, что

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a r_a^2}{B_{кр}^2 (r_a^2 - r_k^2)^2} \quad (17)$$

Формула (17) позволяет при известных значениях  $U_a$  и  $B_{кр}$  найти величину  $\frac{e}{m}$ . Обычно для этой цели применяется какая-нибудь радиолампа, имеющая коаксиальные цилиндрические электроды (катод и анод).

Магнитное поле создается соленоидом, критическое значение индукции его определяется по так называемой сбросовой характеристике, которая выражает зависимость анодного тока лампы  $I_a$  от силы тока в соленоиде  $I_c$  (рис. 3).

При выводе формулы (17) предполагалось, что начальные скорости эмиттируемых катодом электронов равны нулю и, следовательно, их скорости на любом расстоянии от катода, одинаковы. В этом случае, с возрастанием  $B$  ток лампы должен был бы скачком уменьшиться до нуля при  $B = B_{кр}$ , т. е. при  $I_c = I_{кр}$  (рис. 3, кривая 1).

В реальных условиях скорости электронов и направление их вылета из катода различны, кроме того, имеется падение потенциала вдоль катода и нет полной коаксиальности анода и катода. Вследствие этих причин критические условия движения отдельных электронов достигаются при различных  $I_c$ . Поэтому экспериментальная сбросовая характеристика имеет вид, представленный кривой 2 на рис. 3.

В данной работе используется лампа 2Ц2С, установленная на панели внутри соленоида. Анод, катод и нить накала лампы, а также выводы обмотки соленоида присоединены к соответствующим клеммам панели.

Питание лампы и соленоида производится от распределительного щита лабораторного стола.

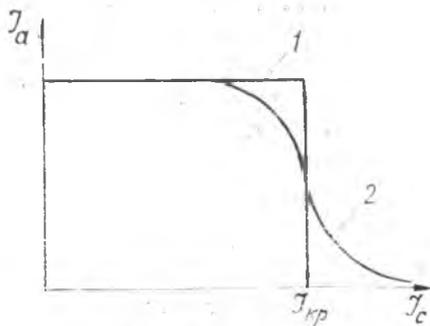


Рис. 3.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему согласно рис. 4.
2. Включить накал лампы и дать ей прогреться.
3. Вывести ручки автотрансформаторов, регулирующих ток в соленоиде (ЛАТР-1) и анодный ток лампы (ЛАТР-2), в крайнее левое положение.

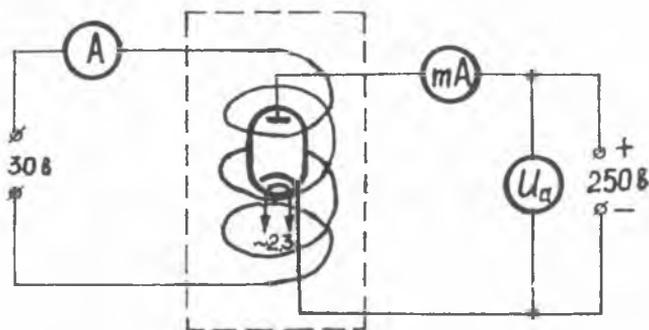


Рис. 4.

4. Включить питание соленоида и анодную цепь лампы.
5. С помощью ЛАТР-2, расположенного справа на столе, установить анодное напряжение  $U_a = 150$  в.
6. Увеличивая постепенно ток соленоида  $I_c$  посредством ЛАТР-1, расположенного слева на столе, снять сбросовую характеристику в пределах от 0,5 а до 4 а. Экспериментальные точки следует снимать особенно часто в области уменьшения тока лампы  $I_a$ . Во время измерений необходимо поддерживать постоянным анодное напряжение (ЛАТР-2).
7. Повторить все измерения для значений анодного напряжения  $U_a = 200$  в и  $U_a = 250$  в.
8. Полученные результаты занести в таблицу.

Таблица 1

$U_a = 150$ в		$U_a = 200$ в		$U_a = 250$ в	
$I_c$	$I_a$	$I_c$	$I_a$	$I_c$	$I_a$

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным таблицы 1 построить на миллиметровой бумаге графики всех трех сбросовых характеристик.
2. Для каждой характеристики определить значение  $I_{кр}$ , при котором происходит резкое уменьшение тока лампы. Наиболее

правильно брать значение  $I_{кр}$  из верхнего участка крутого спада сбросовой характеристики (см. рис. 5).

3. Найти величину  $\frac{e}{m}$  для каждого значения анодного напряжения по формуле (17).

Критическое значение индукции магнитного поля соленоида может быть вычислено по формуле:

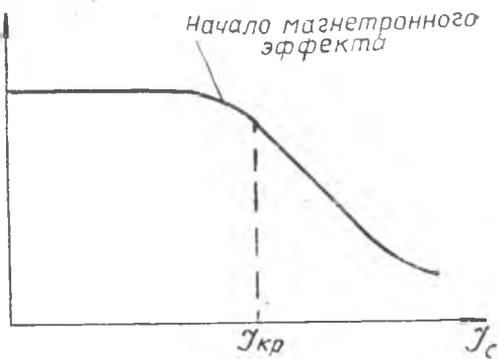


Рис. 5.

$$B_{кр} = \mu \mu_0 n_0 I_{кр} \frac{L}{\sqrt{L^2 + d^2}} \quad (18)$$

В формулах (17) и (18):

$r_a = 9,6 \cdot 10^{-3}$  — радиус анода лампы, м;

$r_k = 0,9 \cdot 10^{-3}$  — радиус катода лампы, м;

$L = 1,2 \cdot 10^{-1}$  — длина соленоида, м;

$d = 4 \cdot 10^{-2}$  — диаметр соленоида, м;

$n_0$  — число витков на единицу длины соленоида.

Величина  $n_0$  указана на корпусе соленоида;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  — магнитная постоянная,  $\frac{в \cdot сек}{а \cdot м}$ ;

$\mu = 1$ .

4. Определить среднее значение  $\frac{e}{m}$

$$\left(\frac{e}{m}\right)_{ср} = \frac{\sum_{n=1}^3 \left(\frac{e}{m}\right)_n}{3} \quad (19)$$

и сравнить его с табличными данными.

#### Контрольные вопросы

1. Начертите принципиальную схему экспериментальной установки, используемой в данной работе, и поясните метод определения величины  $\frac{e}{m}$ .
2. Изобразите графически электрическое и магнитное поля в межэлектродном промежутке лампы.
3. Как изменяются траектории электронов при увеличении тока в соленоиде от 0 и до  $I > I_{кр}$ ?
4. Чем отличается реальная сбросовая характеристика от идеальной, почему?

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Савельев. Курс общей физики, т. 2, § 64. Изд. «Наука», М., 1966.
2. С. Г. Калашников. Электричество, § 202. Изд. «Наука», М., 1966.
3. Руководство к лабораторным занятиям по физике, под редакцией Л. Т. Гольдина, изд. «Наука», М. 1964.

## ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ГАЛЬВАНОМЕТРА

**Принадлежности:** баллистический гальванометр с осветительной системой; вольтметр; реостат; панель с конденсаторами; перекидной ключ.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Баллистический гальванометр применяется для измерения количества электричества, протекающего по цепи за промежуток времени, малый по сравнению с периодом собственных колебаний рамки гальванометра.

Устройство баллистического гальванометра схематически представлено на рис. 1. В зазоре между полюсными наконечниками постоянного магнита 1 и цилиндром 4 из мягкого железа, свободно вращается легкая катушка 5 прямоугольного (реже круглого) сечения, называемая обычно рамкой. Рамка подвешена на упругой нити 3. Момент инерции подвижной системы баллистического гальванометра искусственно увеличен с помощью дополнительных грузов 6, благодаря чему период собственных колебаний этой системы оказывается очень большим.

Для измерения угла поворота рамки применяется оптическая система, которая создает на матовой шкале изображение тонкой нити (светового указателя). Прежде чем попасть на шкалу, луч света отражается от зеркальца 2, связанного с рамкой. Поэтому изображение светового указателя на шкале смещается на величину, пропорциональную углу поворота рамки (при малых углах).

Характер движения рамки гальванометра, когда по ее виткам

проходит ток, можно установить на основании основного закона механики для вращательного движения

$$I \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = \sum_{i=1}^n M_i, \quad (1)$$

где  $I$  — момент инерции подвижной системы;  $\alpha$  — угол поворота рамки;  $M_i$  — момент  $i$ -ой силы, действующей на рамку.

На рамку действуют:

1. Вращающий момент  $M_1$ , обусловленный взаимодействием тока с магнитным полем:

$$M_1 = BINS, \quad (2)$$

где  $B$  — индукция магнитного поля в зазоре;  $I$  — сила тока, протекающего по виткам рамки;  $N$  — число витков рамки;  $S$  — площадь витка рамки.

2. Тормозящий момент  $M_2$ , пропорциональный скорости вращения рамки:

$$M_2 = -r \frac{d\alpha}{dt}, \quad (3)$$

где  $r$  — коэффициент торможения.

Если пренебречь трением подвижной системы о воздух, то можно считать, что коэффициент торможения определяется величиной индукционных токов, наводимых в рамке при ее движении в магнитном поле.

3. Противоведущий момент  $M_3$ , созданный силой упругости нити:

$$M_3 = -k\alpha, \quad (4)$$

где  $K$  — модуль кручения нити.

Подставляя выражения (2), (3) и (4) в уравнение (1), получим дифференциальное уравнение движения рамки гальванометра:

$$I \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + r \frac{d\alpha}{dt} + k\alpha = BINS. \quad (5)$$

При измерениях баллистическим гальванометром время протекания тока значительно меньше периода собственных колебаний рамки. Поэтому можно считать, что весь измеряемый заряд успевает пройти в самом начале движения рамки, т. е., что рамка получает толчок, в результате которого отклоняется по инерции

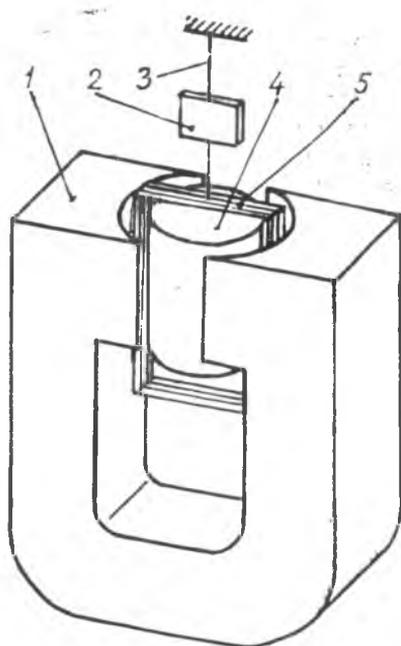


Рис. 1.

на некоторый угол  $\alpha_0$ ; затем она снова возвращается в положение равновесия. Движение рамки при этом может быть как колебательным, так и апериодическим, в зависимости от параметров гальванометра и сопротивления измерительной цепи.

Для нахождения зависимости между количеством электричества  $q$  и максимальным углом отклонения рамки  $\alpha_0$  воспользуемся уравнением энергии

$$\frac{I\omega_{\max}^2}{2} = \frac{k\alpha_0^2}{2}, \quad (6)$$

записанном при допущении, что кинетическая энергия  $\frac{I\omega_{\max}^2}{2}$ , полученная рамкой в результате толчка за время протекания тока, полностью переходит в потенциальную энергию закрученной нити  $\frac{k\alpha_0^2}{2}$ .

Максимальную угловую скорость рамки  $\omega_{\max}$  можно получить из уравнения (5), интегрируя его в пределах от  $t=0$  до  $t=\tau$ :

$$\int_0^{\tau} I \frac{d^2\alpha}{dt^2} dt + \int_0^{\tau} r \frac{d\alpha}{dt} dt + \int_0^{\tau} k\alpha dt = \int_0^{\tau} BINS dt. \quad (7)$$

Заметим, что

$$\int_0^{\tau} I \frac{d^2\alpha}{dt^2} dt = I \left( \frac{d\alpha}{dt} \right)_{\max} = I\omega_{\max}, \quad (8)$$

а

$$\int_0^{\tau} r \frac{d\alpha}{dt} dt = r\alpha \Big|_0^{\tau} \approx 0, \quad (9)$$

т. к., согласно принятым допущениям, за время  $\tau$  рамка практически не отклоняется от положения равновесия. Кроме того,

$$\int_0^{\tau} K\alpha dt \approx 0 \quad (10)$$

в силу малости  $\alpha$  и  $\tau$ . Наконец,

$$\int_0^{\tau} BINS dt = BNS \int_0^{\tau} I dt = BNS \int_0^{\tau} dq = BNSq, \quad (11)$$

где  $q$  — количество электричества, прошедшее через рамку.

Таким образом, уравнение (7) после интегрирования принимает вид

$$I\omega_{\max} = BNSq. \quad (12)$$

Исключая  $\omega_{\max}$  из уравнений (6) и (12), находим

$$q = \sqrt{\frac{KI}{BNS}} \alpha_0 \quad (13)$$

или

$$q = C_q \alpha_0, \quad (14)$$

где коэффициент  $C_q = \frac{\sqrt{KI}}{BNS}$  называется баллистической постоянной гальванометра.

Баллистическая постоянная численно равна эл. заряду, отклоняющему рамку гальванометра на угол  $\alpha_0 = 1$ .

При измерениях с помощью гальванометра обычно наблюдают не угол поворота рамки  $\alpha_0$ , а смещение изображения светового указателя на шкале  $N_0$ . Между  $\alpha_0$  и  $N_0$  существует следующая зависимость:

$$\frac{N_0}{2L} = \text{tg } \alpha_0 \approx \alpha_0 \quad (\text{при малых значениях } \alpha_0), \quad (15)$$

где  $L$  — расстояние от шкалы до зеркала гальванометра. Величину  $N_0$  принято выражать в миллиметрах,  $L$  — в метрах.

Используя зависимость (15), можно записать уравнение (14) в виде

$$q = C_q \frac{N_0}{2L} = \frac{C_q}{2L} N_0 = C'_q N_0. \quad (16)$$

Баллистическая постоянная  $C'_q$  здесь выражена в *кулон/мм*.

Итак, для баллистического гальванометра величина отклонения светового указателя пропорциональна количеству электричества, прошедшего через рамку. Это свойство баллистического гальванометра и обусловило широкое применение его для различных электрических и, в особенности, магнитных измерений.

Целью данной лабораторной работы является ознакомление с основными параметрами баллистического гальванометра и методикой наиболее простых измерений, выполняемых с его помощью.

Следует иметь в виду, что гальванометр является точным, высокочувствительным прибором, требующим бережного обращения. Поэтому все описанные ниже операции следует производить внимательно и осторожно, не допуская зашкаливания.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### Упражнение 1. Определение баллистической постоянной гальванометра

1. Собрать схему согласно рис. 2. Обратит внимание на качество изоляции соединительных проводов и правильность монтажа схемы.

В данной схеме:  $R$  — реостат;  $V$  — вольтметр;  $G$  — гальванометр;  $C_0$  — эталонный конденсатор;  $K_1$  — перекидной ключ;  $K_2$  — ключ, шунтирующий гальванометр.

В данной работе ключ  $K_2$  расположен на клеммной коробке. Он предназначен для быстрой остановки рамки гальванометра.

2. Включить освещение гальванометра.
  3. Поставить ключ  $K_1$  в нейтральное положение, а ключ  $K_2$  в положение «ВКЛ».
  4. Включить питание схемы и установить с помощью реостата напряжение 0,1 в.
  5. Поставить ключ  $K_1$  в положение 1. При этом конденсатор  $C_0$  зарядится.
  6. Быстро перекинуть ключ  $K_1$  в положение 2 и определить максимальное отклонение светового указателя на шкале.
  7. Успокоить гальванометр путем постановки ключа  $K_2$  в положение «ВЫКЛ».
  8. Выполнить несколько измерений согласно пп. 3—7, каждый раз увеличивая напряжение на 0,1 в. Следить за тем, чтобы максимальное отклонение светового указателя не превышало 200 мм.
- Полученные результаты записать в таблицу 1.

Таблица 1

№ п п	$U$ , вольт	$N_0$ , мм	$q$ , кулон

### Упражнение 2. Определение емкости конденсатора

1. В схему (рис. 2) вместо эталонного конденсатора включить конденсатор неизвестной емкости —  $C_{x1}$ .

2. Путем нескольких предварительных опытов, выполняемых согласно пп. 3—7 упражнения 1, установить такое значение напряжения по вольтметру, при котором световой указатель отклоняется примерно на 150 мм.

Величину напряжения и соответствующего отклонения светового указателя записать в таблицу 2.

3. Аналогичным образом, выполняя пп. 1—2, следует получить данные для второго неизвестного конденсатора  $C_{x2}$ , который

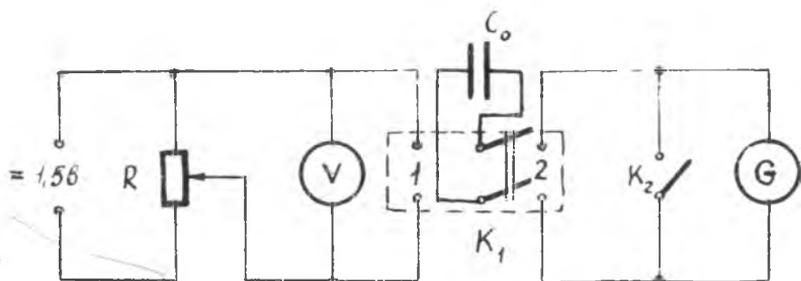


Рис. 2.

включается вместо  $C_{x1}$ . Результаты измерений записать в таблицу 2.

4. Провести измерения с конденсаторами  $C_{x1}$  и  $C_{x2}$ , включенными параллельно друг другу, а затем последовательно.

Результаты измерений записать в таблицу 2.

Таблица 2

$$C_q = \dots$$

№ п/п	Соединение конденсаторов (одиноч., паралл., посл.)	$U$ , вольт	$N_0$ , м.м	$C$ , фарада

### ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Количество электричества, прошедшее через гальванометр при разряде конденсатора, выражается формулой

$$q = CU, \quad (17)$$

где  $U$  — напряжение зарядки конденсатора.

Используя формулу (17) и данные упражнения 1, следует рассчитать численные значения количества электричества, прошедшего через гальванометр при соответствующих отклонениях светового указателя.

Результаты расчетов записать в таблицу 1.

2. Построить график  $q=f(N_0)$ , из которого можно определить  $C_q'$  как тангенс угла наклона графика к оси  $N_0$ .

3. Найти емкости конденсаторов  $C_{x1}$  и  $C_{x2}$  по данным упражнения 2. Расчетную формулу для определения емкости конденсаторов можно получить, если исключить  $q$  из уравнений (16) и (17).

Тогда имеем

$$C = \frac{C_q' N_0}{U}. \quad (18)$$

4. Найти емкости конденсаторов, соединенных параллельно и последовательно. Проверить выполнение формул:

$$C_{\text{парал}} = C_{x1} + C_{x2}; \quad \frac{1}{C_{\text{посл}}} = \frac{1}{C_{x1}} + \frac{1}{C_{x2}}.$$

Результаты расчета емкостей конденсаторов записать в таблицу 2.

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит отличие баллистического гальванометра от обычного? Дайте определение баллистической постоянной гальванометра. В каком режиме работает баллистический гальванометр?

2. Как с помощью баллистического гальванометра можно определить электрический заряд, протекающий через его подвижную катушку?

3. Начертите принципиальную электрическую схему установки, примененной в данной работе для определения емкости конденсатора. Поясните метод определения  $C_x$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Савельев. Курс общей физики, т. 2, § 56, изд. «Наука», М., 1966.
2. Физический практикум. Электричество и оптика, под редакцией В. И. Ивероновой, задача 84, изд. «Наука», М., 1968.

## ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

**Принадлежности:** осциллограф типа ЭО-7 или С1-1; звуковой генератор; лабораторный автотрансформатор (ЛАТР); вольтметр переменного тока.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

**Назначение и устройство электронного осциллографа.** В лабораторной практике широко применяются различные типы электронных осциллографов. Они относятся к типу универсальных электроизмерительных приборов, предназначенных для исследования переменных электрических процессов длительностью от  $10^{-1}$  до  $10^{-9}$  секунды. К достоинствам электронного осциллографа, как измерительного прибора, следует отнести его высокую чувствительность, малую инерционность действия, возможность визуального наблюдения и фотографирования кривых, отражающих развитие электрических процессов во времени. На рис. 1 приведена блок-схема электронного осциллографа, часто встречающегося в лабораториях (типа ЭО-7, С1-1, ЭО-6 и др.).

Рассмотрим назначение и принцип действия отдельных блоков осциллографа.

**Электронно-лучевая трубка и блок управления электронным лучом.** Электронно-лучевая трубка является основным элементом осциллографа. Она представляет собой электровакуумный прибор, служащий для преобразования электрических сигналов в световые. Конструктивно электронно-лучевая трубка выполняется в виде герметичной колбы, внутри которой находятся устройства для получения электронного луча и управления его движением, а также экран, на котором под действием электронного луча полу-

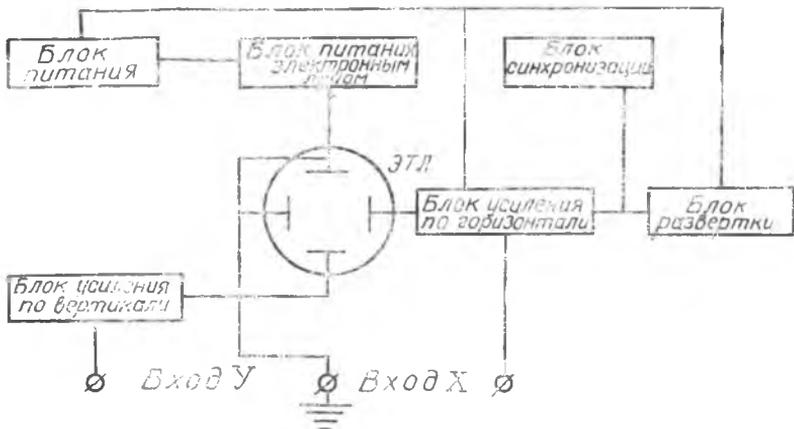


Рис. 1.

