

**Министерство высшего и среднего специального  
образования республики Узбекистан**

**Ташкентский автомобильно-дорожный институт**

**Кафедра физики**

**Сборник лабораторных  
работ по курсу «Физика»**

(Электростатика, электрический ток и электромагнетизм)

**Тошкент-2010 г.**

**Министерство высшего и среднего специального  
образования республики Узбекистан  
Ташкентский Автомобильно-дорожный Институт**

**Утверждено  
Методической комиссией ФПО  
Пр № 10 от «12»\_мая\_\_2010г.**

**Сборник лабораторных  
работ по курсу «Физика»**

(Электростатика, электрический ток и электромагнетизм)

**Тошкент-2010 г.**

Данное методическое пособие по разделу «Электростатика», «Электрический ток» и «Электромагнетизм» содержат 10 лабораторных работ и предназначено для студентов бакалавров ТАДИ. Перед выполнением лабораторных работ необходимо ознакомиться с введением, знать устройство и принцип действия измерительных приборов, назначение шунтов, добавочного сопротивления и т.д.

Составители: доц. Тошходжаев Т.К.  
доц. Мирсоатов Р.М.  
доц. Бурханов Ш.Д.

Выходные данные:

Формат

№ заказа

тираж 100

Объем

печ.лист 3,5

2010 МУ ТАДИ.

## ВВЕДЕНИЕ

Выполнение каждой лабораторной работы проводится по следующей схеме:

1. Внимательно изучить описание лабораторной работы в данном методическом указании, если есть необходимость, изучить соответствующие вопросы в учебниках предложенных в конце методического пособия.

2. Ознакомиться с приборами и принадлежностями, которые необходимы для проведения работы и приступить к сборке установки в соответствии с описанием.

3. Провести наблюдения и отсчеты. Все результаты измерений записать в таблицы, которые даны конце каждой работы.

4. Обработать результаты измерений: вычислить измеряемую величину, дать оценку погрешности измерений.

Для отчета по лабораторной работе необходимо знать:

1. Цель и задачи данного исследования.

2. Метод, используемый в работе для определения той или иной исследуемой величины или какого-либо физического явления.

3. Порядок выполнения работы.

4. Теоретическую часть (определения, вывод формул, единицы измерения, физическое явление и его обоснование).

Студент должен помнить:

1. Все электрические схемы монтируют с помощью изолированных проводов, на концах которых крепятся соответствующие контактные скобки.

2. Контакты должны быть всюду плотными.

3. Перемещение проводов не допускается.

4. Сборка цепи ведется от источника тока, но подключается источник тока в последнюю очередь.

5. Реостаты, включенные в цепь, должны быть установлены на максимум сопротивления.

6. Потенциометры устанавливаются на нуль подаваемого в контур напряжения.

7. Все ключи во время сборки цепи должны быть разомкнуты.

8. Замыкать цепь только после разрешения лаборанта.

9. Ток замыкается только на время отсчета.

10. Переключение схем производится после отключения источника питания.

### Основные электроизмерительные приборы.

Все электроизмерительные приборы классифицируются по следующим основным признакам:

а) по роду измеряемой величины: амперметры, вольтметры, омметры, счетчики, ваттметры и др.;

б) по роду тока: приборы постоянного тока, переменного тока и приборы постоянного и переменного тока;

в) по принципу действия: магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, индукционные, тепловые, электростатические и др.

г) по степени точности: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 классов.

Приборы класса точности 0,1; 0,2; 0,5 применяются для точных измерений и называются прецизионными.

На шкалу прибора наносится символ, указывающий принцип действия прибора, род тока- постоянной (-) или переменный (~) установки приборов – вертикально (↑), горизонтально (→), пробивное напряжение изоляции (↓ 2 кВ), класс точности.

Система	Условные обозн.
Магнитоэлектрич.еск.	
Электромагнитная	
Электродинамическая	
Тепловая	

Обозначение систем электроизмерительных приборов показано на рис.1.

Электроизмерительные приборы состоят из подвижной и неподвижной частей. При измерениях вращающий момент подвижной части уравнивается противодействующим моментом пружины или какого-либо другого устройства.