частся светящееся пятно. Различают два вида трубок:

- 1) трубки с электростатическим отклонением, в которых электронный луч фокусируется и отклоняется электрическими полями;
- 2) трубки с электромагнитным отклонением, в которых электронный луч фокусируется и отклоняется магнитными полями.

В осциллографах обычно применяются электронно-лучевые трубки с электростатическим отклонением. Принципиальная схема электронно-лучевой трубки с электростатическим отклонением приведена на рис. 2.

Здесь: 1 — подогреватель катода трубки; 2 — катод; 3 — управляющий электрод; 4 — I-й анод; 5 — II-ой анод; 6 — проводящее покрытие колбы в зоне свободного движения электронного

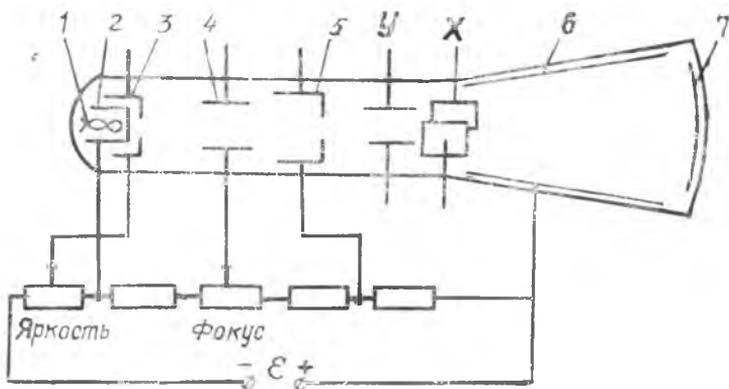


Рис. 2.

луча (основное назначение этого покрытия — нейтрализация объемного отрицательного заряда); 7 — экран;  $X$  и  $Y$  — соответственно горизонтально и вертикально отклоняющие пластины.

Система электродов (1—5), позволяющая получить узкий пучок электронов, называется электронным прожектором или электронной пушкой. Управляющий электрод (рис. 3) выполнен в виде никелевого цилиндра 3

с небольшим отверстием (диафрагмой) в доньшке и расположен вокруг катода 2, нагреваемого нитью накала 1. На управляющий электрод подается отрицательное относительно катода напряжение порядка нескольких десятков вольт.

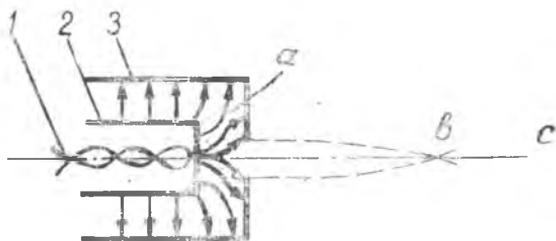


Рис. 3.

Электрическое поле между катодами и управляющим электродом осуществляет предварительную фокусировку луча, отбрасывая электроны к оси трубки.

На рис. 3 «а» — силовые линии электрического поля между катодом и управляющим электродом, «в» — фокус электронного луча, «вс» — ось трубки.

Движение электронов от катода к экрану и дальнейшая фокусировка их в узкий пучок обеспечиваются системой двух анодов, выполненных в виде полых металлических цилиндров. Первый анод имеет меньший диаметр, чем второй, и снабжен большим количеством диафрагм. Для того, чтобы получить достаточно большие скорости движения электронов, на аноды подаются высокие положительные потенциалы относительно катода (на первый анод порядка нескольких сотен вольт, а на второй — порядка нескольких киловольт). Для уяснения фокусирующего действия системы двух анодов рассмотрим рис. 4, на котором изображены: 1 — электрическое поле между первым и вторым анодами, 2 — траектория движения электрона в фокусирующем поле; 3 — оптический эквивалент системы двух анодов.

Так как потенциал второго анода выше потенциала первого анода, то электрическое поле между ними направлено от второго к первому аноду (рис. 4—1). На электрон, попадающий в электрическое поле анодов, действует сила, касательная к силовой линии, например, сила  $F$  в точке  $B$  силовой линии. Эту силу  $F$  можно разложить на две составляющие: продольную  $F_1$ , которая ускоряет движение электрона вдоль оси трубки, и поперечную  $F_2$ , отклоняющую электрон к оси. Аналогичные силы действуют и в точке  $C$  траектории, но здесь поперечная сила  $F_2'$  уже отклоняет электрон от оси (рис. 4—2).

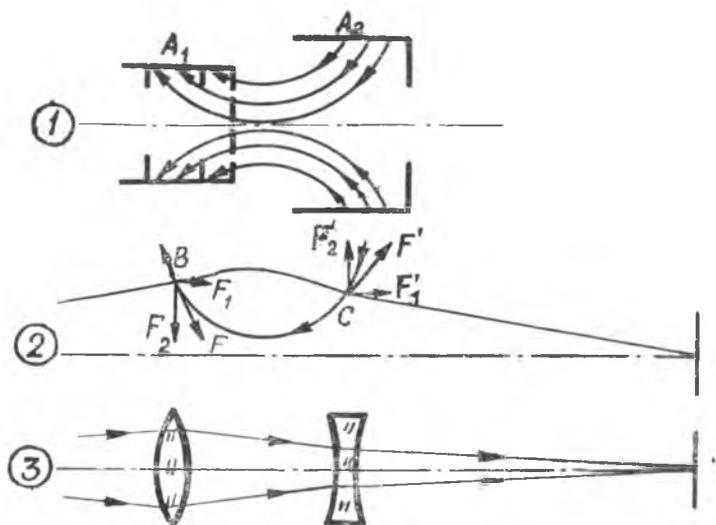


Рис. 4.

Таким образом, действие системы анодов эквивалентно действию оптической системы, состоящей из собирающей и рассеивающей линз (рис. 4—3). Поэтому фокусирующую систему анодов электронно-лучевой трубки принято называть электростатической линзой. Изменяя потенциал на первом аноде, который называется фокусирующим, можно изменять электрическое поле между анодами и тем самым перемещать фокус вдоль оси трубки, добиваясь совмещения его с поверхностью экрана. Благодаря этому на экране трубки получается светящееся пятно малого диаметра.

**Отклоняющая система трубки. Назначение блоков развертки и синхронизации.** На пути к экрану электронный луч проходит между двумя парами взаимно-перпендикулярных пластин  $XX$  и  $YY$ , образующих электростатическую отклоняющую систему электронно-лучевой трубки (см. рис. 2).

При подаче напряжений на пластины  $XX$  и  $YY$  происходит отклонение луча. Пластины  $XX$ , отклоняющие луч по горизонтали, называются горизонтально отклоняющими, а пластины  $YY$ , отклоняющие луч по вертикали, — вертикально отклоняющими. Если подать на одну из пар пластин постоянное напряжение, то оно вызовет смещение луча в сторону пластины, имеющей положительный потенциал. Когда на пластины подается переменное напряжение, светящееся пятно перемещается по экрану, образуя непрерывную светящуюся линию. Обычно исследуемое напряжение подается на вертикально отклоняющие пластины  $YY$ .

Для получения на экране трубки изображения кривой, выражающей изменения исследуемого напряжения во времени, на горизонтально отклоняющие пластины подается напряжение, величина которого прямо пропорциональна времени. Это напряжение вырабатывается в блоке развертки осциллографа и имеет пилообразную форму (рис. 5).

При линейном возрастании напряжения (участок АВ) перемещение светящейся точки вдоль оси  $X$  прямо пропорционально времени. На участке  $BC$  напряжение развертки резко падает до нуля, и световое пятно практически мгновенно возвращается в исходное положение (обратный ход луча).

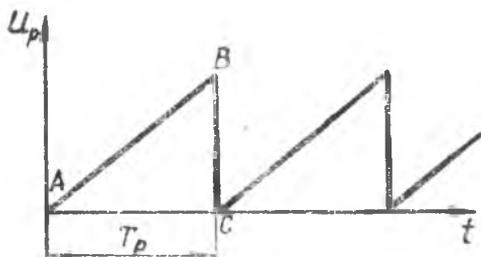


Рис. 5.

Далее цикл повторяется. Световую линию на экране, создаваемую этим напряжением, принимают за ось времени. При одновременной подаче исследуемого напряжения  $U_y$  на вертикально отклоняющие пластины  $YU$  и пилообразного напряжения развертки  $U_x$  на горизонтально отклоняющие пластины  $XX$  электронный луч будет одновременно перемещаться в вертикальном и горизонтальном направлениях. При этом луч будет прочерчивать на экране развернутую во времени диаграмму исследуемого напряжения. Для случая синусоидального напряжения  $U_y$  этот процесс представлен графически на рис. 6.

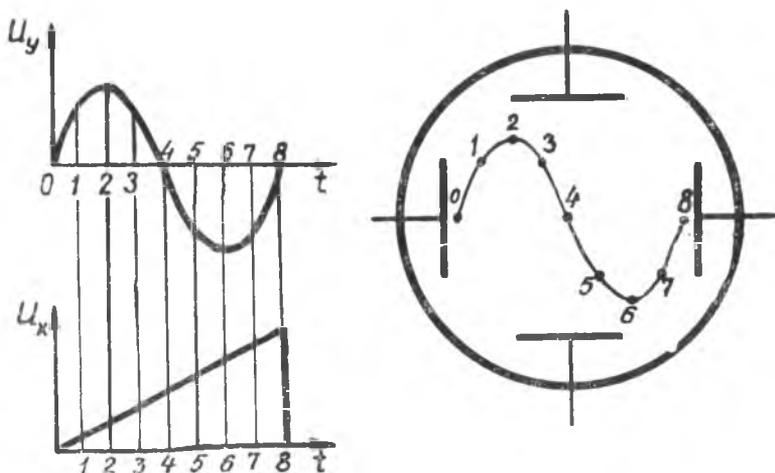


Рис. 6.

Для получения на экране трубки неподвижного изображения осциллограммы необходимо, чтобы при каждом перемещении луча вдоль линии развертки на него действовали в одних и тех же точках одинаковые напряжения между пластинами УУ. Это возможно лишь в том случае, когда период развертки равен целому числу периодов исследуемого напряжения, т.е.

$$T_p = nT_y \quad (1)$$

Выполнение условия (1) называется синхронизацией частоты напряжения развертки с частотой исследуемого сигнала. Эту операцию осуществляет блок синхронизации осциллографа.

**Назначение блоков усиления.** Если исследуемые напряжения имеют малую величину, то их предварительно усиливают с помощью блоков вертикального или горизонтального усиления осциллографа. Для исследования высоких напряжений в осциллографах предусмотрены делители входных напряжений.

### Упражнение 1. Ознакомление с работой осциллографа.

#### Наблюдение формы кривой синусоидального напряжения

Все блоки осциллографа смонтированы на шасси, которое находится в металлическом корпусе, закрытом спереди панелью. На панель выведены ручки управления работой осциллографа и экран электронно-лучевой трубки. Общий вид панели осциллографов типа ЭО-7 и С1-1 представлен на рис. 7.

Обычно ручки управления и дополнительные элементы (клеммы, тумблеры и т. д.) объединены в группы. Для рассматриваемых типов осциллографов можно выделить следующие группы:

#### 1 группа — регулировка луча.

**Выполняемые операции:**

1. Регулировка яркости изображения (ручка «Яркость»).
2. Фокусировка луча. (ручка «Фокус»).
3. Смещение луча по оси X (ручка «Ось X»).
4. Смещение луча по оси Y (ручка «Ось Y»).

#### 2 группа — регулировка развертки.

**Выполняемые операции:**

1. Переключение диапазонов частоты генератора развертки

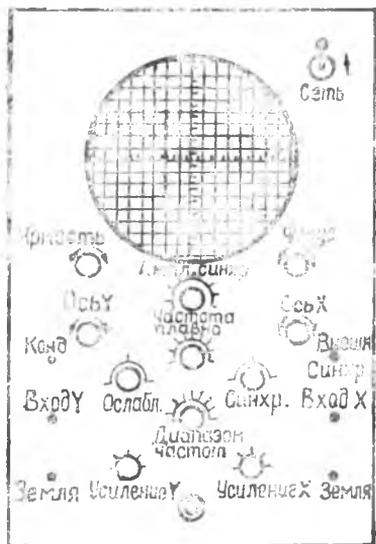


Рис. 7.

ки (ручка «Диапазон частот»). В крайнем левом положении, обозначенном «ВЫКЛ», генератор развертки отключается, а горизонтально отклоняющие пластины присоединяются к соответствующим входным клеммам прибора через усилитель.

2. Плавное изменение частоты генератора развертки (ручка «Частота плавно»).

3. Переключение блока синхронизации на различные источники напряжения: внутренний, внешний или от сети (ручка «Синхронизация», устанавливаемая в одном из трех положений).

4. Изменение амплитуды синхронизирующего напряжения для всех видов синхронизации (ручка «Амплитуда синхронизации»).

5. Подключение источника напряжения при внешней синхронизации (клемма с надписью «Внешн. синхр.»).

**3 группа — регулировка усиления по оси У. Выполняемые операции:**

1. Регулировка усиления по оси У (ручка «Усиление У»).

2. Ослабление входного сигнала (ручка «Ослабление», имеющая три позиции).

3. Подключение исследуемого напряжения к осциллографу (клеммы «Вход» и «Земля», расположенные около ручки «Усиление У»).

**4 группа — регулировка усиления по оси Х. Выполняемые операции:**

1. Регулировка усиления по оси Х (ручка «Усиление Х»).

2. Подключение исследуемого напряжения к осциллографу (клеммы «Вход» и «Земля», расположенные около ручки «Усиление Х»).

Кроме указанных выше групп управляющих элементов, на панели имеется ряд вспомогательных элементов: тумблер включения осциллографа; клемма «Контр. сигнал», пользуясь которой можно получать напряжение с частотой 50 гц и амплитудой в несколько вольт; индикаторная лампочка.

На задней панели осциллографа имеются клеммы, соединенные непосредственно с отклоняющими пластинами электронно-лучевой трубки.

Следует иметь в виду, что в зависимости от типа и назначения осциллографа объем каждой группы управляющих элементов и их расположение на панели могут быть различными. Однако основные элементы групп, указанные выше, остаются одинаковыми для всех осциллографов.

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ УПРАЖНЕНИЯ 1

1. Включить осциллограф в сеть переменного тока. Поставить ручку «Диапазон частот» в положение «ВЫКЛ», а ручки усиления на 0 (левое крайнее положение). После прогрева прибора (2—3 минуты) добиться с помощью ручек «Ось X» и «Ось Y» появления светящейся точки на экране и вывести ее в центр координатной сетки. Установить минимальный размер светящейся точки при невысокой ее яркости ручками «Фокус» и «Яркость».

2. Включить генератор развертки. Изменяя частоту генератора развертки ручками «Диапазон частот» и «Частота плавно», а также вращая ручку «Усиление X», получить на экране горизонтальную линию развертки.

3. На вертикальный вход осциллографа подключить напряжение с выходных клемм звукового генератора. Включить звуковой генератор в сеть и установить произвольную частоту напряжения на выходе генератора.

4. Включив ручку «Синхронизация» в положение «Внутр.» или «От сети» и изменяя частоту развертки ручками «Диапазон частот» и «Частота плавно», добиться четкого неподвижного изображения синусоиды на экране осциллографа. Величину амплитуды синусоиды следует установить в пределах экрана ручкой «Усиление Y».

5. Упражнение выполнить для трех различных частот, добиваясь каждый раз устойчивого изображения согласно п. 4.

## Упражнение 2. Определение чувствительности электронно-лучевой трубки осциллографа

Одним из основных параметров электронно-лучевых трубок является чувствительность  $S$ , показывающая на сколько миллиметров перемещается луч по экрану при изменении напряжения между отклоняющими пластинами на один вольт:

$$S = \frac{h}{U}, \quad (2)$$

где  $h$  — отклонение луча на экране трубки в мм;  $U$  — напряжение, вызывающее отклонение луча, в вольтах.

Чувствительность определяется рядом внутренних параметров трубки, а именно:

$$S = \frac{lL}{2U_{a2}d}, \quad (3)$$

где  $l$  — длина пары отклоняющих пластин в мм;  $L$  — расстояние от середины пластины до экрана в мм;  $d$  — расстояние между пластинами в мм;  $U_{a2}$  — напряжение на втором аноде в вольтах.

Формулу (3) можно получить, рассматривая движение электрона в поле отклоняющей пары пластин (см. рис. 8).

## ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ УПРАЖНЕНИЯ 2

1. Подготовить осциллограф к измерениям согласно п. 1 упражнения 1.

2. Подключить выходные клеммы автотрансформатора к клеммам «Х», расположенным на задней панели осциллографа. Параллельно клеммам включить вольтметр.

3. Установить ручку регулировки выходного напряжения автотрансформатора в крайнее левое положение и включить автотрансформатор в сеть.

4. Измерить для нескольких значений напряжения  $U_x$  длину световой линии на экране в миллиметрах. Полученные данные записать в таблицу 1.

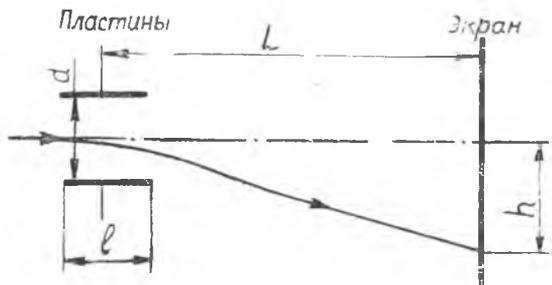


Рис. 8.

Таблица 1

№ п/п	$U_x, \text{ в}$	$L_x, \text{ мм}$	$S_x, \text{ мм/в}$	№ п/п	$U_y, \text{ в}$	$L_y, \text{ мм}$	$S_y, \text{ мм/в}$

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Вычислить чувствительность  $S_x$  и  $S_y$  по формулам:

$$S_x = \frac{L_x}{2\sqrt{2}U_x} \quad \text{и} \quad S_y = \frac{L_y}{2\sqrt{2}U_y}, \quad (4)$$

где  $L$  — длина световой линии на экране трубки.

В отличие от формулы (3) здесь в знаменателе имеется множитель  $2\sqrt{2}$ . Появление этого множителя объясняется очень просто: во-первых, переменное напряжение отклоняет луч в обе стороны от первоначального положения, поэтому  $h = \frac{h}{2}$ ; во-вторых, в отличие от осциллографа вольтметр переменного тока показывает не амплитудное значение напряжения, а эффективное

$$U_{\text{эфф}} = \frac{U_{\text{ампл}}}{\sqrt{2}}. \quad (5)$$

2. Найти средние значения  $S_x$  и  $S_y$ .

3. Результаты расчетов записать в таблицу 1.

### Упражнение 3. Определение частоты сигналов с помощью фигур Лиссажу

При помощи осциллографа можно производить сравнение частот различных переменных напряжений. В этом случае исследуемое колебание неизвестной частоты складывается с перпендикулярным ему колебанием известной частоты. В результате сложения луч, участвуя в обоих колебаниях, прочерчивает на экране осциллографа кривые сложной формы, называемые фигурами Лиссажу. По виду фигур Лиссажу можно определить как отношение частот, так и разность фаз складываемых колебаний.

Рассмотрим сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний с частотами  $\omega_x = \omega$ ,  $\omega_y = n\omega_x = n\omega$  и разностью фаз  $\varphi$ :

$$x = x_0 \cos \omega t; \quad (6)$$

$$y = y_0 \cos(n\omega t + \varphi). \quad (7)$$

Исключив из этих уравнений время, получим уравнение траектории движения точки. Вид уравнения будет определяться значениями величин  $n$ ,  $\varphi$ ,  $x_0$  и  $y_0$ .

Например, в случае  $n = 1$ , т. е. при  $\omega_x = \omega_y$ , уравнение траектории имеет вид

$$\left(\frac{x}{x_0}\right)^2 + \left(\frac{y}{y_0}\right)^2 - 2\frac{xy}{x_0 y_0} \cos \varphi = \sin^2 \varphi. \quad (8)$$

Полученное выражение является уравнением эллипса, вид которого зависит от величины  $\varphi$  и соотношения амплитуд  $x_0$  и  $y_0$ . Если  $\varphi = 0$  или  $\varphi = \pi$ , то эллипс вырождается в прямую. Если  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , то получается эллипс, оси которого совпадают с осями координат. Когда  $x_0 = y_0$ , эллипс переходит в окружность.

Вообще, при произвольных значениях  $n$  и  $\varphi$  складываемых колебаний траектория точки, совершающей суммарное движение, может оказаться весьма сложной. Однако существует простой метод, позволяющий по фигурам Лиссажу определять отношение частот складываемых колебаний.

Можно показать, что отношение числа пересечений неподвижной фигуры Лиссажу с координатными осями равно отношению соответствующих частот, т. е.

$$\frac{v_x}{v_y} = \frac{n_y}{n_x}, \quad v_y = \frac{n_x v_x}{n_y} \quad (9)$$

где  $n_x$  — число пересечений фигуры с осью  $x$ ;  $n_y$  — число пересечений фигуры с осью  $y$ ;  $v_x$  — частота напряжения, подаваемого на пластины  $x$ ;  $v_y$  — частота напряжения, подаваемого на пластины  $y$ .

В том случае, когда ось координат проходит через точку пересечения линий фигуры Лиссажу, эту точку при подсчете  $n_x$  и  $n_y$  считают дважды.