Рис.1

Величина, численно равная отношению приращения угла поворота подвижной части прибора к приращению измеряемой величины, называется чувствительностью прибора.

$$S = \frac{d\varphi}{dI}$$

Величина  $C = \frac{I}{S}$  называется ценой деления прибора; С определяет значение электрической величины, вызывающей отклонение на одно деление. Например, имеем прибор, который может измерять напряжение от 0 до 250 в шкала этого прибора разделена на 50 делений (мелких). Чувствительность этого прибора.

$$S_1 = \frac{d\varphi}{dU} = \frac{50}{250} = 0.2 \dots \text{дел} / \text{В}$$

Цена деления

$$C = \frac{1}{S} = \frac{250}{50} = 5 \text{В} / \text{дел}$$

На шкале прибора обычно ставится знак, указывающий на вертикальное или горизонтальное положение прибора.

В целях сокращения промежутка времени, необходимого для успокоения подвижной части прибора (после включения), имеются специальные тормозящие устройства (демпферы).

**Приборы магнитоэлектрической системы.** Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии

магнитного поля постоянного магнита с током, протекающим по обмотке легкой подвижной катушки (рамки).

В результате взаимодействия магнитного поля магнита с током, протекающим по рамке, возникает вращающий момент, под действием которого подвижная часть прибора поворачивается около оси. Противодействующий момент создается пружинами, через которые также подводится ток к обмотке.

Теоретически нетрудно установить зависимость угла поворота подвижной  $\alpha$  от величины тока  $I$ , протекающего по обмотке рамки прибора:

$$\alpha = k I$$

где  $k$ - коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции прибора.

Из этой зависимости видно, что магнитоэлектрические приборы имеют равномерные шкалы.

Область применения магнитоэлектрических приборов весьма обширна. Они применяются в качестве амперметров и вольтметров постоянного тока, дают наибольшую точность измерения и являются наиболее экономичными в смысле потребления энергии. Амперметры этой системы позволяют измерять напряжение от 0,1 до 600 в, а с дополнительным сопротивлением- до 10000 в и более.

Для переменного тока магнитоэлектрические приборы неприменимы, так как подвижная часть вследствие инерции не успевает отклоняться.

**Амперметры, вольтметры и гальванометры.** Амперметрами называют приборы, служащие для измерения силы тока. При измерениях амперметр включают в цепь последовательно, т.е. так, что весь измеряемый ток проходит через амперметр (рис.2).

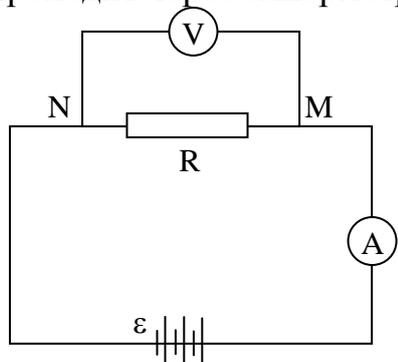


Рис. 2.

Вольтметрами называют приборы, служащие для измерения напряжения (рис. 2.). при измерениях вольтметр включают параллельно тому участку цепи, на концах которого хотят измерить разность потенциалов, т.е. вольтметр соединяют с теми точками М и N цепи, разность потенциалов которых нужно измерить. Для того, чтобы включение вольтметра не изменяло заметно режима цепи, сопротивление вольтметра должно быть очень велико по сравнению с сопротивлением

R участка цепи MN. Погрешность при измерениях напряжения тем меньше, чем больше сопротивление вольтметра.

Для расширения пределов измерений амперметров и вольтметров применяются шунты и добавочные сопротивления, а в случае измерений на переменном токе – трансформаторы тока.

Гальванометрами называют чувствительные приборы, служащие для измерения весьма малых токов, напряжений и количеств электричества (соответственно меньше  $10^{-6}$  ампера, вольта или кулона).

По принципу действия и устройству гальванометры бывают магнитоэлектрические с подвижной катушкой, магнитоэлектрические с

подвижным магнитом, струнные, термогальванометры, электродинамометры и электрометры.

По роду измеряемого тока гальванометры разделяются на магнитоэлектрические и вибрационные (резонансные). Первые применяются для измерения тока и напряжения в цепях постоянного тока по так называемому нулевому методу. Гальванометры с подвижной рамкой (катушкой) по своему устройству принципиально не отличаются от описанного выше устройства приборов магнитоэлектрической системы.

**Реостаты, потенциометры и магазины сопротивлений.** Для изменения силы тока в цепи часто применяется реостаты. В зависимости от назначения реостаты имеют различные виды.

Ламповые реостаты, состоящие из нескольких ламп, соединенных параллельно или последовательно.