Например, на рис. 9а  $\frac{v_x}{v_y} = \frac{4}{2} = \frac{2}{1}$ , на рис. 9б  $\frac{v_x}{v_y} = \frac{6}{4} = \frac{3}{2}$ .

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ УПРАЖНЕНИЯ 3

1. Собрать схему согласно рис. 10.
2. Подготовить осциллограф к работе, следуя п. 1 упражнения 1.

3. Включить в сеть звуковой генератор и автотрансформатор. Напряжение на выходе трансформатора установить не более 10 вольт.

4. Вращая ручку «Усиление X», добиться горизонтальной полосы на экране в  $\frac{1}{2}$  длины координатной сетки.

5. Вращением ручки звукового генератора «Амплитуда» или «Напряжение на выходе» добиться появления на экране фигуры Лиссажу. Высота фигуры на экране устанавливается ручкой «Усиление Y».

6. Плавню вращая регулятор частоты звукового генератора, получить устойчивое положение фигуры. Записать в таблицу 2 отсчет по шкале регулятора  $N$ .

7. Зарисовать фигуру и определить число точек пересечения ее с осями координатной сетки. Полученные результаты записать в таблицу 2.

8. Аналогичным образом выполнить измерения для шести различных фигур Лиссажу, т. е. для шести различных частот звукового генератора. Результаты измерений записать в таблицу 2.

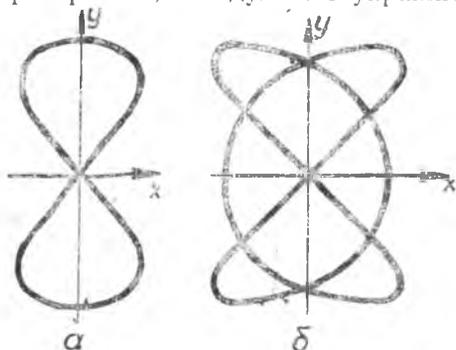


Рис. 9.

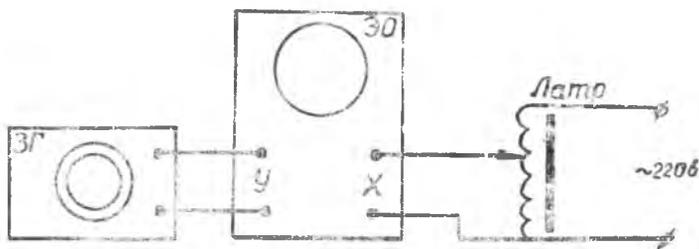


Рис. 10.

№ п/п	Вид фигуры	$N$ , дел	$n_x$	$n_y$	$\frac{n_x}{n_y}$	$\nu_x$ , гц	$\nu_y$ , гц

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИИ

1. Для каждой фигуры Лиссажу вычислить значение частоты напряжения, подаваемого на вертикально отклоняющие пластины. Частота напряжения сети  $\nu_x = 50$  гц.

2. Построить график зависимости частоты звукового генератора от показаний по шкале регулятора  $\nu_y = f(N)$ .

### Контрольные вопросы

1. Начертите блок-схему осциллографа и поясните принцип действия последнего.

2. Сделайте вывод формулы (3), используя при этом схему, представленную на рис. 8.

3. На пластины УУ подано синусоидальное напряжение, частота которого  $f = 50$  гц. Какое напряжение (по форме и частоте) необходимо подать на пластины ХХ, чтобы на экране осциллографа получилось устойчивое изображение двух периодов синусоиды?

4. При каких условиях на экране осциллографа получаются устойчивые фигуры Лиссажу? Каким образом по фигуре Лиссажу можно определить соотношение частот складываемых колебаний?

### ЛИТЕРАТУРА

1. Физический практикум, Электричество и оптика, под редакцией В. И. Ивероновой, «Наука», задача 109, М., 1968.

2. Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, Л. Б. Милковская. Курс физики, т. II, «Высшая школа», § 10, 3, М., 1964.

## ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ТИРАТРОНА

**Принадлежности:** панель, на которой установлены тиратрон и сопротивления; вольтметры; миллиамперметр; выпрямитель.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В современной электронике наряду с вакуумными лампами широкое применение нашли газоразрядные приборы. Баллоны таких приборов заполнены инертным газом или смесью газов, нередко с примесью паров ртути или цезия, до давления порядка  $10^{-4}$ — $10^{-3}$  мм. рт. ст., так что процесс прохождения тока через лампу в значительной степени определяется взаимодействием электронов с атомами газа.

В газоразрядном приборе с холодным катодом используется самостоятельный разряд (тлеющий разряд), при котором ток через прибор поддерживается за счет объемной ионизации молекул газа ( $\alpha$  — процессы) и эмиссии электронов с катода под действием положительных ионов ( $\gamma$  — процессы). При этом между анодом и катодом должна быть достаточно высокая разность потенциалов. В приборе с накаливаемым катодом используется несамостоятельный дуговой разряд, причем основными процессами, обеспечивающими необходимую для прохождения тока концентрацию носителей заряда, являются термоэлектронная эмиссия с поверхности катода и объемная ионизация в межэлектродном пространстве.

Рассмотрим простейший тип газоразрядного прибора с несамостоятельным разрядом — газотрон.

Эта лампа имеет два электрода: анод и катод. Анализ процессов, происходящих в газотроне, удобно производить с помощью

так называемой вольт-амперной характеристики, выражающей связь между силой тока, протекающего через газотрон, и анодным напряжением. Эту характеристику можно получить экспериментально путем измерения анодного тока  $I_a$  при различных анодных напряжениях  $U_a$  с помощью установки, схема которой приведена на рис. 1.

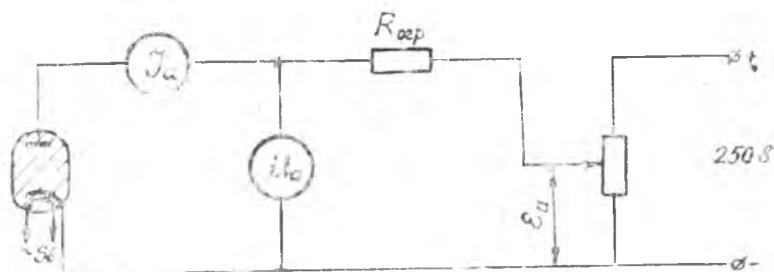


Рис. 1.

Типичный вид вольт-амперной характеристики газотрона показан на рис. 2.

При небольших анодных напряжениях (участок 1—2 характеристики) сила тока медленно увеличивается с повышением напряжения. Это объясняется тем, что при малых значениях  $U_a$  не все электроны, испускаемые катодом, достигают анода. Часть электронов образует между катодом и анодом электронное облако (отрицательный пространственный заряд), поле которого препятствует движению к аноду вновь вылетающих из катода электронов. С увеличением напряжения  $U_a$  плотность электронного облака постепенно уменьшается,  $I_a$  растет. При этом взаимодействие электронов с атомами газа носит характер упругих столкновений. Так как электроны имеют значительно меньшую массу, чем атомы газа, то энергия электронов при упругих столкновениях меняется незначительно. Следовательно, на участке 1—2 характеристики ток через лампу — чисто электронный, ограниченный пространственным зарядом.

С увеличением анодного напряжения увеличивается и скорость электронов.

При некотором значении анодного напряжения  $U_a = U_{\text{зак}}$  энергия электронов приобретает такое значение, что становятся возможными неупругие столкновения с нейтральными атомами газа, т. е. возбуждение и ионизация последних. образо-

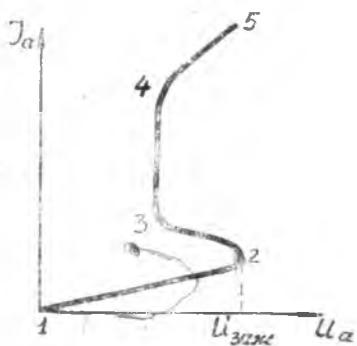


Рис. 2.

вавшиеся при ионизации свободные электроны ускоряются электрическим полем, и, в свою очередь, ионизируют другие атомы. В результате такого лавинообразного процесса число носителей заряда резко увеличивается, а сопротивление лампы соответственно резко падает. В газотроне устанавливается тип газового разряда, называемый дуговым. Процесс перехода к дуговому разряду называется зажиганием газотрона, а соответствующее значение разности потенциалов между электродами — потенциалом зажигания — ( $U_{\text{зж}}$ ).

В целях предупреждения чрезмерного возрастания разрядного тока, газотрон, подобно всем газоразрядным приборам, включается в электрическую цепь через ограничительное сопротивление  $R_{\text{огр}}$ . После зажигания разряда, по мере увеличения тока, возрастает и напряжение на  $R_{\text{огр}}$ , что приводит, при данном  $\epsilon_a$ , к уменьшению напряжения на газотрон (участок 2—3 характеристики):

$$U = \epsilon_a - I_a R_{\text{огр}}.$$

Характерной особенностью рассматриваемого нами разряда является постоянство анодного напряжения при увеличении силы тока на участке 3—4 характеристики. С повышением напряжения  $\epsilon_a$  увеличивается ток, а следовательно, и напряжение на ограничительном сопротивлении  $I_a R_{\text{огр}}$ . Значение же анодного напряжения  $U_a$  остается постоянным. Рост тока на этом участке характеристики происходит вследствие того, что положительные ионы, образовавшиеся в результате ионизации, компенсируют отрицательный заряд, ограничивающий анодный ток.

Конец участка 2—3 характеристики соответствует полной компенсации отрицательного пространственного заряда в межэлектродном пространстве. При этом ток через газотрон принимает максимально допустимое значение. Дальнейшее увеличение  $\epsilon_a$  влечет за собой возрастание  $U_a$  (участок 4—5 характеристики), что в свою очередь приводит к увеличению скорости положительных ионов, бомбардирующих катод. В результате оксидный слой катода усиленно разрушается, газотрон выходит из строя. Чтобы это не произошло, необходимо ограничивать ток, не допускать увеличения его далее точки 4.

Тиратрон отличается от газотрона тем, что у него имеется один или два дополнительных электрода, позволяющих путем изменения потенциала на них управлять моментом зажигания. Дополнительный электрод называется управляющей сеткой. В тиратроне сетка устроена так, что она полностью закрывает катод от воздействия электрического поля анода. Обычно сетка выполняется в виде диска с одним или несколькими отверстиями и соединяется с цилиндром, охватывающим катод и анод. Такая конструкция сетки исключает возможность попадания электронов на анод помимо нее. Устройство тиратрона схематически показано на рис. 3.

Пусть на анод подано некоторое напряжение  $U_a$ , положительное относительно катода, а на сетку — напряжение  $U_c$ , отрица-

тельное относительно катода. При больших отрицательных напряжениях на сетке электрическое поле препятствует движению электронов к аноду. Ионизация газа при этом мала, а анодный ток практически равен нулю. С уменьшением отрицательного потенциала на сетке ионизация усиливается, и при некотором значении  $U_c$  в тиратроне возникает дуговой разряд.

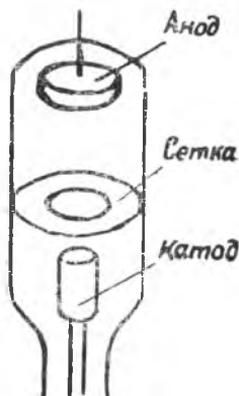


Рис. 3.

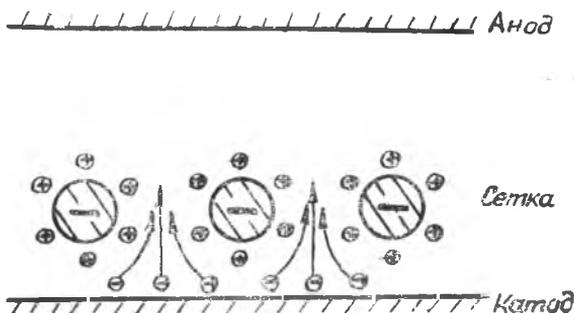


Рис. 4.

Процессы, происходящие в тиратроне, аналогичны процессам, имеющим место в газотроне. После зажигания тиратрона положительные ионы, притягиваемые отрицательно заряженной сеткой, образуют вокруг нее экранирующий «чехол» (см. рис. 4). Вследствие этого сетка теряет свои управляющие свойства, т. е. ток через тиратрон после зажигания уже не зависит от ее потенциала (см. рис. 5).

Важной характеристикой тиратрона является его пусковая характеристика, выражающая взаимную зависимость минимальных значений анодного и сеточного напряжений, при которых происходит зажигание разряда (см. рис. 6).

Обычно величина напряжения зажигания зависит от температуры окружающей среды, предшествовавшего режима работы и ряда других факторов. Поэтому в справочниках вместо пусковой характеристики приводится пусковая область. Пусковая характеристика показывает, что с увеличением отрицательного потенциала на сетке увеличивается анодное напряжение, необходимое для зажигания тиратрона.

По выполняемым функциям тиратрон подобен одностороннему реле, поэтому он часто используется в схемах управления электрическими машинами, в различных импульсных схемах, в электронно-вычислительных машинах и т. д.

Целью данной работы является ознакомление с основными характеристиками тиратрона.

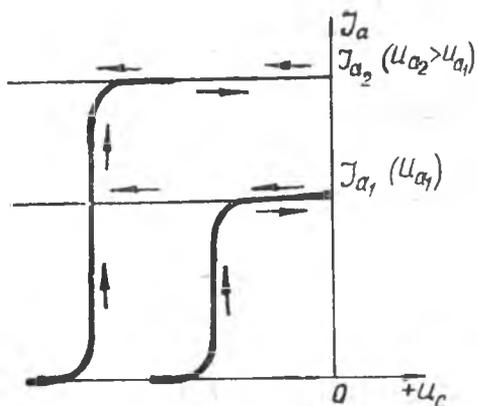


Рис. 5.

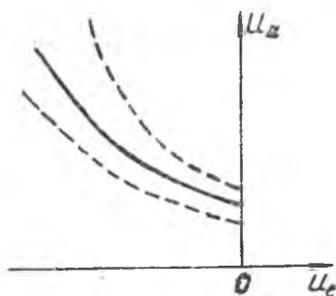


Рис. 6.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

#### У п р а ж н е н и е 1. Определение вольтамперной характеристики тиратрона

1. Собрать схему согласно рис. 7.
2. Включить напряжение накала  $\sim 6$  в.
3. Установить движок реостата  $R$  в положение 1, после чего включить напряжения 250 в и 30 в.
4. Снять вольт-амперную характеристику тиратрона при двух различных напряжениях на сетке:  $U_c = -20$  в,  $U_c = -30$  в. Результаты измерений записать в таблицу 1.
5. Построить вольт-амперные характеристики на миллиметровой бумаге.

#### У п р а ж н е н и е 2. Определение пусковой характеристики тиратрона

Схема установки та же, что и в упражнении 1.

1. Установить сеточное напряжение  $-30$  в.

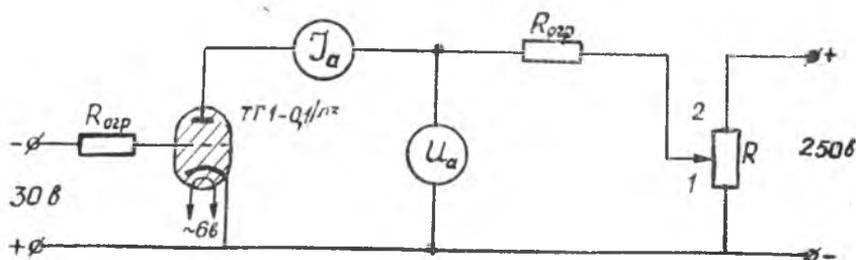


Рис. 7.

Таблица 1

$U_c = -20 \text{ в}$		$U_c = -30 \text{ в}$	
$U_a, \text{ в}$	$I_a, \text{ ма}$	$U_a, \text{ в}$	$I_a, \text{ ма}$

Таблица 2

$U_c, \text{ в}$	
$U_{\text{зж}}, \text{ в}$	

2. Постепенно увеличивая анодное напряжение, определить потенциал зажигания.

3. Изменяя  $U_c$  от  $-30 \text{ в}$  до  $0 \text{ в}$  (с шагом  $5 \text{ вольт}$ ), снять зависимость ( $U_{\text{зж}}$  от  $U_c$ ).

4. Данные измерений записать в таблицу 2.

5. Построить график зависимости  $U_{\text{зж}}$  от  $U_c$  на миллиметровой бумаге.

### Упражнение 3 Определение сеточной характеристики тиратрона

Схема установки та же, что и в упражнении I.

1. Установить анодное напряжение  $U_a = 100 \text{ в}$ .

2. Изменяя сеточное напряжение от  $-30 \text{ вольт}$  до  $0$ , снять зависимость анодного тока  $I_a$  от  $U_c$ .

3. Измерения повторить для  $U_a = 150 \text{ в}$ .

Полученные данные представить в виде графика.

#### Контрольные вопросы

1. Опишите физические процессы в газотроне, которые приводят к возникновению дугового разряда — «зажиганию» газотрона.

2. Почему на участке 3—4 вольтамперной характеристики анодный ток через газотрон не зависит от величины анодного напряжения? Чем он ограничивается?

3. Какова роль сетки в тиратроне?

4. Что такое «пусковая область» тиратрона?

5. Приведите какой-либо пример применения тиратрона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Савельев Курс общей физики, т. 2, изд. «Наука», §§ 89, 90, М., 1968.

2. Физический практикум «Электричество и оптика», под ред. В. И. Ивероновой, изд. «Наука», задача 81, М., 1968.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ДВОЙНЫМ МОСТОМ

**Принадлежности:** мост постоянного тока типа МТВ; гальванометр; образцовая катушка сопротивления; приспособление для включения в схему проводников с неизвестным сопротивлением.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Для измерения сопротивлений обычно используются приборы с мостовыми схемами. Широкое распространение получили две схемы — одинарного и двойного моста.

Одинарным мостом можно с достаточной точностью измерять большие сопротивления (до десятков ом). Теория одинарного моста изложена в лабораторной работе № 3.

При измерении весьма малых сопротивлений одинарный мост дает большие погрешности из-за влияния сопротивлений соединительных проводов и переходных сопротивлений контактов. Свести к минимуму эти влияния позволяет так называемый двойной мост, схема которого приведена на рис. 1.

На схеме:  $R_x$  — неизвестное сопротивление,  $R_N$  — образцовая катушка. Сопротивления остальных плеч моста обозначены через  $R$  с соответствующими индексами, а сопротивления соединительных проводов и контактов — через  $r_1, r_2$  и т. д. Между точками  $a$  и  $b$  включен гальванометр  $G$ . Питание схемы производится от источника постоянного тока  $\epsilon$ .

Сопротивления плеч моста всегда можно подобрать таким образом, что потенциалы точек  $a$  и  $b$  диагонали моста будут одинаковыми, и, следовательно, ток через гальванометр будет равен нулю. Такое состояние моста называется равновесным.

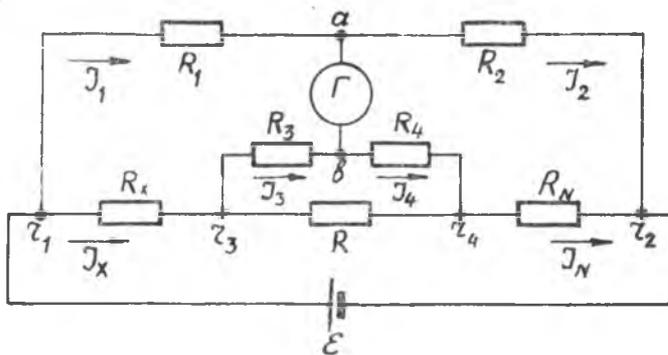


Рис. 1.

Определим условия равновесия моста, полагая для простоты обозначений, что сопротивления соединительных проводов и контактов  $r$  входят в величины сопротивлений, обозначенных буквами  $R$  с соответствующими индексами. На основании второго закона Кирхгофа при равновесии моста имеем:

$$\text{(контур } r_1 r_3 b a r_1) \quad I_x R_x + I_3 R_3 - I_1 R_1 = 0; \quad (1)$$

$$\text{(контур } b r_4 r_2 a b) \quad I_x R_N + I_3 R_4 - I_1 R_2 = 0; \quad (2)$$

$$\text{(контур } r_3 r_4 b r_3) \quad I_3 (R_3 + R_4) - (I_x - I_3) = 0. \quad (3)$$

При выводе этих формул принимались во внимание соотношения, справедливые при равновесии моста:  $I_1 = I_2$ ,  $I_3 = I_4$ ,  $I_x = I_N$ . Решив уравнения (1) — (3) относительно  $R_x$ , найдем

$$R_x = R_N \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_4 R}{R + R_3 + R_4} \left( \frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right). \quad (4)$$

Из уравнения (4) следует, что, если выполнить условие  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ , то второй член уравнения (4) будет равен нулю, и измеряемое сопротивление  $R_x$  определится из равенства:

$$R_x = R_N \frac{R_1}{R_2} \quad (4a)$$

Для того, чтобы некоторая неточность выполнения условия  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$  не создавала заметной погрешности при использовании формулы (4a), сопротивление  $R$  стремятся сделать как можно меньше. С этой целью соединительный провод  $R$  изготавливается в виде короткого отрезка достаточно толстого медного провода или шины.

Для уменьшения влияния сопротивлений соединительных проводов и контактов на точность измерений принимаются следующие меры.

1. Сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  выбираются значительно большими, чем сопротивления соединительных проводов и контактов (порядка 10 ом).

2. Включение измеряемого и образцового сопротивлений в схему моста производится с помощью четырех зажимов: двух токовых и двух потенциальных.

Токовые зажимы предназначены для сборки цепи  $R_x - R - R_N - \epsilon$ , по которой идет значительный ток (несколько ампер).

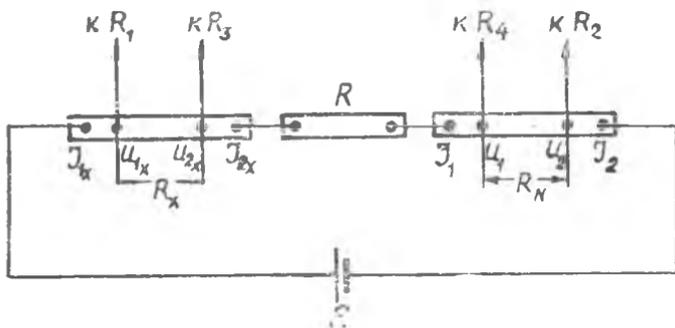


Рис. 2.

Потенциальные зажимы предназначены для подключения сопротивлений к плечам моста  $R_1 - R_3$  и  $R_2 - R_4$ . Они выполняются обычно в виде двух призм, плотно прижатых к измеряемому проводнику. Таким образом, схема цепи  $R_x - R - R_N - \epsilon$  имеет вид, показанный на рис. 2.

На схеме  $I_{1x}$ ,  $I_{2x}$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  — токовые зажимы неизвестного сопротивления и образцовой катушки;  $U_{1x}$ ,  $U_{2x}$ ,  $U_1$ ,  $U_2$  — потенциальные зажимы неизвестного сопротивления и образцовой катушки.

Очевидно, измеряемое сопротивление расположено между потенциальными зажимами.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 3 представлена схема установки для измерения малых сопротивлений. В нее входят: 1 — образцовая катушка сопротивлений с двумя токовыми и двумя потенциальными зажимами, 2 — приспособление для подключения в схему моста проводника с неизвестным сопротивлением. Приспособление имеет два неподвижных токовых контакта и два подвижных потенциальных контакта, в которых зажимается проводник 3. Длина проводника между потенциальными зажимами определяется с помощью линейки 4.

Потенциальные контакты образцовой катушки и измеряемого сопротивления соединяются проводами с клеммами на панели комбинированного моста типа МТВ (5) (мост Томсона-Витсона), обозначенными соответственно  $R_N$  и  $X_T$ . К клеммам  $\Gamma$  присоединяется чувствительный гальванометр 6.

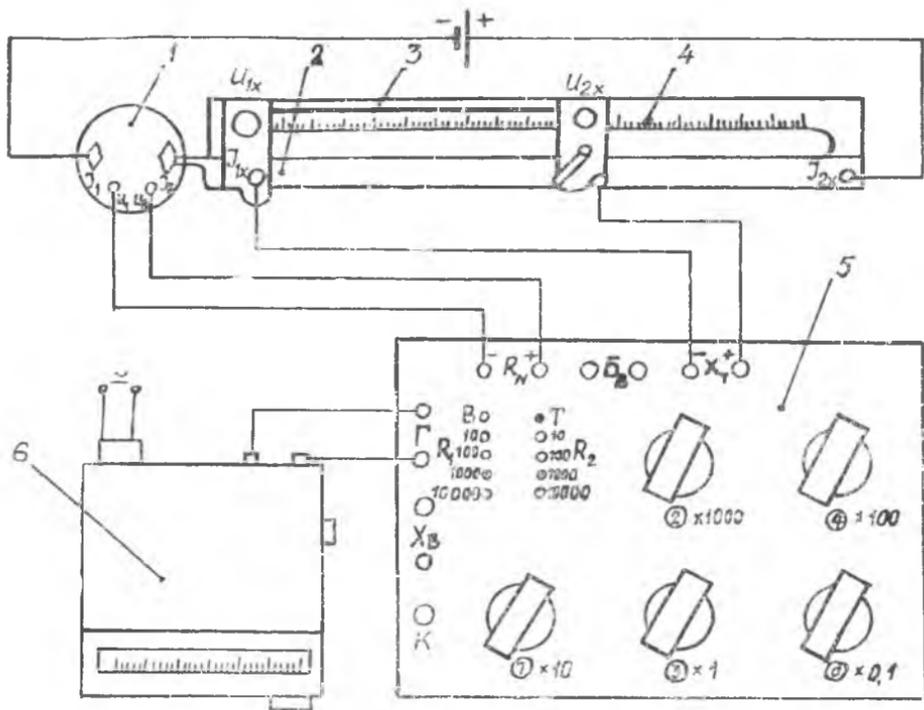


Рис. 3.

Прибор МТВ можно использовать как одинарный или же как двойной мост. Включение его по схеме одинарного или двойного моста осуществляется при помощи штекера, который вставляется в гнезда, обозначенные соответственно *B* и *T*. Упрощенная схема прибора, когда он используется как двойной мост, приведена на рис. 4.

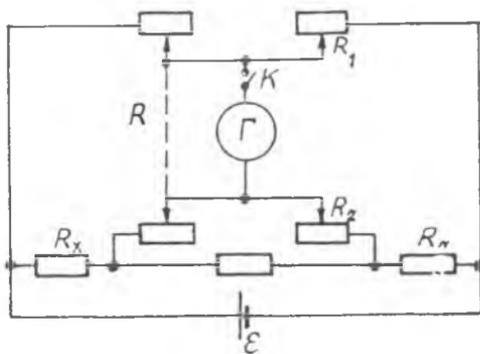


Рис. 4.

Плечи моста  $R_1$  и  $R_2$  выполнены в виде штепсельных магазинов сопротивлений, гнезда которых установлены на верхней панели прибора. (На рис. 1 плечам  $R_1$  и  $R_2$  соответствуют гнезда  $R_2$  и  $R_4$ ). Величины сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  устанавливаются с помощью штекеров, вставляемых в гнезда с соответствующими надписями.

Два других плеча выполнены в виде сдвоенного пяти-

декадного магазина сопротивлений —  $R$ . (На рис. 1 плечам  $R$  соответствуют плечи  $R_1$  и  $R_2$ ). Ручки управления каждой декадой выведены на панель прибора. Значение сопротивления, устанавливаемого на пятидесятилетнем магазине, равно сумме произведений цифр, видимых в окошках около ручек, на соответствующие множители.

Кнопка  $K$  служит для включения гальванометра в схему моста при измерениях.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать измерительную установку согласно схеме, приведенной на рис. 3, с соблюдением полярности.

2. Зажать между потенциальными зажимами измерительного приспособления медный проводник длиной 15—20 см.

3. Установить штекер в гнездо, обозначенное буквой  $T$ .

4. Включить осветитель гальванометра. Установить ручку на передней панели гальванометра против деления  $\times 100$ , что соответствует наименьшей чувствительности прибора. С помощью корректора установить нулевое положение светового указателя.

5. Установить с помощью штекеров на магазинах  $R_1$  и  $R_2$  **одинаковые сопротивления**, величина которых определяется из таблицы 2 на крышке прибора в зависимости от величины  $R_N$ .

6. Поворотом ручки декадного магазина  $R$  ( $\times 1000$ ) добиться приближенного равновесия моста. При этом гальванометр в схему следует включать на короткое время. Затем производится более точное уравнивание схемы с помощью ручек ( $\times 100$ ), ( $\times 10$ ) и т. д. При этом необходимо увеличивать чувствительность гальванометра переключением ручки на его панели в положение  $\times 10$ , а затем — в положение  $\times 1$ . После каждого переключения следует проверять нулевое положение светового указателя.

**Внимание!** Только уравнив мостовую схему при наименьшей чувствительности гальванометра, можно переходить к более точным измерениям. Гальванометр очень чувствителен к перегрузкам.

7. Измерения сопротивления проводника одной длины нужно провести не менее трех раз. Результаты измерений записать в таблицу 1.

8. Аналогичные измерения выполнить для нескольких проводников из различных материалов.

9. Измерить диаметр  $d$  проводника и его длину  $l$ . Результаты измерений записать в таблицу 1.

10. Записать комнатную температуру  $t^\circ\text{C}$ .

Таблица 1

Материал	№ п/п	$l$ , м	$d$ , м	$R_N$ , ом	$R_1=R_2$ , ом	$R_1$ , ом	$R_x$ , ом	$t^\circ\text{C}$

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Рассчитать значение сопротивления для каждого опыта по формуле

$$R_x = R_N \frac{R}{R_1}$$

2. Рассчитать удельное сопротивление исследуемых материалов при комнатной температуре по формуле

$$\rho_t = \frac{R_x \cdot \frac{\pi d^2}{4}}{l}$$

3. Определить удельное сопротивление исследуемых материалов при  $0^\circ\text{C}$ , используя зависимость

$$\rho_0 = \frac{\rho_t}{1 + \alpha t}$$

Значения температурных коэффициентов сопротивления различных материалов приведены в таблице 2. Все расчеты следует производить по средним значениям.

4. Результаты расчетов записать в таблицу 3.

Таблица 2

Материал	$\alpha$ , град <sup>-1</sup>
Медь	$+4,1 \cdot 10^{-3}$
Алюминий	$+4,2 \cdot 10^{-3}$
Железо	$+6,0 \cdot 10^{-3}$

Таблица 3

Материал	$R_{x \text{ ср.}}$ О.М.	$\rho_t$ , О.М.·М	$\rho_0$ , О.М.·М

### Контрольные вопросы

1. Чем отличается двойной мост (мост Томсона) от одинарного моста (моста Уитстона)? Сравните их схемы.
2. Сделайте вывод формулы

$$R_x = R_N \frac{R}{R_1}$$

### ЛИТЕРАТУРА

1. Физический практикум, Электричество и оптика, под редакцией В. И. Швероновой, задача 73, изд. «Наука», М., 1968.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ДИАМАГНЕТИКОВ И ПАРАМАГНЕТИКОВ

**Принадлежности:** аналитические весы с разновесом; набор образцов; выпрямитель; миллиамперметр.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

**Диамagnetики и парамагнетики.** Намагничивание магнетика, помещенного во внешнее магнитное поле, характеризуется вектором намагниченности  $\vec{I}$ , который определяется как магнитный момент единицы объема магнетика, т. е.

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n (\vec{p}_m)_i}{\Delta V}, \quad (1)$$

где  $(\vec{p}_m)_i$  — магнитный момент  $i$ -ой молекулы;  
 $n$  — число молекул в объеме  $\Delta V$ .

Опыт показывает, что вектор намагниченности пропорционален напряженности магнитного поля, т. е.

$$\vec{I} = \chi \vec{H}, \quad (2)$$

где  $\chi$  — магнитная восприимчивость вещества.

Для диамагнетиков  $\chi < 0$  и мала по абсолютной величине.

Для парамагнетиков  $\chi > 0$  и так же мала по абсолютной величине.

Кроме магнитной восприимчивости для характеристики магнитных свойств вещества вводится понятие относительной магнитной проницаемости  $\mu$ , которая связана с  $\chi$  соотношением

$$\mu = 1 + \chi. \quad (3)$$

Рассмотрим процесс намагничивания магнетиков. Внешнее магнитное поле вызывает прецессию электронных орбит атомов, что эквивалентно добавочному вращению электронов вокруг оси, проходящей через ядро атома параллельно вектору  $\vec{H}$ . Благодаря этому каждый атом приобретает некоторый индуцированный магнитный момент, направленный против поля.

Собственный магнитный момент атомов диамагнетика равен нулю, поэтому результирующий момент будет определяться только индуцированным магнитным моментом. Таким образом, диамагнетики намагничиваются в направлении, противоположном внешнему полю.

Атомы парамагнетика обладают магнитным моментом, отличным от нуля даже при отсутствии внешнего магнитного поля. При этом намагниченность достаточно большого образца парамагнетика равна нулю, так как магнитные моменты атомов ориентированы хаотично. При наличии внешнего магнитного поля магнитные моменты ориентируются преимущественно в направлениях, близких к направлению поля. Это намагничивание парамагнетиков значительно больше диамагнитного эффекта, связанного с появлением индуцированного момента.

Таким образом, парамагнетики намагничиваются в направлении, совпадающем с внешним полем.

**Силы, действующие на магнетики в магнитном поле.** Пусть атом магнетика имеет магнитный момент  $\vec{P}_m$ . В магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  на этот атом будет действовать механический момент  $\vec{M}$ , определяемый формулой

$$\vec{M} = [\vec{P}_m, \vec{B}]. \quad (4)$$

Для того, чтобы увеличить угол между  $\vec{P}_m$  и  $\vec{B}$  на величину  $d\alpha$ , нужно совершить работу против сил, действующих на контур в поле:

$$dA = M d\alpha = P_m B \sin \alpha d\alpha. \quad (5)$$

Эта работа идет на увеличение энергии, которой обладает атом в магнитном поле, т. е.

$$dW = P_m B \sin \alpha d\alpha. \quad (6)$$

Интегрируя, находим:

$$W = -P_m B \cos \alpha + \text{const}, \quad (7a)$$

или

$$W = -(\vec{P}_m, \vec{B}) + \text{const}. \quad (7b)$$

С помощью выражения (7b) можно определить силу, действующую на атом в магнитном поле:

$$\vec{f} = -\frac{\partial W}{\partial x} \vec{i} - \frac{\partial W}{\partial y} \vec{j} - \frac{\partial W}{\partial z} \vec{k}. \quad (8)$$

Рассмотрим образец магнетика, помещенного между полюсами постоянного магнита, поле которого изменяется в направлении оси  $Z$  (рис. 1).

Разобьем область, занимаемую магнитным полем, на три участка: на участках 1—2 и 3—4 индукция поля уменьшается от  $B_0$  до нуля, на участке 2—3 индукция постоянна.

Величина силы, действующей на атомы магнетика в направлении оси  $Z$ , равна.

$$f_z = -\frac{\partial W}{\partial z}. \quad (9)$$

Эта сила приложена к атомам магнетика, находящимся в объеме между точками 1 и 2, т. е. в области неоднородного поля. Подставив выражение (76) в формулу (9), получим

$$\begin{aligned} f_z &= \frac{\partial (\vec{P}_m, \vec{B})}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (P_{m_x} B_x + P_{m_y} B_y + P_{m_z} B_z) = \\ &= (P_m)_x \frac{\partial B_x}{\partial z} + (P_m)_y \frac{\partial B_y}{\partial z} + (P_m)_z \frac{\partial B_z}{\partial z}. \end{aligned} \quad (10)$$

Сила, действующая на элемент объема магнетика высотой  $d_z$  и сечением  $S$ , равна сумме сил, действующих на атомы, находящиеся в этом элементе, т. е.

$$dF_z = \sum_{i=1}^N (f_z)_i = \frac{\partial B_x}{\partial z} \sum_{i=1}^N (P_m)_{x_i} + \frac{\partial B_y}{\partial z} \sum_{i=1}^N (P_m)_{y_i} + \frac{\partial B_z}{\partial z} \sum_{i=1}^N (P_m)_{z_i}.$$

Используя формулы (1) и (2), а также зависимость между напряженностью поля и магнитной индукцией

$$H = \frac{\vec{B}}{\mu \cdot \mu_0}, \quad (12)$$

выражение  $\sum_{i=1}^N (P_m)_{x_i}$  можно записать следующим образом:

$$\sum_{i=1}^N (P_m)_{x_i} = I_x \Delta V = I_x \cdot S dz = \gamma H_x \cdot S dz = \gamma \frac{B_x}{\mu \cdot \mu_0} \cdot S dz. \quad (13)$$

Аналогично,

$$\sum_{i=1}^N (P_m)_{y_i} = \frac{\gamma}{\mu \cdot \mu_0} B_y \cdot S dz; \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^N (P_m)_{z_i} = \frac{\gamma}{\mu\mu_0} B_z \cdot S dz. \quad (15)$$

Подставляя найденные значения сумм в уравнение (11), получим

$$\begin{aligned} dF_z &= \frac{\gamma}{\mu\mu_0} S \left( \frac{\partial B_x}{\partial z} B_x dz + \frac{\partial B_y}{\partial z} B_y dz + \frac{\partial B_z}{\partial z} B_z dz \right) = \\ &= \frac{\gamma}{\mu\mu_0} \cdot S \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial (\vec{B}_1 \cdot \vec{B})}{\partial z} dz = \frac{\gamma S}{2\mu\mu_0} \cdot \frac{\partial (B^2)}{\partial z} dz. \end{aligned} \quad (16)$$

Из полученного выражения видно, что величина силы зависит от скорости изменения поля в направлении оси  $Z$ .

Предположим, что поле на участке 1—2 меняется по линейному закону, т. е.

$$B = B_0 - B_0 \frac{z}{z_0}. \quad (17)$$

Тогда, подставляя соотношение (17) в формулу (16), получим

$$dF_z = \frac{\gamma}{2\mu\mu_0} S \frac{\partial \left( B_0 - B_0 \frac{z}{z_0} \right)^2}{\partial z} dz = \frac{\gamma}{2\mu\mu_0} S \left( -\frac{E_0^2}{z_0} \right) 2 \left( 1 - \frac{z}{z_0} \right) dz \quad (18)$$

и найдем, что сила, действующая на весь объем магнетика между точками 1 и 2, будет равна

$$F_z = \int_0^{z_0} dF_z = -\frac{\gamma}{2\mu\mu_0} S \frac{B_0^2}{z_0} \int_0^{z_0} \left( 1 - \frac{z}{z_0} \right) dz = -\frac{\gamma}{2\mu\mu_0} S B_0^2. \quad (19)$$

Из полученной формулы следует, что для диамагнетиков ( $\chi < 0$ ) сила  $F_z > 0$ , т. е. образец диамагнетика будет **выталкиваться** из области сильного магнитного поля. Для парамагнетиков  $F_z < 0$ , т. е. образец парамагнетика будет втягиваться в область сильного магнитного поля.

Таким образом, измерив величину силы, действующей на образец магнетика, который помещен в магнитное поле с известным распределением индукции, можно определить магнитную восприимчивость  $\chi$  и класс магнетика.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 2 представлена схема экспериментальной установки.

Образец магнетика 3 подвешен на коромысле весов 4. Нижний конец образца находится в зазоре между полюсными наконечниками электромагнита 5. Питание катушек электромагнита производится от выпрямителя 1, который позволяет регулировать величину выходного напряжения. Ток в катушках измеряется с помощью миллиамперметра 2.

В данной работе применены демпферные аналитические весы со световым указателем. Нагрузка до 10 мг устанавливается с по-

мощью разновесок, меньше 10 мг — отсчитывается по шкале с помощью светового указателя.

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему согласно рис. 2.

2. Осторожно подвесить образец магнетика на коромысло и уравновесить весы. Записать в таблицу 1 величину начальной нагрузки —  $P_0$ .

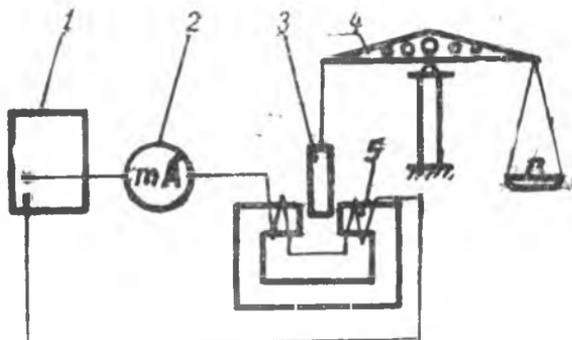


Рис. 2.

3. Включить выпрямитель и установить произвольную силу тока.

4. Уравновесить весы. Записать в таблицу 1 значение силы тока и соответствующую величину нагрузки на правой чашке весов.

5. Провести опыты при нескольких значениях силы тока (5—6 экспериментальных точек).

6. Аналогичным образом выполнить измерения для двух других образцов магнетиков.

Результаты измерения записать в таблицу 1.

Таблица

№ п/п	Материал образца	$S, \text{ м}^2$	$P_0, \text{ мг}$	$P_1, \text{ мг}$	$I, \text{ ма}$	$B_0, \text{ тл}$	z	Класс магнет.

### ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Для каждого опыта:

1. Найти величину магнитной индукции  $B_0$ , пользуясь тарировочным графиком, который приведен на панели установки.

2. Рассчитать силу, действующую на образец, по формуле

$$f = P_0 - P. \quad (20)$$

3. Определить магнитную восприимчивость по формуле

$$\chi = -\frac{2\mu_0 I}{SB_0^2}, \quad (21)$$

которая получается из выражения (19) при  $\mu \approx 1$ .

4. Определить класс магнетика.

5. Результаты вычислений записать в таблицу 1.

6. Сравнить полученные результаты с табличными данными.

#### Контрольные вопросы

1. Покажите, что индуцированный магнитный момент атома направлен в сторону, противоположную  $\vec{B}$ .

2. Объясните, почему выталкивание или втягивание магнетика наблюдается лишь в области неоднородного магнитного поля?

3. Начертите принципиальную схему экспериментальной установки, используемой в данной работе и поясните примененный метод определения магнитной восприимчивости. Какие при этом делаются допущения?

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Савельев. Курс общей физики, т. 2, §§ 48, 50, 51, 52, М., 1968.

## ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРИТОВ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

**Принадлежности:** ферритовое кольцо с обмотками; лабораторный автотрансформатор (ЛАТР); трансформатор 220-6 вольт; магазин сопротивлений; магазин емкостей; миллиамперметр переменного тока; осциллограф С1-1; реостат.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Важнейшей характеристикой ферромагнетиков является относительная магнитная проницаемость  $\mu$ . Она показывает, во сколько раз индукция магнитного поля в веществе  $B$  больше индукции магнитного поля в вакууме  $B_0$ , т. е.

$$\mu = \frac{B}{B_0} \quad (1)$$

Магнитная проницаемость ферромагнетиков является функцией индукции намагничивающего поля. Типичная зависимость  $\mu = f(B_0)$  для ферромагнетиков представлена на рис. 1. Эту функцию можно найти, если иметь кривую намагничивания, выражающую зависимость индукции магнитного поля в веществе от индукции намагничивающего поля. При построении кривой намагничивания следует учитывать явление магнитного гистерезиса.