Реостаты со скользящим контактом, по проводнику может перемещаться контакт (ползунок), позволяющий постепенно включать в цепь обмотку. Реостат включается в цепь через клемму А, соединенную с ползунком Д и клеммами В или С (удобнее подключать через клемму В). Если клеммы В и С соединить с полюсами источника тока (на рис. 3 показано пунктиром), то

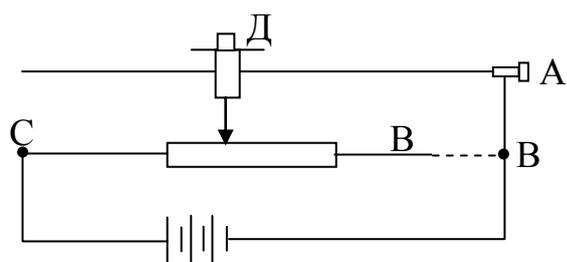


Рис. 3

получим прибор, называемый потенциометром. Перемещая ползунок Д между клеммой С и соединенной с ползунком клеммой А, можно получить определенную разность потенциалов в интервале от О до И.

Набор эталонных сопротивлений, представляющих собой катушки сопротивлений, называется магазином сопротивлений. Каждая катушка состоит из хорошо изолированной проволочной обмотки, изготовленной из манганина или константана. Сопротивление каждой катушки вполне определено для данной температуры. Катушки набора помещаются в общий ящик. Конические «штепсели» плотно вставляются в гнезда пластин и служат непосредственным контактом между пластинами.

Когда все штепсели вставлены, ток проходит от пластины к пластине без заметного сопротивления. Но если вынуть какой либо штепсель, то ток может пройти только через соответствующую катушку. (рис.4)

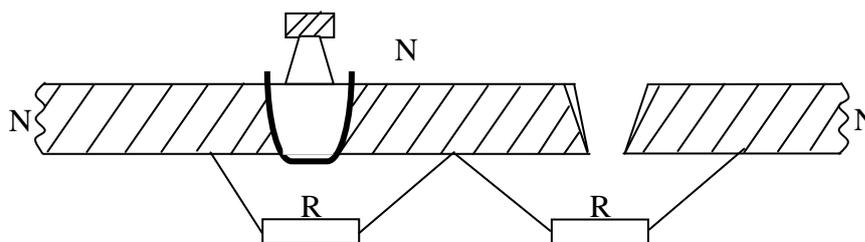


Рис. 4

**Оценка погрешностей электрических измерений.** Абсолютная погрешность измерений, производимых электроизмерительными приборами, оценивается исходя из класса точности приборов. Обозначение класса точности

0,2; 0,5; 1,0 и т.д. не только характеризует прибор в зависимости от системы, конструкции, качества материалов, точности градуировки и других факторов, но и указывает, что погрешность показаний прибора соответствующего класса в любом месте шкалы не должна превышать 0,2%, 0,5%, 1%.

Если обозначим через  $A^1$  максимально возможное показание прибора, а через  $n$  номер класса прибора, то получим абсолютную погрешность прибора

$$\Delta A = A^1 n \quad (2)$$

Например, вольтметр 0,2 класса ( $n=0,002$ ), шкала которого рассчитана на 50В, имеет абсолютную погрешность

$$\Delta U = \pm 0,002 \cdot 50V = \pm 0,1V$$

а амперметр класса 1,5, рассчитанный на максимальное показание 5А, имеет абсолютную погрешность

$$\Delta I = \pm 0,015 \cdot 5A = \pm 0,075A$$

Так как абсолютная погрешность считается одинаковой по всей шкале данного электроизмерительного прибора, то относительная погрешность  $\left(\frac{\Delta I}{I} \cdot 100\right)$  будет тем больше, чем меньше измеряемая величина. Если, например, при помощи указанного амперметра измерить ток около 4А, то относительная погрешность будет составлять 1,9%, а при измерении силы тока около 1А – 7,5%.

При точных измерениях следует пользоваться такими приборами, чтобы значение измеряемой величины составляло 70-80% от максимального (номинального) значения. Поэтому применяют приборы, имеющие несколько пределов измерений; при работе с таким прибором его включают в цепь на тот предел измерений, который достаточно близок к предполагаемому значению измеряемой величины.

Рассмотрим вычисление погрешностей на следующей примере.