Магнитным гистерезисом называется запаздывание измене-

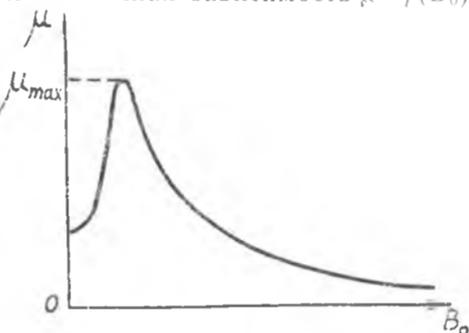


Рис. 1.

ния магнитной индукции  $B$  в ферромагнетике по отношению к изменению магнитной индукции  $B_0$  намагничивающего поля. Это явление объясняется доменной структурой ферромагнетика (см. работу № 13).

Так, если ненамагниченный ферромагнетик поместить в намагничивающее поле, индукция которого возрастает начиная с нуля,

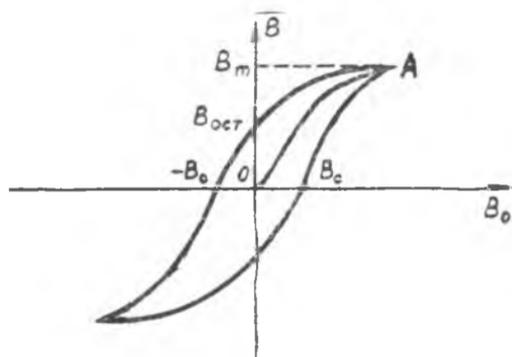


Рис. 2.

то зависимость  $B$  от  $B_0$  выразится кривой намагничивания  $OA$  (рис. 2). Дальнейшее увеличение магнитной индукции внешнего поля вызовет лишь незначительное линейное увеличение магнитной индукции в ферромагнетике. Этот рост будет в основном определяться ростом индукции намагничивающего поля.

Величина  $B_m$  называется индукцией насыщения.

При уменьшении индукции намагничивающего поля  $B_0$ , как показывает опыт, магнитная индукция  $B$  в ферромагнетике изменяется по кривой, лежащей выше кривой намагничивания  $OA$ . При  $B_0=0$  индукция магнитного поля в ферромагнетике отлична от нуля, т. е. наблюдается остаточная намагниченность  $B_{ост}$ , обусловленная тем, что после прекращения действия внешнего магнитного поля у части доменов сохраняется преимущественная ориентация их магнитных моментов.

Чтобы полностью размагнитить ферромагнетик, следует создать в нем магнитное поле противоположного направления с индукцией  $B_c$ .

Величина  $B_c$  называется коэрцитивной (задерживающей) силой. Коэрцитивная сила характеризует свойство ферромагнетика сохранять намагниченность после прекращения действия намагничивающего поля и, наряду с магнитной проницаемостью, определяет область практического применения ферромагнетика.

При дальнейшем увеличении магнитного поля  $B_0$  намагниченность ферромагнетика снова достигает насыщения  $B_m$ . Возвращаясь постепенно к индукции  $B_c$ , получим замкнутую кривую, которая называется петлей гистерезиса. Вид петли гистерезиса определяется величиной коэрцитивной силы. Материалы, дающие широкую петлю (коэрцитивная сила велика), называются «твердыми» магнитными материалами. К ним относятся, например, углеродистые стали.

Материалы с малой коэрцитивной силой называются «мягки-

ми» магнитными материалами. К ним относятся, например, чистое железо, сплавы железа с никелем.

Особое место среди ферромагнетиков занимают ферриты, нашедшие широкое применение в различных областях науки и техники.

Ферритами называют ферромагнитные химические соединения типа  $MeO \cdot Fe_2O_3$ , где  $Me$  — ион двухвалентного металла ( $Mn, Co, Ni, Mg, Zn$ ). Эти соединения после специальной термической обработки приобретают ряд ценных магнитных и электрических свойств.

Ферриты обладают очень высоким удельным сопротивлением порядка  $10^2$ — $10^4$  ом·м. Благодаря этому в них исчезающе малы потери на вихревые токи (токи Фуко), что позволяет использовать их в технике высоких и сверхвысоких частот.

Большинство изделий из ферромагнитных материалов работает в переменных магнитных полях (трансформаторы, генераторы, электродвигатели и т. д.). При этом зависимость  $B=f(B_0)$  имеет вид петли гистерезиса. Такой режим работы ферромагнетика называется динамическим.

Целью данной работы является определение магнитных характеристик  $\mu=f(B_0)$  ферритового кольца в динамическом режиме с помощью осциллографа.

**Осциллографический метод.** Осциллографический метод исследования магнитных материалов дает возможность не только измерять магнитные характеристики, но и визуально наблюдать влияние внешних воздействий (деформации, температуры, подмагничивания) на их магнитные свойства.

Изображение петли можно получить на экране электронно-лучевой трубки осциллографа, если поместить феррит в магнитное поле, создаваемое переменным током, и на горизонтально-отклоняющие пластины подать напряжение  $U_x$ , пропорциональное индукции намагничивающего поля  $B_0$ , а на вертикально-отклоняющие — напряжение  $U_y$ , пропорциональное индукции магнитного поля  $B$  в образце.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 3.

Переменный ток, проходя по первичной обмотке кольцевого феррита и сопротивлению  $R$ , создает в феррите намагничивающее поле, индукция которого равна

$$B_{0m} = \mu_0 n_1 I_{1m}, \quad (2)$$

где  $\mu$  — магнитная постоянная ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  гн/м);

$n_1$  — число витков первичной обмотки на единицу длины;

$I_{1m}$  — амплитудное значение тока в обмотке.

Падение напряжения на сопротивлении  $R$ , подаваемое на горизонтально отклоняющие пластины, будет равно

$$U_x = I_{1m} R = \frac{R}{\mu_0 n_1} B_{0m}, \quad (3)$$

т. е.  $U_x$  пропорционально  $B_{0m}$

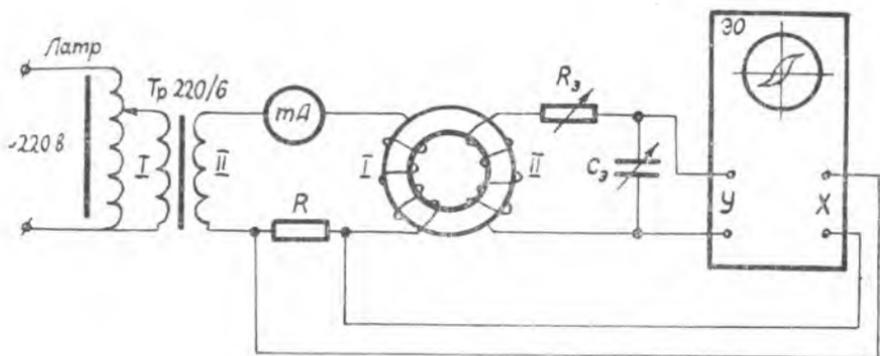


Рис. 3.

Во вторичной обмотке образца переменный магнитный поток, согласно закону Фарадея для электромагнитной индукции, наводит э. д. с. индукции

$$\varepsilon_i = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{dB}{dt} N_2 S, \quad (4)$$

где  $N_2$  — число витков вторичной обмотки;  $S$  — площадь сечения образца;  $B$  — индукция в образце.

Из уравнения (4) следует, что величина э. д. с. индукции пропорциональна только скорости изменения магнитной индукции. Для того, чтобы напряжение на вертикальном входе осциллографа было пропорциональным величине индукции магнитного поля в образце, в схему введена интегрирующая цепочка, состоящая из сопротивления  $R_3$  и емкости  $C_3$ .

Если активное сопротивление  $R_3$  будет много больше индуктивного и емкостного сопротивления цепи вторичной обмотки, то падение напряжения на конденсаторе  $C_3$ , подаваемое на вертикальный вход осциллографа, будет пропорционально индукции магнитного поля в образце.

Действительно, для цепи вторичной обмотки образца, согласно второму закону Кирхгофа, можно записать

$$\varepsilon_i = i_2 R_3 + L \frac{di_2}{dt} + U_c, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_i$  — мгновенное значение э. д. с. индукции;  $L \frac{di_2}{dt}$  — э. д. с. самоиндукции;  $i_2 R_3$  — падение напряжения на сопротивлении;  $U_c$  — падение напряжения на конденсаторе.

Если выбрать величину  $R_3$  такой, что

$$i_2 R_3 \gg L \frac{di_2}{dt} + U_c, \quad (6)$$

то

$$\varepsilon_i \approx i_2 R_3, \quad (7)$$

откуда, используя формулу (4), получаем

$$i_2 = -\frac{N_2 S}{R_3} \cdot \frac{dB}{dt}. \quad (8)$$

Напряжение на конденсаторе можно определить по формуле:

$$U_c = \frac{d}{C_3} = \frac{1}{C_3} \int i_2 dt. \quad (9)$$

Заменяя  $i_2$  выражением (8), найдем:

$$U_c = -\frac{N_2 S}{R_3 C_3} \int \frac{dB}{dt} dt = -\frac{N_2 S}{R_3 C_3} B_2. \quad (10)$$

Это напряжение подается на вертикальные пластины осциллографа.

Таким образом,  $U_y = U_c$  будет пропорционально индукции магнитного поля в образце.

Благодаря одновременному действию напряжения, пропорционального  $B_0$ , на горизонтальных пластинах, и напряжения —  $U_y$ , пропорционального  $B$ , на вертикальных пластинах электронно-лучевой трубки осциллографа, электронный луч будет описывать на экране гистерезисный цикл за один период изменения тока в первичной обмотке образца. Если увеличить с помощью автотрансформатора амплитуду переменного тока  $I_{1m}$ , то увеличится и амплитуда колебаний величины  $B_0$ . При этом на экране трубки для каждого значения  $I_{1m}$  получается определенная петля гистерезиса. Верхняя точка  $A$  каждой петли гистерезиса будет находиться на кривой намагничивания (рис. 4).

Следовательно, для построения кривой намагничивания необходимо определить координаты  $n_x$  и  $n_y$  вершин петель гистерезиса при различных значениях тока намагничивания  $I_1$ .

Соответствующие этим координатам  $B_{0m}$  и  $B_m$  вычисляются по формулам:

$$B_{0m} = \mu_0 n_1 I_{1m}$$

$$\text{и } B_m = \frac{R_3 C_3}{N_2 S} U_y.$$

Величину  $I_{1m}$  определяют по показаниям миллиамперметра, а значение  $U_y$  можно определить, зная величину напряжения  $j_y$ , вызывающего отклонение электронного луча на одно

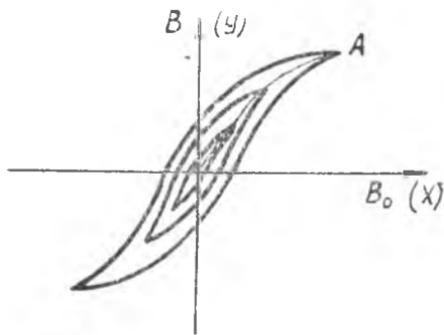


Рис. 4.

деление координатной сетки экрана трубки в направлении оси «У» при данном усилении.

Тогда  $U_y = j_y n_y$  и

$$B_m = \frac{R_3 C_3}{N_2 S} j_y n_y = K_y n_y, \quad (11)$$

где

$$K_y = \frac{R_3 C_3}{N_2 S} j_y. \quad (12)$$

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему согласно рис. 3.
2. Подготовить осциллограф к измерениям. Для этого необходимо выключить генератор развертки осциллографа и поставить ручки «Усиление X» и «Усиление У» в нулевое положение. Включить осциллограф и вывести электронный луч в центр координатной сетки.

3. Включить питание схемы.

4. С помощью автотрансформатора установить в первичной цепи максимальный ток (не более 250 *ма*). Изменяя величины  $R_3$  и  $C_3$ , «Усиление X» и «Усиление У», добиться, чтобы петля гистерезиса имела ярко выраженный участок насыщения и занимала большую часть экрана трубки.

5. Записать в таблицу 1 данные образца и значение  $j_y$ , определяемое при выбранном усилении по приложенному к осциллографу графику.

6. Уменьшая с помощью автотрансформатора величину тока в первичной цепи ступенями по 10 *ма*, снять для каждого значения тока вертикальную координату вершины петли  $n_y$ . Измерение проводить до стягивания петли в точку.

7. Результаты измерений занести в таблицы 1 и 2.

**Примечание:** Миллиамперметр измеряет эффективные значения тока, а при расчетах используются амплитудные значения, т. е.

$$I_{1m} = \frac{I_{пр}}{0,7}.$$

(величина  $j_y$  рассчитана для амплитудных значений).

Таблица 1

№ кольца	$n_1, \text{ вит/м}$	$R, \text{ ом}$	$C, \text{ ф}$	$S, \text{ м}^2$	$N_2, \text{ вит}$	$\frac{j_y}{B/\text{мм}}$	$K_y$

Таблица 2

№ измерений	$I_{пр}, \text{ а}$	$n_y, \text{ мм}$	$I_{1m}, \text{ а}$	$B_{0m}, \text{ тл}$	$B_m, \text{ тл}$	$\mu$

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Вычислить значение  $K_y$ .
2. Вычислить значения  $B_{0m}$  и  $B_m$  для каждого измерения.
3. Вычислить  $\mu = \frac{B_m}{B_{0m}}$  для каждого измерения.
4. Построить графики  $B_m = f(B_{0m})$  и  $\mu = f(B_{0m})$ .

### Контрольные вопросы

1. Как объясняется явление магнитного гистерезиса в ферромагнетике? Покажите, какой вид имеет петля гистерезиса? Какие вещества называются «мягкими» магнитными материалами?
2. Покажите, что в рабочей схеме используемой в данной работе установки величина напряжения, подаваемого на пластины  $X$  осциллографа, пропорциональна величине  $B_0$ , а напряжение, подаваемое на пластины  $Y$ , пропорционально величине  $B$  в образце.
3. Объясните функцию цепочки  $RC$  в рабочей схеме данной установки.
4. Обязательно ли исследуемому образцу придавать форму тороида?

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Яворский, А. А. Детлаф, Л. Б. Милковская. Курс физики. т. II, §§ 20. 5, 20. 6, 20. 7, изд. Высшая школа, М., 1964.

## ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШКИ ПРИ ПОМОЩИ МОСТОВОЙ СХЕМЫ

**Принадлежности:** двухсекционная катушка с неизвестной индуктивностью; эталонная катушка; два магазина сопротивлений; реохорд; осциллограф; гальванометр; нажимной ключ; перекидные ключи.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Для измерения индуктивностей катушек часто применяются мостовые схемы переменного тока. Необходимость применения переменного тока объясняется тем, что явления самоиндукции в какой-либо системе проводников могут наблюдаться лишь при изменении магнитного потока через площадь, охватываемую этими проводниками, т. е. при изменении тока. В этом случае индуктивность выступает как мера инертности по отношению к току.

Прежде чем перейти к рассмотрению работы моста, предназначенного для измерения индуктивностей, получим некоторые соотношения для цепи переменного тока, содержащей чисто омическое сопротивление и индуктивность (рис. 1).

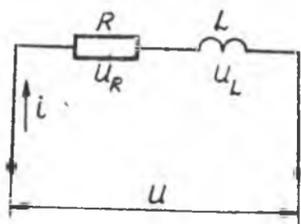


Рис. 1.

Предположим, что в рассматриваемой цепи под действием приложенного переменного напряжения установился синусоидальный ток

$$i = I_m \cdot \cos \omega t. \quad (1)$$

При этом напряжение  $U$  должно будет иметь две составляющие:  $U_L$ , уравновешивающую э. д. с. самоиндукции, и  $U_R$ , равную падению напряжения на активном сопротивлении.

Таким образом, можно записать

$$U = U_R + U_{L'} = iR + (-\varepsilon_L), \quad (2)$$

где

$$\varepsilon_L = -L \frac{di}{dt}.$$

Подставив в формулу (2) выражение для  $\varepsilon_L$ , получим

$$U = iR + L \frac{di}{dt}. \quad (3)$$

Используя уравнение (1), найдем, что

$$U = RI_m \cos \omega t - \omega LI_m \sin \omega t$$

или

$$U = RI_m \cos \omega t + \omega LI_m \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right). \quad (4)$$

Полученное соотношение показывает, что напряжение на участке цепи представляет собой сумму двух гармонических колебаний, фазы которых отличаются на  $\frac{\pi}{2}$ .

Следовательно,

$$U = U_m \cos(\omega t + \varphi), \quad (5)$$

где

$$U_m = \sqrt{(RI_m)^2 + (\omega LI_m)^2} = I_m \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (6)$$

и

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}. \quad (7)$$

Из формулы (6) видно, что величина  $\omega L$ , стоящая под корнем, имеет размерность сопротивления. Эту величину называют индуктивным сопротивлением и обозначают  $X_L$ , т. е.

$$X_L = \omega L. \quad (8)$$

Теперь формулу (6) можно написать в виде:

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + X_L^2} + I_m Z, \quad (9)$$

где

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

называется полным сопротивлением цепи, содержащей активное и индуктивное сопротивления.

При рассмотрении периодических процессов, в частности, переменного тока, удобно использовать комплексные числа. Сущность применения комплексных чисел заключается в следующем: уравнения в действительных переменных, описывающие реальные физические процессы, переводятся в уравнения с комплексными переменными. Затем, после выполнения необходимых математических операций, в комплексной области, производится обратный перевод полученных результатов в действительную область. При этом физический смысл имеет лишь вещественная часть комплексных выражений. Переход от действительных периодических

функций к комплексным показательным функциям осуществляется следующим образом: величину, изменяющуюся синусоидально, например,

$$i = I_m \cos(\omega t + \varphi), \quad (10)$$

представляют с помощью вращающегося радиуса-вектора, с которым соотносят комплексное число

$$a + jb = A(\cos \alpha + j \sin \alpha) = A e^{j\alpha}. \quad (11)$$

В частности, величине, выражаемой формулой (10), можно поставить в соответствие комплексное выражение

$$i^* = I_m \cos(\omega t + \varphi) + j I_m \sin(\omega t + \varphi) = I_m e^{j(\omega t + \varphi)}. \quad (12)$$

Пользуясь понятием комплексной величины, уравнение (4) можно представить в виде

$$U^* = R I_m e^{j\omega t} + \omega L I_m e^{j(\omega t + \frac{\pi}{2})}. \quad (13)$$

Так как

$$e^{j\frac{\pi}{2}} = \cos \frac{\pi}{2} + j \sin \frac{\pi}{2} = j,$$

то

$$U^* = R I_m e^{j\omega t} + j \omega L I_m e^{j\omega t} = I_m e^{j\omega t} (R + j \omega L) = I^* Z, \quad (14)$$

где

$$Z = R + j \omega L + R + j X_L = Z e^{j\varphi}, \quad (15)$$

а

$$\varphi = \arctg \frac{X_L}{R} \text{ и } Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}.$$

Величина  $Z$ , определяемая формулой (15), представляет собой комплексное сопротивление цепи с последовательно соединенными активным сопротивлением и индуктивностью.

Применение комплексных выражений тока, напряжения и полного сопротивления позволяет значительно упростить расчеты цепей переменного тока, поскольку при этом можно пользоваться законами Кирхгофа, законом Ома в том виде, в каком они используются для расчетов цепей постоянного тока.

Рассмотрим схему моста переменного тока, представленную на рис. 2.

Этот мост составлен из активных сопротивлений  $R_1, R_2, r_3, r_4$  и катушек индуктивности: неизвестной  $L_x$  и эталонной  $L_0$  с соответствующими внутренними сопротив-

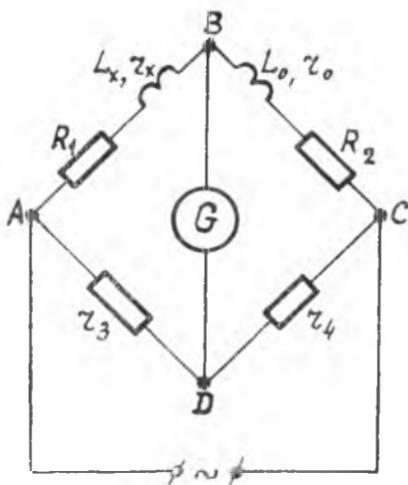


Рис. 2.

лениями  $r_x$  и  $r_0$ . В одну диагональ моста включается индикатор напряжения  $G$ , к другой подводится переменное напряжение.

Если питание данной схемы производить от источника постоянного тока, то при определенном соотношении между сопротивлениями, составляющими схему, ток в диагонали будет равен нулю. Можно показать, что это соотношение имеет вид (см. работу № 2—3)

$$\frac{R_{AB}}{R_{BC}} = \frac{R_{AD}}{R_{DC}}; \quad (16a)$$

или

$$\frac{R_1 + r_x}{R_2 + r_0} = \frac{r_3}{r_4}. \quad (16б)$$

При переменном токе соотношение (16a) остается справедливым для комплексных сопротивлений плеч моста, т. е.

$$\frac{Z_{AB}}{Z_{BC}} = \frac{Z_{AD}}{Z_{DC}}. \quad (17)$$

Здесь

$$\left. \begin{aligned} Z_{AB} &= (R_1 + r_x) + j\omega L_x \\ Z_{BC} &= (R_2 + r_0) + j\omega L_0 \\ Z_{AD} &= r_3 \\ Z_{DC} &= r_4 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Подставив выражения (18) в соотношение (17), получим

$$\frac{R_1 + r_x + j\omega L_x}{R_2 + r_0 + j\omega L_0} = \frac{r_3}{r_4}. \quad (19)$$

Это условие равновесия моста эквивалентно одновременному выполнению двух равенств:

$$\frac{R_1 + r_x}{R_2 + r_0} = \frac{r_3}{r_4} \quad (20)$$

и

$$\frac{L_x}{L_0} = \frac{r_3}{r_4}, \quad (21)$$

которые получаются из уравнения (19), если приравнять действительные и мнимые части. Следует отметить, что уравнение (20) тождественно условию равновесия моста на постоянном токе (16б).

Наличие двух условий равновесия моста переменного тока не позволяет провести непосредственное однозначное уравнивание схем, что усложняет экспериментальное определение величины неизвестной индуктивности  $L_x$ . Поэтому обычно пользуются вспомогательным уравниванием схемы на постоянном токе, сущность которого заключается в следующем.

Пусть при подключении моста к источнику переменного напряжения минимум разности потенциалов между точками  $B$  и  $D$  получится при некотором отношении плеч  $\left(\frac{r_3}{r_4}\right)_{\text{перем}}$ , а при подклю-

чении того же моста к источнику постоянного напряжения минимум разности потенциалов между точками  $B$  и  $D$  получится при отношении плеч  $\left(\frac{r_3}{r_4}\right)_{\text{пост}}$

В общем случае

$$\left(\frac{r_3}{r_4}\right)_{\text{пост}} \neq \left(\frac{r_3}{r_4}\right)_{\text{перем}} \quad (22)$$

В то же время из условий (20) и (21) следует, что для полного равновесия моста необходимо выполнение соотношения

$$\left(\frac{r_3}{r_4}\right)_{\text{пост}} = \left(\frac{r_3}{r_4}\right)_{\text{перем}} \quad (23)$$

Переход от неравенства (22) к равенству (23) осуществляется методом последовательных приближений. Если  $\left(\frac{r_3}{r_4}\right)_{\text{пост}} > \left(\frac{r_3}{r_4}\right)_{\text{перем}}$ , то для того, чтобы добиться выполнения равенства (23), необходимо увеличивать  $R_2$  при постоянном  $R_1$ ; если же  $\left(\frac{r_3}{r_4}\right)_{\text{пост}} < \left(\frac{r_3}{r_4}\right)_{\text{перем}}$ , то необходимо увеличивать  $R_1$  при постоянном  $R_2$ . Однако, вследствие изменения сопротивления  $R_2$  (или  $R_1$ ), равновесие моста на переменном токе нарушается. Поэтому нужно выполнить второй этап приближения, т. е. снова найти  $\left(\frac{r_3}{r_4}\right)_{\text{перем}}$ , затем переключить схему на постоянный ток, определить  $\left(\frac{r_3}{r_4}\right)_{\text{пост}}$ , сравнить эти величины и т. д. Обычно достаточно провести два—три приближения, чтобы добиться полного равновесия моста на переменном токе. После этого величина неизвестной индуктивности легко определяется по формуле (21).

Целью настоящей работы является изучение методики экспериментального уравнивания моста переменного тока методом последовательных приближений, а также нахождение величины неизвестной индуктивности катушки.

### ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 3 представлена схема моста переменного тока, используемого в данной работе.

На этой схеме:  $R_1$  — магазин сопротивлений;  $R_2$  — магазин сопротивлений;  $L_0$  — эталонная катушка с известной индуктивностью;  $L_x$  — гальванометр, являющийся индикатором напряжения при включении схемы на постоянный ток;  $O$  — осциллограф, являющийся индикатором напряжения при включении схемы на переменный ток;  $K_1$  — нажимной ключ для включения гальванометра;  $K_2$  — перекидной ключ для включения схемы на постоянный или переменный ток;  $K_3$  — перекидной ключ для включения в диагональ моста осциллографа или гальванометра. Конструктивно ключи  $K_2$  и  $K_3$  объединены на общей панели.

Катушка имеет две независимые секции, намотанные на общий

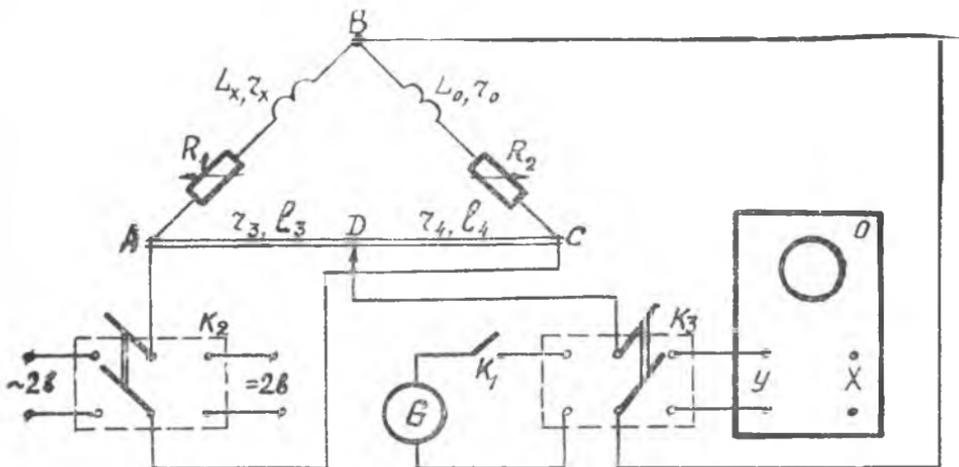


Рис. 3.

каркас. Выводы секций, соответственно начало и конец, обозначаются:  $H_1$  и  $K_1$ ,  $H_2$  и  $K_2$ .

$AD$  и  $DC$  являются участками реохорда, т. е. длинной проволоки, натянутой вдоль миллиметровой шкалы. Точка раздела участков  $D$  конструктивно выполнена в виде контактного движка.

Так как проволока реохорда калибрована, то отношение  $\frac{r_3}{r_4}$ , входящее в формулы для моста переменного тока, можно заменить отношением длин соответствующих участков  $\frac{l_3}{l_4}$ .

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему согласно рис. 3, включив первую секцию неизвестной катушки в плечо  $AB$ . Установить предварительно значения сопротивлений  $R_1 = R_2 = 3 \text{ ом}$ .

2. Включить осциллограф и, после прогрева его в течение 2–3 минут, подготовить к работе. Для этого необходимо:

а) сфокусировать луч и вывести его в центр экрана;  
 б) поставить ручку «СИНХРОНИЗАЦИЯ» в положение «ОТ СЕТИ»;

в) вывести влево ручку «УСИЛЕНИЕ X»;  
 г) установить ручку «УСИЛЕНИЕ Y» примерно в среднее положение.

3. Подключить схему к источнику переменного напряжения ключом  $K_2$ , а к диагонали моста подключить осциллограф ключом  $K_3$ .

4. Перемещая движок реохорда, добиться, чтобы вертикальная

полоска на экране имела минимальную длину. Записать полученные значения  $l_3$  и  $l_4$ .

5. Переключить схему на постоянный ток ключом  $K_2$ , а к диагонали  $ВД$  подключить гальванометр ключом  $K_3$ .

6. Перемещая движок реохорда, добиться, чтобы ток через гальванометр был равен нулю. Гальванометр в схему следует включать кратковременным нажатием на ключ  $K_1$ . Записать полученные значения  $l_3$  и  $l_4$ .

7. Расчитать  $\left(\frac{l_3}{l_4}\right)_{\text{перем}}$  и  $\left(\frac{l_3}{l_4}\right)_{\text{пост}}$ .

8. Оставляя схему под постоянным током, поставить движок реохорда в прежнее положение, т. е. соответствующее  $\left(\frac{l_3}{l_4}\right)_{\text{перем}}$  и, изменяя сопротивления магазинов  $R_1$  и  $R_2$ , привести показания гальванометра к нулю.

При этом, если  $\left(\frac{l_3}{l_4}\right)_{\text{пост}} > \left(\frac{l_3}{l_4}\right)_{\text{перем}}$ , то следует увеличивать  $R_2$  при неизменном  $R_1$ . Если  $\left(\frac{l_3}{l_4}\right)_{\text{пост}} < \left(\frac{l_3}{l_4}\right)_{\text{перем}}$ , то необходимо увеличивать  $R_1$  при неизменном  $R_2$ .

9. Переключить схему снова на переменный ток, а вместо гальванометра включить осциллограф. Перейти ко второму этапу приближения, выполняя пп. 4—8.

10. Этапы последовательного приближения должны выполняться до тех пор, пока схема не будет уравновешена и на постоянном, и на переменном токе при одном и том же положении движка на реохорде и при одном и том же значении сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ .

11. Вычислить величину индуктивности неизвестной катушки по формуле

$$L_x = L_0 \frac{l_3}{l_4}.$$

Значение  $L_0$  указано на корпусе эталонной катушки. Полная длина реохорда, т. е. величина  $l_3 + l_4$ , равна 1000 мм.

12. Результаты измерений и вычислений записать в таблицу 1.

Таблица 1

№№ приближений	Род тока (пост., перем.)	$l_3$ , мм	$l_4$ , мм	$R_1$ , ом	$R_2$ , ом	$L_0$ , 2н	$L_x$ , 2н

#### Контрольные вопросы

1. Почему катушка индуктивности представляет большое сопротивление для переменного тока и малое для постоянного?

2. Начертите принципиальную схему установки, используемой в данной работе, и поясните применяемый метод определения индуктивности катушки.

3. Как в данной работе применяется метод последовательных приближений в процессе уравнивания моста?

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. Савельев. Курс общей физики, т. 2, § 97, изд. «Наука», М., 1968.

2. Физический практикум. «Электричество и оптика», под ред. В. И. Иверовой, задача 94, изд. «Наука», М., 1968.

## СРАВНЕНИЕ РАСЧЕТНОГО И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЙ ПЕРИОДА РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С НЕОНОВОЙ ЛАМПОЙ

**Принадлежности:** неоновая лампа ТН-0,3 или ТН-0,2; набор сопротивлений; конденсатор; вольтметр на 150 в; источник постоянного напряжения; секундомер.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В настоящей работе исследуются релаксационные колебания, которые возбуждаются в электрической цепи с неоновой лампой тлеющего разряда. Электрические релаксационные колебания широко применяются в измерительной аппаратуре, автоматике, телеуправлении и других областях техники.

Неоновая лампа тлеющего разряда представляет собой стеклянный баллон, внутри которого укреплены два холодных электрода в виде пластин или проволочек различной конфигурации, отстоящих друг от друга на несколько миллиметров. Баллон заполнен неоном под давлением 5—20 тор.

Если неоновую лампу включить в электрическую цепь и постепенно увеличивать напряжение между электродами, начиная с нуля, то сначала в ней возникнет и возрастет до насыщения очень слабый, порядка  $10^{-9}$  а, тихий несамостоятельный разряд. Возникновение такого разряда обусловлено наличием только тех носителей заряда, которые возникают в межэлектродном промежутке в незначительном количестве под действием космических лучей, радиоактивного излучения, случайных, очень редких актов ударной ионизации и т. д.

При несамостоятельном тихом разряде скорость электронов мала, поэтому в межэлектродном пространстве преобладают упругие столкновения их с нейтральными атомами газа. Случай

возбуждения атомов, их ионизации или рекомбинации ионов с электронами оказываются настолько редкими, что свечение газа при таком разряде не наблюдается. Однако по мере повышения напряжения скорость электронов возрастает и при некотором его значении  $U = U_{\text{заж}}$  достигает такой величины, что становятся очень частыми неупругие столкновения, в результате которых нейтральные атомы газа ионизируются, т. е. расщепляются на положительные ионы и электроны. Появляющиеся при этом свободные электроны ускоряются электрическим полем и в свою очередь ионизируют атомы газа. Начинается лавинообразный процесс ударной ионизации газа, в результате которого в межэлектродном промежутке резко возрастает число носителей заряда. Положительные ионы, ускоренные электрическим полем, попадают в большом количестве на катод, что приводит к эмиссии электронов с его поверхности, т. е. к еще большему возрастанию числа носителей заряда. Все это означает возникновение самостоятельного разряда, лампа «зажигается».

При подходящих значениях параметров цепи, в ней устанавливается тлеющий разряд, напряжение горения которого оказывается несколько ниже величины  $U_{\text{заж}}$ . Этот разряд сопровождается довольно ярким характерным свечением газа.

Если теперь уменьшать приложенное к лампе напряжение, то при некоторой его величине  $U_n$ , называемой напряжением погасания, разряд прекратится («погаснет»). Напряжение погасания немного ниже напряжения горения по той причине, что во время тлеющего разряда газ находится в состоянии значительной ионизации.

Напряжение зажигания неоновых ламп ТН-02 и ТН-03 80—100 вольт, разрядный ток в них достигает нескольких миллиампер.

Используемая в данной работе схема электрической цепи для получения релаксационных колебаний приведена на рис. 1.

Напряжение  $U$  устанавливается заведомо больше  $U_{\text{заж}}$ . Воз-

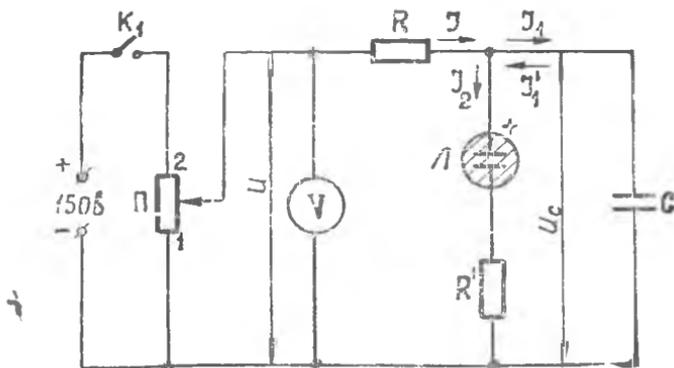


Рис. 1.

пикающий после замыкания ключа  $K_1$  ток  $I$  разветвляется на  $I_1$  и  $I_2$ , так что  $I = I_1 + I_2$ . При этом напряжение  $U_c$  на конденсаторе и на электродах лампы постепенно повышается от 0 до  $U_{зая}$ , а ток  $I$  соответственно убывает. Проводимость лампы до момента ее зажигания практически равна нулю. Учитывая это обстоятельство и то, что электроемкость лампы много меньше емкости конденсатора  $C$ , можно положить  $I_1 \approx I$ , т. е. пренебречь величиной

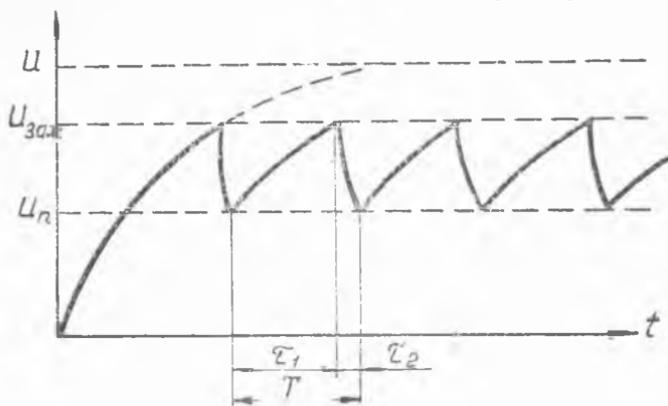


Рис. 2.

$I_2$ , и считать, что до момента зажигания лампы весь ток  $I$  идет на зарядку конденсатора. В таком случае можно записать

$$U = IR + U_c. \quad (1)$$

Как только напряжение  $U_c$  достигает величины  $U_{зая}$ , лампа зажигается, сопротивление ее резко падает, ток  $I_2$  скачком возрастает, а напряжение на электродах лампы падает, конденсатор за очень малое время  $\tau_2$  разряжается до напряжения погасания лампы  $U_n$ . Напряжение  $U_n$  в данном случае складывается из разности потенциалов на электродах лампы и относительно небольшого падения напряжения на сопротивлении  $R'$ . В этот момент, если соблюдается условие  $U < U_n + I_n R$ , разряд в лампе прекращается и снова начинается зарядка конденсатора, но уже не от нуля, а от  $U_c = U_n$  (рис. 2).  $I_n$  — ток, протекающий через лампу в момент, непосредственно перед ее погасанием.

Когда напряжение  $U_c$  достигнет значения  $U_{зая}$ , лампа вновь зажжется, конденсатор разрядится через нее до потенциала  $U_n$  и опять начнет заряжаться.

Таким образом, в цепи устанавливается периодический процесс, называемый релаксационными электрическими колебаниями. Период  $T$  этих колебаний складывается из времени  $\tau_1$  зарядки конденсатора между двумя последовательными вспышками лампы и времени  $\tau_2$  разрядки его, когда лампа горит:

$$T = \tau_1 + \tau_2. \quad (2)$$

Время  $\tau_1$  нетрудно определить теоретически на основании соотношения (1). Действительно, по определению

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad dq = CdU.$$

Подставляя эти выражения в (1), имеем

$$U = CR \frac{dU_c}{dt} + U_c. \quad (3)$$

Здесь  $U$  — напряжение питания цепи, оно поддерживается постоянным.

Разделим переменные

$$RC \frac{d(U - U_c)}{U - U_c} = dt.$$

Теперь, проинтегрировав это выражение в пределах от  $U_n$  до  $U_{з.ж.}$ , получаем:

$$\tau_1 = RC \ln \frac{U - U_n}{U - U_{з.ж.}}. \quad (4)$$

Значительно труднее определить время горения  $\tau_2$ . После зажигания лампы распределение тока в цепи и его зависимость от времени становятся более сложными. Теперь конденсатор уже не заряжается, а разряжается. Его разрядный ток  $I_1'$  протекает полностью через лампу и равен

$$\frac{dq}{dt} = -C \frac{dU_c}{dt},$$

а ток  $I_2$  оказывается больше тока  $I_1$ :

$$I_2 = I_1 + I_1'. \quad (5)$$

Если предположить, что во время разрядки конденсатора в электрической цепи течет квазистационарный ток, то можно записать:

$$\begin{aligned} U &= IR + U_c; \\ U_c &= U_2 + I_2 R', \end{aligned} \quad (6)$$

где  $U_2$  — напряжение горения лампы, а  $R'$  — ограничительное сопротивление, обычно включаемое последовательно с лампой для ее защиты от разрушения в случае возникновения дугового разряда. В нашей цепи  $R' \ll R$ . Делая подстановку

$$I = I_2 - I_1' = I_2 + C \frac{dU_c}{dt}$$

и учитывая, что

$$I_2 = \frac{U_c - U_2}{R'},$$

получаем:

$$U = (U_c - U_2) \frac{R}{R'} + U_c + CR \frac{dU_c}{dt}. \quad (7)$$

Если бы было известно, как изменяется напряжение горения лампы  $U_2$  во времени или как оно связано с величиной  $U_c$ , то

интегрируя уравнение (7) в пределах от  $U_c = U_{\text{зж}}$  до  $U_c = U_n$ , можно было бы получить теоретически выражение для  $\tau_2$ . Однако нам эта зависимость не известна. От момента зажигания до момента погасания величина  $U_2$  падает неравномерно, скачкообразно, причем большую роль играют условия развития разряда и деионизации газа: форма и расположение электродов, свойства материалов, из которого они сделаны, природа газа, его температура и давление, соотношение величин  $U$ ,  $R$ ,  $R'$  и  $C$ . Как показывает осциллографическое исследование изучаемых в данной работе колебаний, основную часть времени  $\tau_2$  при  $R \ll R'$  и  $U \ll U_n + I_n R$  составляет время деионизации газа в лампе.

Для приближенного вычисления времени  $\tau_2$  в электрической цепи с лампой ТН-02 или ТН-03 можно воспользоваться полуэмпирической формулой

$$\tau_2 = KCR \left(1 - \frac{U_n}{U_{\text{зж}}}\right) \left(1 + \frac{R'}{R - R'}\right) \ln \frac{U + U_{\text{зж}} - U_n}{U + U_n - U_{\text{зж}}}. \quad (8)$$

Если  $R' \ll R$ , то можно положить  $\left(1 + \frac{R'}{R - R'}\right) \approx 1$  и, введя обозначение  $U_{\text{зж}} - U_n = \Delta U_2$ , написать уравнение (8) в таком виде:

$$\tau_2 = KRC \left(1 - \frac{U_n}{U_{\text{зж}}}\right) \ln \frac{U + \Delta U_2}{U - \Delta U_2}. \quad (9)$$

Этой формулой мы будем пользоваться, полагая в ней коэффициент  $K = 1$  для лампы ТН-02 (с плоским катодом) и  $K = 3$  для лампы ТН-03 (с цилиндрическим катодом).

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с приборами и собрать экспериментальную установку согласно схеме, приведенной на рис. 3.

В качестве потенциометра  $\Pi$  включается обычный реостат сопротивлением 5—10 ком. Безиндукционное сопротивление  $R'$  смонтировано на одной колодке вместе с неоновой лампой  $L$ . Для измерения величин  $U$ ,  $U_{\text{зж}}$ ,  $U_n$  применяется вольтметр класса 0,5 на 150 в.

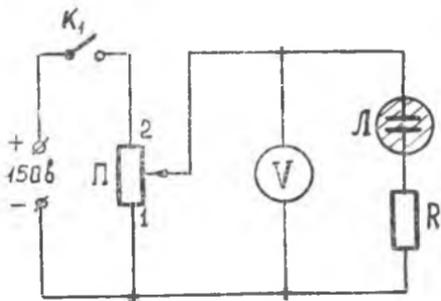


Рис. 3.

После сборки схемы установить движок потенциометра в положение 1.

2. Определить напряжение зажигания  $U_{\text{зж}}$  и напряжение погасания  $U_n$  лампы. Для этого включить с помощью ключа  $K_1$  источник питания и, плавно передвигая движок потенциометра, увеличивать напряжение на электродах лампы до ее зажигания.

При этом нужно внимательно следить за перемещением стрелки вольтметра и одновременно за лампой так, чтобы по возможности точно определить напряжение зажигания. После зажигания напряжение на электродах лампы скачком падает до напряжения горения. Разрядный ток при этом, также скачком, возрастает. Движок потенциометра нужно перемещать в сторону увеличения напряжения только до момента зажигания. Дальнейшее его перемещение в том же направлении приведет к чрезмерному увеличению разрядного тока, что в свою очередь повлечет перегревание лампы и ухудшение результатов эксперимента.

После определения потенциала зажигания нужно, плавно перемещая движок потенциометра в сторону уменьшения напряжения, определить напряжение погасания. Повторить измерения пять раз, найти средние значения величин  $U_{\text{заж}}$  и  $U_{\text{п}}$  и внести их в таблицу измерений. После измерения  $U_{\text{заж}}$  и  $U_{\text{п}}$  источник питания выключить, движок потенциометра поставить в положение I.

3. Определить период релаксационных колебаний в цепи с  $R_1$  и  $C_1$ . Для этого собрать установку по схеме, приведенной на рис. 1, включить с помощью ключа  $K_1$  источник питания и, перемещая движок потенциометра, установить напряжение питания на 2—5 вольт выше напряжения зажигания. Лампочка при этом начнет периодически зажигаться и погасать. Теперь можно с помощью секундомера определить время  $t$  двадцати колебаний и вычислить значение периода колебаний  $T_{\text{эксп}} = \frac{t}{20}$ .

Провести аналогичные измерения еще три раза, увеличивая

Таблица 1

	$C_1 =$						$C_2 =$						
	$R$	$U$	$T_{\text{эксп}}$	$T_{\text{теор}}$	$\Delta T$	$\tau_1$	$\tau_2$	$U$	$T_{\text{эксп}}$	$T_{\text{теор}}$	$\Delta T$	$\tau_1$	$\tau_2$
$U_{\text{заж}} = U_{\text{п}}$	$R_1 =$												
							$R_2 =$						

каждый раз напряжение питания на 10 вольт, и все полученные таким образом четыре значения  $T_1$  занести в таблицу.

Повторить опыт при других значениях  $R$  и  $C$ , комбинируя их попарно так, чтобы получились следующие сочетания:  $R_1C_1$ ,  $R_1C_2$ ,  $R_2C_1$ ,  $R_2C_2$ . Напряжения питания брать те же самые, что и в первом опыте. Таким образом, всего получится 16 различных значений  $T_{\text{дисп}}$ . Для всех этих случаев нужно вычислить значения  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  и  $T_{\text{теор}}$ . Полученные результаты позволят сделать заключение о соответствии теории эксперименту.

### Контрольные вопросы

1. Объясните механизм возникновения электрического тока в лампе тлеющего разряда.

2. Выведите формулу для определения времени зарядки конденсатора.

3. Объясните механизм возникновения релаксационных колебаний в электрической цепи с неоновой лампой. Представьте графически изменение напряжения на электродах лампы при наличии релаксационных колебаний.

### ЛИТЕРАТУРА

1. С. Г. Калашников. Электричество, § 244, изд. «Наука» 1964.
2. Физический практикум, под редакцией В. И. Ивероновой, т. 2, Москва, 1957.
3. А. В. Кортнев, Ю. В. Рублев, А. Н. Куценко. Практикум по физике, раб. № 53, «Высшая школа», 1963.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

**Принадлежности:** электронный осциллограф; набор конденсаторов и катушек индуктивности, укрепленных на панели; магазин сопротивлений; генератор импульсов.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

Во многих разделах физики и отраслях техники нам приходится встречаться с колебательными процессами. Но если даже физическая сущность наблюдаемых колебательных процессов совершенно различна (например, колебания крыла самолета, колебания тока в электрическом контуре, качка корабля на море и пр.), то детальный анализ этих процессов показывает, что основные законы колебаний во всех случаях одинаковы. Такая универсальность законов колебаний позволяет при исследовании одних процессов пользоваться выводами, полученными при исследовании других колебательных процессов, а также изучать, например, механические колебания на электрической модели. Электрические модели, как правило, являются простыми в изготовлении, а электрическая аппаратура позволяет получить не только количественные результаты, но и визуально наблюдать с помощью осциллографа развертку колебательного процесса во времени.

В данной работе рассматриваются электрические затухающие колебания в колебательном контуре.

Колебательный контур состоит из конденсатора  $C$ , катушки индуктивности  $L$  и активного сопротивления  $R$ .

Рассмотрим процессы, происходящие в схеме, которая показана на рис. 1.

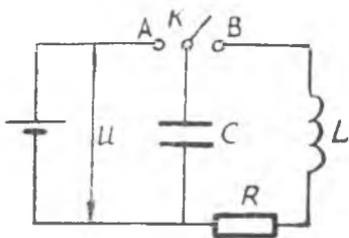


Рис. 1.

Если переключатель  $K$  поставить в положение  $A$ , то конденсатор будет заряжаться. Энергию заряженного конденсатора можно выразить через его емкость  $C$  и напряжение на обкладках  $U$ :  $W_c = \frac{CU^2}{2}$  (1) или через напряженность электрического поля:

$$W_c = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2}{2} \cdot V, \quad (2)$$

где  $V$  — объем, занимаемый электрическим полем между обкладками конденсатора;  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками конденсатора;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная.

Если затем поставить переключатель  $K$  в положение  $B$ , то конденсатор начнет разряжаться через индуктивность  $L$  и сопротивление  $R$ . В цепи появится электрический ток. Энергия, первоначально запасенная в конденсаторе, будет переходить в энергию магнитного поля катушки, причем часть энергии будет расходоваться на нагревание сопротивления  $R$  (джоулево тепло).

Энергия магнитного поля катушки, по виткам которой течет ток  $I$ , равна:

$$W_L = \frac{LI^2}{2} \quad \text{или} \quad W_L = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2} \cdot V, \quad (3)$$

где  $V$  — объем, занимаемый катушкой;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость;  $\mu_0$  — магнитная постоянная.

Когда конденсатор полностью разрядится, ток в контуре достигнет максимального значения. Соответственно этому энергия магнитного поля катушки будет максимальной. В дальнейшем сила тока начнет уменьшаться, что приведет к уменьшению энергии магнитного поля. При этом за счет увеличения зарядов на обкладках конденсатора будет расти энергия электрического поля. Когда ток будет равен нулю, энергия магнитного поля также будет равна нулю, а энергия электрического поля достигнет максимального значения. После этого описанный процесс будет протекать в обратном направлении.

Таким образом, в предоставленном самому себе контуре  $LCR$  будет происходить периодический обмен энергией между конденсатором  $C$  и катушкой  $L$  до тех пор, пока первоначально запасенная в конденсаторе энергия не перейдет в джоулево тепло. Этот процесс называется колебательным разрядом конденсатора.

Для получения уравнения, описывающего колебательный разряд, применим к контуру  $LCR$  второй закон Кирхгофа

$$U + \left(-L \frac{di}{dt}\right) = iR, \quad (4)$$

где  $i$  — мгновенное значение силы тока;  $L$  — индуктивность катушки;  $-L \frac{di}{dt}$  — э. д. с. самоиндукции.

Воспользуемся соотношениями:  $U = \frac{q}{c}$  и  $i = -\frac{dq}{dt}$ . В последнем соотношении знак минус введен потому, что положительному направлению тока соответствует убывание положительного заряда обкладки конденсатора. Тогда уравнение (4) можно будет записать в следующем виде:

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = 0. \quad (5)$$

По своей форме уравнение (5) аналогично знакомому из механики уравнению свободных затухающих колебаний груза, подвешенного на пружине:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = 0.$$

Аналогами массы  $m$ , коэффициента трения  $r$  и коэффициента упругости пружины  $K$  являются соответственно индуктивность  $L$ , сопротивление  $R$  и величина  $\frac{1}{C}$ , обратная емкости.

Если разделить уравнение (5) почленно на  $L$  и ввести обозначения:

$$\beta = \frac{R}{2L} \quad \text{и} \quad \omega_0^2 = \frac{1}{LC},$$

то получим:

$$\frac{d^2q}{dt^2} + 2\beta \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0. \quad (6)$$

Легко показать, что точно такой же вид имеют уравнения для напряжения на обкладках конденсатора  $U$  и тока в контуре  $i$ .

Уравнениями вида (6) описывается обширный класс колебательных систем как электрических, так и механических.

Рассмотрим коэффициенты уравнения (6). Величина  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  называется **собственной частотой** контура.

Для периода собственных колебаний получаем следующее соотношение:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{LC}. \quad (7)$$

Формула (7) называется формулой Томсона.

Величина  $\beta$  в уравнении (6) называется коэффициентом затухания:

$$\beta = \frac{R}{2L}, \quad \text{сек}^{-1}. \quad (8)$$

Найдем решение уравнения (6) с использованием подстановки

$$q = e^{-\beta t} \cdot f(t), \quad (9)$$

где  $f(t)$  — некоторая функция от  $t$ .

Подстановка выражения (9) в уравнение (6) позволяет получить после несложных преобразований следующее дифференциальное уравнение для  $f(t)$ :

$$\frac{d^2 f(t)}{dt^2} + (\omega_0^2 - \beta^2) f(t) = 0. \quad (10)$$

В зависимости от соотношения между  $\omega_0$  и  $\beta$  функция  $f(t)$ , являющаяся решением уравнения (10), будет иметь различный вид.

Разберем три случая:

1.  $\omega_0 > \beta$

Обозначим  $\omega_0^2 - \beta^2 = \omega^2$ . Тогда из уравнения (10) для значения  $f(t)$  получаем выражение

$$f(t) = a_0 \sin(\omega t + \alpha).$$

Подставляя найденное значение функции  $f(t)$  в формулу (9), получим искомое решение в виде

$$q = a_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \alpha). \quad (11)$$

Используя это соотношение, находим закон изменения напряжения на конденсаторе

$$U = \frac{q}{C} = \frac{a_0}{C} e^{-\beta t} \sin(\omega t + \alpha) = U_0 e^{-\beta t} \sin(\omega t + \alpha), \quad (12)$$

где  $U_0$  и  $\alpha$  — постоянные величины для данного контура, определяемые из начальных условий.

Решение (12) определяет затухающее колебание, т. к. амплитуда колебания  $U_0 e^{-\beta t}$  экспоненциально убывает со временем.

Величина  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$  выражает собой частоту затухающих колебаний. Период затухающих колебаний определяется, соответственно, как

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \quad (13)$$

Если  $\omega_0 \gg \beta$  (сопротивление контура незначительно), то период затухающих колебаний будет стремиться к значению периода собственных колебаний, определяемого формулой Томсона.

График затухающих колебаний, соответствующий уравнению (12), приведен на рис. 2.

Для характеристики затухания часто пользуются не величиной  $\beta$ , а безразмерной величиной  $\delta$

$$\delta = \beta T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (14)$$

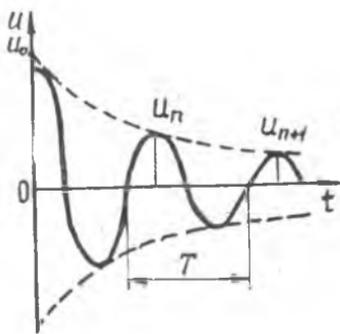
называемой логарифмическим декрементом затухания.

Логарифмический декремент характеризует убывание амплитуды колебаний.

Действительно, пусть в момент времени  $t$  амплитуда  $n$ -го колебания имеет величину  $U_n = U_0 e^{-\beta t}$ . Тогда для  $(n+1)$ -ого колебания она будет равна  $U_{n+1} = U_0 e^{-\beta(t+T)}$ . Отношение двух последующих амплитуд одного знака (рис. 2) равно:

$$\frac{U_n}{U_{n+1}} = e^{\beta T}.$$

Рис. 2.



Логарифмируя полученное выражение, найдем

$$\ln \frac{U_n}{U_{n+1}} = \beta T = \delta. \quad (15)$$

Соотношение (15) можно считать как определение логарифмического декремента.

Легко видеть, что если за  $n$  колебаний амплитуда уменьшится в  $e$  раз, то

$$\delta = \frac{1}{n}. \quad (16)$$

Таким образом,  $\delta$  определяет число колебаний, за время которых амплитуда колебаний уменьшается в  $e$  раз, а величина  $\beta$  определяет время затухания, т. е. время, по истечении которого амплитуда колебаний уменьшается в  $e$  раз.

Если нам известно, что за некоторый промежуток времени амплитуда затухающего колебания уменьшилась от  $A_0$  до  $A_n$ , то число колебаний  $n$ , которое совершила система за это время, можно определить по формуле

$$n = \frac{\ln \left( \frac{A_0}{A_n} \right)}{\delta}. \quad (17)$$

Приведем ориентировочные значения логарифмического декремента для некоторых систем:

- А) Акустические колебательные системы — 0,1.
- Б) Электрические контуры — 0,02—0,05.
- В) Камертон — 0,001.
- Г) Кварцевая пластинка — 0,001—0,00001.

Логарифмический декремент можно выразить также через параметры контура  $L$ ,  $C$ ,  $R$

$$\delta = \beta T = \frac{R}{2L} \cdot 2\pi \sqrt{LC} = \pi R \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (18)$$

### 2. $\omega_0 = \beta$

Анализируя формулу (13) для периода затухающих колебаний, видим, что при  $\omega_0 = \beta$  знаменатель выражения (13) равен нулю, а период колебаний обращается в бесконечность, т. е. разряд перестает быть периодическим. Значение коэффициента затухания  $\beta$ , равного  $\omega_0$  называется критическим. Величина сопротивления  $R_{кр}$ , при котором осуществляется критический режим, называется критическим сопротивлением.

Из условия  $\beta_{кр} = \omega_0$  следует, что

$$R_{кр} = 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (19)$$

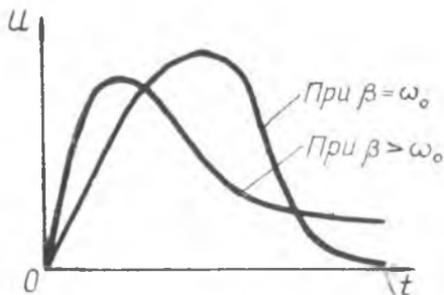


Рис. 3.

### 3. $\omega_0 < \beta$ .

При  $\omega_0^2 - \beta^2 < 0$ , как показывает математический анализ, разряд конденсатора имеет аperiodический характер. Графики критического и аperiodического процессов разряда приведены на рис. 3.

Таким образом, при  $\omega_0 > \beta$  в системе происходит колебательный процесс; при  $\omega_0 < \beta$  в системе наблюдается аperiodический процесс. Критический режим, когда  $\omega_0 = \beta$ , соответствует переходу от колебательного процесса к аperiodическому.

Целью данной работы является определение основных параметров колебательного процесса в контуре и изучение режимов его работы.

## ОПИСАНИЕ СХЕМЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Блок-схема измерительной установки представлена на рис. 4. Генератор импульсов вырабатывает положительные импульсы

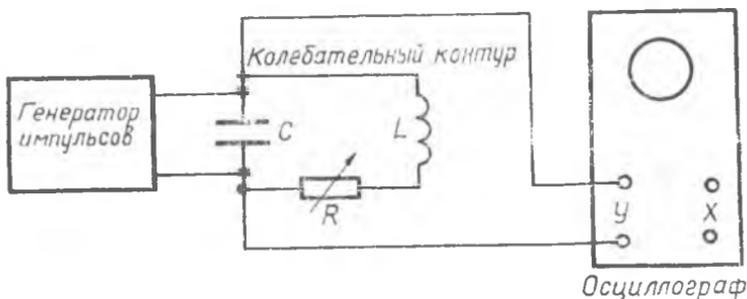


Рис. 4.

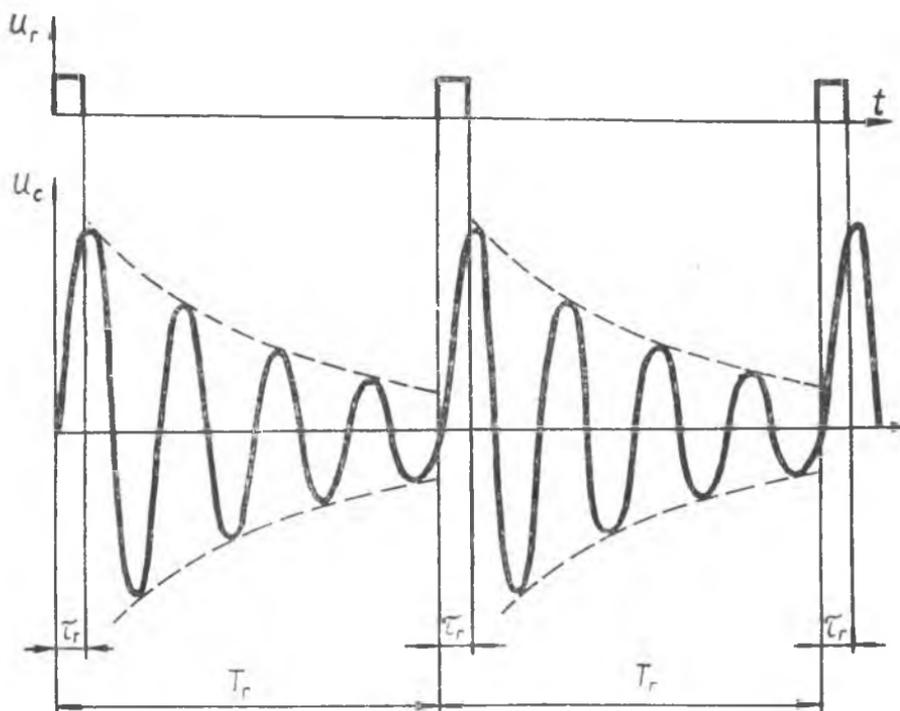


Рис. 5.

напряжения длительностью  $\tau_r$  с периодом следования  $T_r$ , которые поступают на конденсатор колебательного контура.

В течение времени  $\tau_r$  конденсатор заряжается. В течение паузы между импульсами в контуре происходит колебательный разряд, описываемый уравнением (12). В момент поступления следующего импульса конденсатор опять заряжается, и колебательный процесс повторяется (рис. 5).

Меняя соотношение между параметрами контура  $L$ ,  $C$ ,  $R$ , можно получить как затухающие, так и апериодические процессы.

Напряжение с обкладок конденсатора подается на вертикально отклоняющие пластины осциллографа.

### Упражнение 1. Определение периода затухающих колебаний контура и логарифмического декремента затухания

#### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ УПРАЖНЕНИЯ

1. Собрать схему согласно рис. 4, взяв  $C$  и  $L$  из набора, имеющегося на установке.

2. Вывести до нуля значение сопротивления  $R$  на магазине сопротивлений.

3. Подготовить осциллограф к работе. Для этого необходимо:
- включить питание осциллографа и после его прогрева вывести луч в центр координатной сетки;
  - поставить ручку «Синхронизация» в положение «Внутрь»;
  - включить генератор развертки ручкой «Диапазон частот» и предварительно установить ее на частоту 1 кГц.

4. Включить генератор импульсов. После появления на экране осциллограммы колебательного процесса следует подобрать усиление по вертикали и горизонтали так, чтобы вся картина колебания полностью разместилась в пределах экрана. Если наблюдаемая картина перемещается по экрану, то ее нужно остановить с помощью ручек «Амплитуда синхронизации» и «Частота плавно».

5. Определить по картине затухающего колебания число полных периодов колебаний контура  $N$ , которые укладываются в одном периоде колебаний задающего генератора  $T_{\Gamma}$ .

Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1

№ п/п	$L, \text{ гн}$	$C, \text{ ф}$	$T_{\Gamma}, \text{ сек}$	$N$	$T, \text{ сек}$	$T_{\text{расч}}, \text{ сек}$

6. Измерить величину амплитуд одного знака для каждого колебания —  $A_1, A_2, A_3$  и т. д.

Результаты измерений записать в таблицу 2.

Таблица 2

№ п/п	$A_1, \text{ мм}$	$A_2, \text{ мм}$	$A_3, \text{ мм}$	...	$A_n, \text{ мм}$	$\delta$

### ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. По данным таблицы 1 определить период колебаний  $T = \frac{T_{\Gamma}}{N}$ . Значение  $T_{\Gamma}$  приведено на панели установки.

2. Рассчитать период колебаний  $T_{\text{расч}}$  по формуле Томсона (7). Результаты расчетов и экспериментов записать в таблицу 1.

3. Найти логарифмический декремент затухания по формуле (15) или (17) с использованием любой пары амплитуд из таблицы 2. Расчеты нужно провести для нескольких пар амплитуд, после чего следует найти среднее значение  $\delta$ .

4. Рассчитать логарифмический декремент по формуле (18).

Необходимое для расчетов сопротивление катушки индуктивности приведено на панели установки. Результаты расчетов и экспериментов записать в таблицу 2.

5. Аналогичные расчеты следует провести для всех значений индуктивности и емкости, используемых в данном упражнении.

## Упражнение 2. Исследование аperiodического режима работы контура

1. Установить на экране осциллограмму одного из трех случаев, рассмотренных в упражнении 1.

2. Постепенно увеличивая сопротивление  $R$  магазина сопротивлений, наблюдать за переходом колебательного процесса в аperiodический. Найти критическое сопротивление  $R_{кр}$ , при котором разряд становится аperiodическим. Сравнить полученное выражение с вычисленным по формуле (19).

### Контрольные вопросы

1. Каков физический смысл коэффициента затухания  $\beta$ ?
2. Напишите дифференциальное уравнение колебательного процесса в контуре  $CR$  и рассмотрите его решения.
3. Дайте определение логарифмического декремента и поясните его физический смысл.
4. Начертите электрическую схему используемой в данной работе установки и объясните ее.

### ЛИТЕРАТУРА

1. И. В. Савельев. Курс общей физики, т. 2, § 99, 100, изд. «Наука», М., 1968.

## ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЛАМПОВОГО УСИЛИТЕЛЯ

**Принадлежности:** одноламповый усилитель на резисторах; звуковой генератор; электронный осциллограф.

### КРАТКАЯ ТЕОРИЯ

В различных областях науки и техники, например, в радиосвязи, телевидении, радиолокации, в вычислительной технике, часто используются весьма малые по величине (до  $10^{-12}$  в) сигналы. Чтобы регистрировать такие сигналы, их необходимо предварительно усилить. Эту задачу выполняют устройства, называемые усилителями.

Рассмотрим схему процесса усиления (рис. 1).

В качестве источника энергии используются выпрямители или батареи. Нагрузкой могут быть электроизмерительные приборы, осциллографы, электромеханические устройства (реле, электродвигатели, динамики и пр.). Энергия, передаваемая от источника к нагрузке, поступает в усилитель, где происходит управление потоком этой энергии внешним усиливаемым сигналом. Между параметрами усиленного сигнала существует функциональная связь, определяемая схемой усилителя. Про-

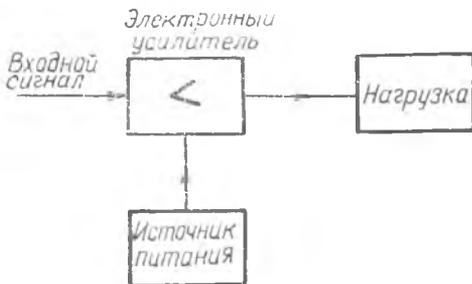


Рис. 1.

Про-

стейшим видом такой связи, имеющим наибольший практический интерес, является пропорциональная зависимость  $P = KP$ , где  $P$  — параметр входного сигнала (сила тока, напряжение, мощность сигнала);  $P$  — соответствующий параметр усиленного сигнала;  $K$  — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом усиления.

Важнейшими характеристиками усилителя являются: диапазон усиливаемых частот, коэффициент усиления, выходная мощность, номинальное входное напряжение (чувствительность), коэффициенты искажения. В зависимости от диапазона усиливаемых частот различают несколько типов усилителей:

1. Усилители низкой частоты. Диапазон усиливаемых частот составляет 10—20000 *гц*.

2. Усилители высокой частоты. Предназначены для усиления сигналов, частоты которых достигают  $10^{10}$  *гц*, но в сравнительно узком частотном диапазоне.

3. Широкополосные усилители.

4. Усилители постоянного тока.

**Принципиальная схема усилителя.** Известно, что работа электронной лампы характеризуется следующими основными параметрами (см. работу № 14):

$S = \left( \frac{\partial I_a}{\partial U_c} \right)_{U_a = \text{const}}$  — статическая крутизна сеточной характеристики лампы;

$R_l = \left( \frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right)_{U_c = \text{const}}$  — внутреннее сопротивление лампы;

$\mu = - \left( \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} \right)_{I_a = \text{const}}$  — статический коэффициент усиления лампы.

Электронная лампа является основным элементом, обеспечивающим усиление электрических колебаний. Рассмотрим принципиальную схему однолампового усилителя напряжения на резисторах, изображенную на рис. 2.

К участку «сетка-катод» подводится два напряжения: переменное напряжение  $U_{вх}$ , подлежащее усилению, и постоянное отрицательное напряжение смещения, создаваемое батареей  $E_{см}$ . В анодную цепь лампы включен резистор  $R_a$ , позволяющий выделить усиленные колебания, и источник постоянного напряжения  $E_a$ , создающий анодное напряжение. Анодный ток, изменяющийся в соответствии с входным сигналом, создает на резисторе  $R_a$  переменное напряжение  $U_{вых}$ , превышающее по величине входное напряжение, подводимое к катоду и сетке лампы. В этом состоит эффект усиления.

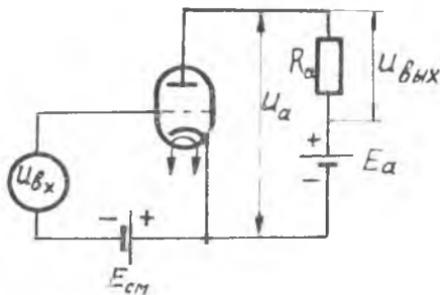


Рис. 2.

**Характеристики усилителя.** Основным параметром, характеризующим работу усилителя, является динамический коэффициент усиления  $K$

$$K = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}} \quad (1)$$

В этом выражении

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = R_a \Delta I_a \quad \text{и} \quad \Delta U_{\text{ВХ}} = \Delta U_c.$$

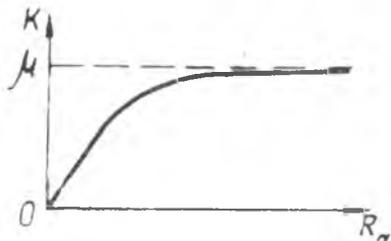


Рис. 3.

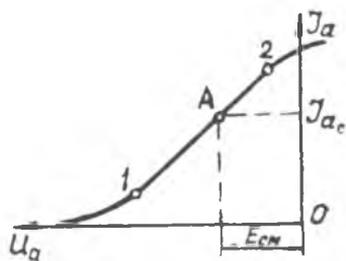


Рис. 4.

Поэтому

$$K = \frac{R_a \Delta I_a}{\Delta U_c} = R_a S_{\partial} = \frac{\mu}{\frac{R_i}{R_a} + 1}, \quad (2)$$

так как  $\frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} = S_{\partial}$  — есть динамическая крутизна характеристики, равная  $\frac{\mu}{\frac{R_i}{R_a} + 1}$ .

Зависимость коэффициента усиления от сопротивления резистора  $R_a$  приведена на рис. 3.

Итак, динамический коэффициент усиления  $K$  всегда меньше статического  $\mu$ , если  $R_a \neq 0$ , и увеличивается с увеличением сопротивления резистора анодной нагрузки.

**Амплитудные искажения усиленного сигнала.** Выходное напряжение  $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$  можно выразить (учитывая соотношения 1, 2) так:

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = \Delta U_c \cdot S_{\partial} \cdot R_a. \quad (3)$$

Выражение (3) показывает, что усиленное напряжение изменяется по тому же закону, что и входной сигнал, если динамическая крутизна сеточной характеристики  $S_{\partial}$  остается постоянной в пределах данного изменения сеточного напряжения.

Типичный вид динамической сеточной характеристики лампы приведен на рис. 4.

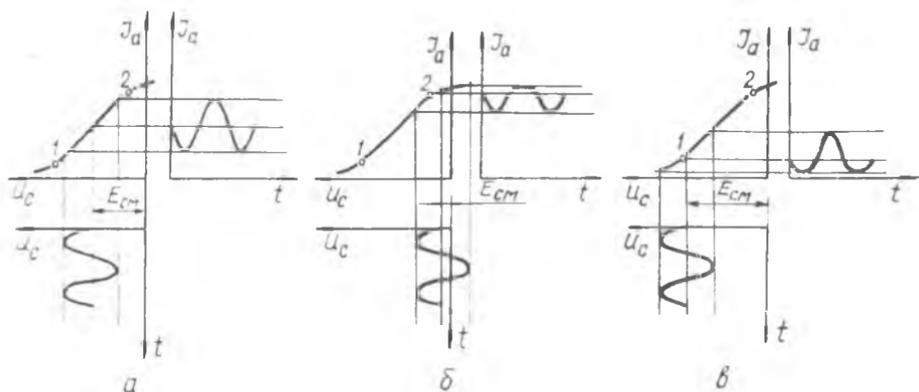


Рис. 5.

Точка *A* динамической характеристики, определяющая величину анодного тока  $I_{a0}$  называется рабочей точкой. Положение рабочей точки определяется напряжением батарей смещения. При одновременном воздействии на сетку двух напряжений  $E_{cm}$  и  $U_{вх}$  разность потенциалов между сеткой и катодом равна их алгебраической сумме и напряжение на сетке будет повторять по форме входной сигнал, оставаясь отрицательным.

Если усиливаемое напряжение изменяться в пределах прямолинейного участка сеточной характеристики 1—2, то  $S_d$  в этом случае не изменится, и сигнал будет усиливаться без искажений (рис. 5а).

Если рабочую точку перенести в нижнюю или верхнюю части характеристики, то  $S_d$  будет изменяться и возникнут амплитудные искажения усиливаемого сигнала (рис. 5б, в).

#### Схема усилителя на резисторах с автоматическим смещением.

В резистивных усилителях напряжение смещения подается автоматически. Для этого между катодом электронной лампы и «минусом» источника включен резистор  $R_k$ , и параллельно ему конденсатор  $C_k$ . Анодный ток создает на этом резисторе падение напряжения, причем на катоде оказывается положительный потенциал относительно «минуса» источника и сетки (рис. 6).

Благодаря большой емкости конденсатора  $C_k$  сопротивление цепи  $R_k C_k$  оказывается малым для переменных сигналов

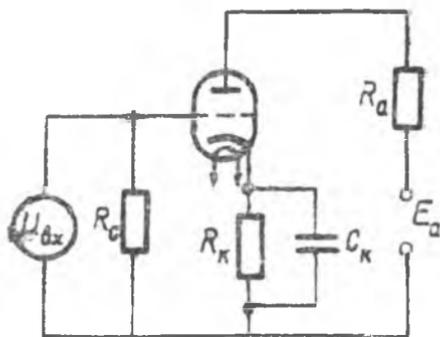


Рис. 6.

и падение переменного напряжения незначительным. Напряжение смещения на резисторе  $R_k$  будет практически постоянным. Между сеткой и катодом каждой лампы включен  $R_c$  — резистор утечки. По этому резистору электроны, попадающие на сетку в те периоды, когда на ней имеется положительный потенциал, непрерывно стекают с нее. Если этот резистор не включить, сетка постепенно зарядится до потенциала запираения, ток через лампу прекратится.

Схема усилителя на резисторах представлена на рис. 7.

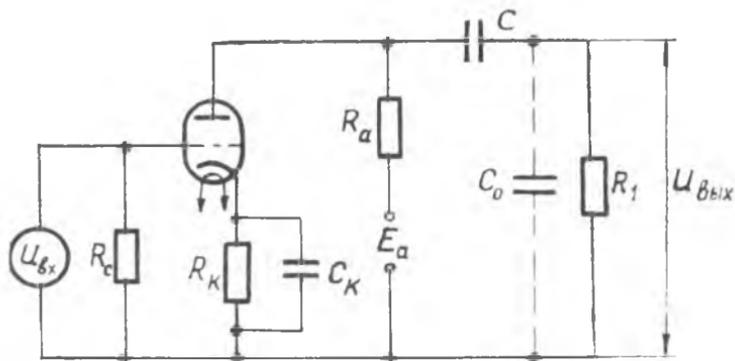


Рис. 7.

Здесь  $C$  — разделительный конденсатор. Он вводится для того, чтобы постоянное напряжение от источника  $E_a$  не попадало на резистор  $R_l$ , т. е. чтобы на нем было только переменное напряжение усиленного сигнала.

**Эквивалентная схема усилителя.** Из соотношения (2) следует, что

$$\Delta I_a = \frac{\mu \Delta U_{вх}}{R_l + R_a} \quad (4)$$

Электронную лампу можно заменить эквивалентным генератором с э. д. с., равной  $\mu \cdot U_{вх}$ , и внутренним сопротивлением  $R_l$ . Поэтому весь усилитель можно представить в виде эквивалентной схемы, изображенной на рис. 8.

**Частотные искажения усилителя на резисторах.** Эквивалентная схема дает возможность проанализировать работу усилителя и выяснить зависимость коэффициента усиления от частоты. Анализ схемы приводит к зависимости, данной на рис. 9.

На низких и высоких частотах наблюдается уменьшение коэффициента усиления. Спад его в области низких частот определяется влиянием сопротивления конденсатора  $C$ . С уменьшением частоты его сопротивление растет, следовательно, растет падение напряжения на этом конденсаторе, а напряжение  $U_{вых}$  на  $R_l$

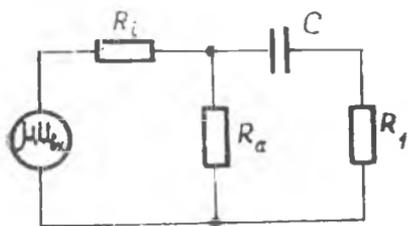


Рис. 8.

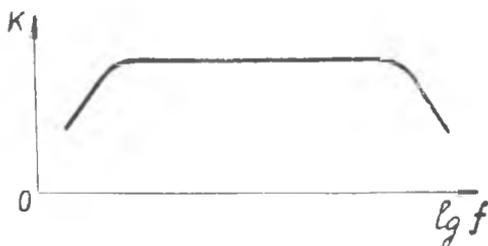


Рис. 9.

уменьшается. На высоких частотах становится заметным влияние емкости  $C_0$  (см. рис. 7)

$$C_0 = C_M + C_{вх}, \quad (5)$$

где  $C_M$  — емкость монтажа,  $C_{вх}$  — входная емкость следующего каскада. Величина этой емкости мала, поэтому на низких частотах ее влияние незначительно, а на высоких частотах она шунтирует резистор  $R_1$  и уменьшает величину сопротивления резистора анодной нагрузки. Следовательно, коэффициент усиления уменьшается.

Если для усиления электрических сигналов используется несколько усилительных каскадов, то общий коэффициент усиления  $K$  равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов

$$K = K_1 \cdot K_2 \dots K_n. \quad (6)$$

Целью данной работы является определение зависимости коэффициента усиления от величины сопротивления резистора и снятие частотной характеристики усилителя при различных значениях  $R_a$ .

**Описание экспериментальной установки. Методика определения коэффициента усиления.** Одноламповый усилитель смонтирован на панели по схеме, представленной на фиг. 10.

Напряжение от звукового генератора  $U_{зг}$  подается на вход усилителя через делитель напряжения  $R_1—R_2$ . В этом случае напряжение на сетке лампы будет равно

$$U_c = U_{зг} \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (7)$$

Для измерения величины выходного напряжения усилителя использован осциллограф. С помощью рубильника  $K_1$  осциллограф можно подключить либо на выход усилителя, либо к звуковому генератору. Переменное напряжение, подводимое к вертикально отклоняющим пластинам осциллографа, вызовет движение электронного луча вдоль оси  $Y$  с частотой, равной частоте подаваемого напряжения. В результате этого (при выключенном генераторе

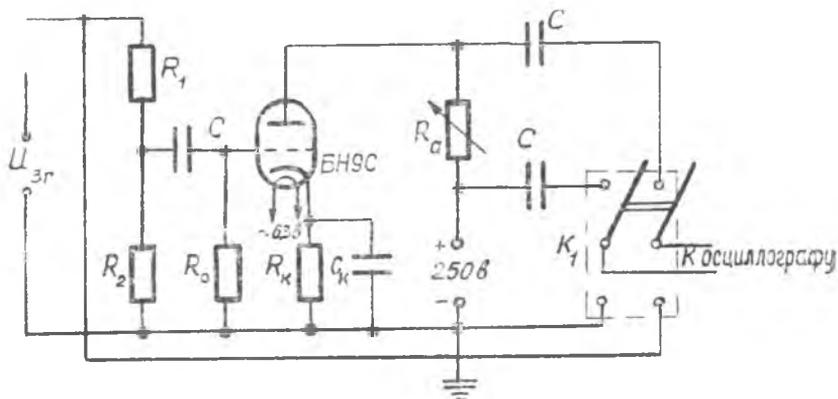


Рис. 10.

развертки) на экране осциллографа появится вертикальная линия, длина которой пропорциональна величине напряжения, приложенного к отклоняющим пластинам, т. е.

$$l = \frac{U}{S}, \quad (8)$$

где  $S$  — чувствительность осциллографа,  $l$  — длина световой линии. Подставив в формулу (1) выражение (7), найдем

$$K = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{3Г}} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (9)$$

Отношение напряжений  $\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{3Г}}$  можно заменить отношением длин соответствующих световых линий на экране осциллографа. Тогда окончательная формула для определения коэффициента усиления примет вид:

$$K = \frac{l_1}{l_2} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_2}, \quad (10)$$

где  $l_1$  — длина световой линии для  $U_{\text{ВЫХ}}$ ,  $l_2$  — длина световой линии для  $U_{3Г}$ .

### ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

**Упражнение I. Определение зависимости коэффициента усиления от величины сопротивления резистора  $R_a$**

1. Присоединить соответствующие клеммы панели к источникам питания, звуковому генератору и осциллографу.

2. Поставить рубильник в нейтральное положение. Включить питание панели, звукового генератора, осциллографа. После прогрева осциллографа подготовить его к работе. Для этого ручка-

ми «ЯРКОСТЬ», «ФОКУС», «ОСЬ Х», «ОСЬ У» вывести световую точку в центр экрана и сфокусировать ее.

3. Установить постоянную частоту звукового генератора  $f=1000$  гц. Включить рубильник на звуковой генератор и вращением ручки «УСИЛЕНИЕ» звукового генератора установить длину световой линии на экране, равную 40 мм.

4. Подключить рубильник на выход усилителя и измерить длину световой линии при различных сопротивлениях резистора. Величину резистора можно изменять, переставляя штеккер в гнезда с соответствующими надписями. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1

$R_a$		
$l_1$		
$k$		
$l_2 = 40$ мм	$R_1 = 200$ ком	$R_2 = 8,2$ ком

### Упражнение 2. Снятие частотной характеристики усилителя

1. Установить сопротивление резистора  $R_a=45$  ком.

2. Включить рубильник на звуковой генератор и вращением ручки «УСИЛЕНИЕ» звукового генератора установить длину световой линии на экране, равную 40 мм.

3. Переключить рубильник на выход усилителя и измерить длину световой линии  $l_1$ .

4. Измерения провести в диапазоне 20—20000 гц, изменяя частоту в геометрической прогрессии со знаменателем, равным 2. В области спадов частотной характеристики экспериментальные точки следует снимать чаще.

5. Измерения повторить для  $R_a=5$  ком,  $R_a=155$  ком.

6. Результаты измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2

$R_a = 5$ ком			$R_a = 45$ ком			$R_a = 155$ ком		
$f$	$l_1$	$k$	$f$	$l_1$	$k$	$f$	$l_1$	$k$

### Обработка результатов измерений

1. По данным измерений в упражнениях 1, 2 рассчитать коэффициенты усиления.

2. Построить графики зависимостей:

а)  $\kappa = F(R_a)$  при  $f = 1000$  гц;

б)  $\kappa = F(lgf)$  при  $R_a = 5$  ком;

в)  $\kappa = F(lgf)$  при  $R_a = 45$  ком;

г)  $\kappa = F(lgf)$  при  $R_a = 155$  ком.

### Контрольные вопросы

1. Как следует выбрать рабочую точку на сеточной характеристике, чтобы получить неискаженный усиленный сигнал?

2. Как зависит динамический коэффициент усиления от величины нагрузочного сопротивления?

3. Начертите принципиальную электрическую схему установки, используемой в данной работе, и поясните назначение каждого ее элемента.

4. Объясните уменьшение коэффициента усиления на низких и высоких частотах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Физический практикум. Электричество и оптика, под редакцией В. И. Ивероновой, задача 110, изд. «Наука», М., 1968.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Работа №	1. Определение характеристик электростатического поля . . . . .	3
— Работа №	2. Определение относительной диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков . . . . .	9
Работа №	3. Измерение сопротивлений с помощью моста постоянного тока . . . . .	14
— Работа №	4. Градуирование электростатического вольтметра по абсолютному электрометру . . . . .	20
— Работа №	5. Определение электродвижущей силы источника тока методом компенсации . . . . .	25
Работа №	6. Изучение зависимости э. д. с. термопары от температуры . . . . .	33
Работа №	7. Изучение зависимости удельного сопротивления электролита от температуры . . . . .	39
— Работа №	8. Изучение работы полупроводникового выпрямителя . . . . .	45
Работа №	9. Изучение работы гальванометра магнитоэлектрической системы . . . . .	55
Работа №	10. Определение зависимости диэлектрической проницаемости титана бария от температуры . . . . .	62
Работа №	11. Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли . . . . .	67
Работа №	12. Определение точки Кюри ферромагнетика . . . . .	74
Работа №	13. Исследование зависимости магнитной индукции в ферромагнетике от напряженности магнитного поля . . . . .	81
Работа №	14. Изучение работы электронной лампы . . . . .	91
Работа №	15. Определение отношения заряда электрона к его массе методом магнетрона . . . . .	100
Работа №	16. Изучение работы электронного осциллографа . . . . .	106
Работа №	17. Изучение работы электронного осциллографа . . . . .	113
Работа №	18. Изучение работы тиратрона . . . . .	125
Работа №	21. Определение удельного сопротивления проводников двойным мостом . . . . .	131
Работа №	22. Определение магнитной восприимчивости диамагнетиков и парамагнетиков . . . . .	137
Работа №	23. Исследование магнитных свойств ферритов в динамическом режиме с помощью осциллографа . . . . .	143
Работа №	24. Измерение индуктивности катушки помощи мостовой схемы . . . . .	150
		183

Работа № 26. Сравнение расчетного и экспериментального значений периода релаксационных колебаний в электрической цепи с неоновой лампой . . . . .	158
Работа № 27. Исследование электрических затухающих колебаний с помощью осциллографа . . . . .	165
Работа № 28. Изучение работы лампового усилителя . . . . .	174

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ**  
**Электричество и магнетизм**

Редактор И. С. Колышева  
 Тех. редактор Н. М. Каленюк  
 Корректоры Н. П. Гордеева, Л. В. Сидорова

Подписано в печать 16/XII 1970 г. ЕО00329. Объем 11,5 печ. л. Тираж 3000 экз.  
 Формат бумаги 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Цена 60 коп.

Куйбышевский авиационный институт им. С. П. Королева, г. Куйбышев,  
 ул. Молодогвардейская, 151.

Тип. изд-ва «Волжская коммуна», г. Куйбышев (обл.),  
 пр. Карла Маркса, 201. Зак. № 5348.