Определить погрешность измерения внутреннего сопротивления элемента, электродвижущая сила которого  $E$ , напряжение на полюсах  $U$  и величина тока  $I$ . Для измерения применены вольтметр класса 0,5 ( $U_N=2,5V$ ) и амперметр класса 1,0 ( $I_N=1,5A$ ). результаты измерений следующие:  $E=2V$ ,  $U=1,3V$ ,  $I=1,2A$ .

Абсолютные погрешности измерений:

$$\Delta E = \Delta U = \pm 0,005 \cdot 2,5V = \pm 0,0125V;$$

$$\Delta I = \pm 0,01 \cdot 1,5 = \pm 0,015A;$$

Вычисление внутреннего сопротивления производим по формуле

$$r = \frac{E - U}{I} \quad (3)$$

Максимальная относительная погрешность может быть определена общеизвестным методом. Логарифмируя выражение (3)

$$\ln r = \ln(E - U) - \ln I,$$

Находим относительную погрешность

$$\frac{\Delta r}{r} = \frac{\Delta(E+U)}{E-U} + \frac{\Delta I}{I} = \frac{\Delta E + \Delta U}{E-U} + \frac{\Delta I}{I}$$

$$\frac{\Delta r}{r} = \pm \left( \frac{0.0125 + 0.0125}{2 - 1.3} + \frac{0.015}{1.2} \right) = +0.0482 \approx 0.05$$

Эта погрешность, выраженная в процентах, составляет:  $\frac{\Delta r}{r} 100 = \pm 5\%$

С помощью формулы (3) находим внутреннее сопротивление  $r$  и абсолютную погрешность  $\Delta r$

$$r = \frac{2 - 1.3}{1.2} = 0.58 \text{ Ом} \quad \Delta r = \pm 0.05 \cdot 0.58 = \pm 0.029 \text{ Ом} \approx \pm 0.03 \text{ Ом}$$

Следовательно, внутреннее сопротивление  $r = (0.58 \pm 0.03) \text{ Ом}$

### **Измерения и обработка результатов измерения.**

1. Знакомятся со всеми приборами, находящимися на лабораторном столе и делают описание каждого прибора (название, система, класс точности и т.п.).

2. По формуле (1) вычисляют чувствительность и цену деления каждого прибора.

3. Находят класс точности приборов и по формуле (2) определяют абсолютную погрешность прибора.

4. Собирают схему, которая имеется на лабораторном столе, и находят абсолютную и относительную погрешности величин и значения величин, указанных на схеме.

## РАБОТА №21

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

**Цель работы:** изучение графического представления полей.

**Принадлежности:** электролитическая ванна, гальванометр, потенциометр, вольтметр, электроды.

#### Теоретическое введение

Согласно современным представлениям взаимодействие между покоящимися зарядами осуществляется через электрическое поле, которой представляет собой одну из форм существования материи.

Электрическое поле в каждой точке может быть описано силовой характеристикой – напряженностью поля  $E$ , численно равная силе  $F$ , с которой электрическое поле действует на единичный положительный заряд, помещенный в данной точке поля.

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

Потенциалом электрического поля  $\varphi$  в данной точке называется величина численно равная потенциальной энергии  $W$ , которой обладал он в данной точке единичный положительный заряд

$$\varphi = \frac{W}{q} \quad (2)$$

Подобно потенциальной энергии, потенциал определен с точностью до произвольной постоянной. Обычно эту постоянную выбирают таким образом, чтобы при удалении заряда на бесконечность ( $z=\infty$ ) потенциальная энергия и потенциал обращались в нуль.

Из формулы (2) видно, что заряд  $q$ , находящийся в точке поля с потенциалом  $\varphi$ , обладает энергией.

$$W = \varphi q \quad (2a)$$

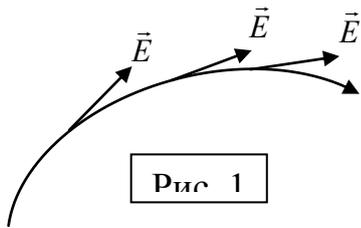
и следовательно работа сил поля по перемещению заряда равна

$$A = W_1 - W_2 = q(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (2б)$$

Так как по определению потенциал на бесконечности равен нулю, то потенциал можно определить как величину, численно равный работе, которую нужно совершить, чтобы перенести единичный положительный заряд из  $\infty$  в данную точку поля.

$$\varphi = \frac{A_\infty}{q} \quad (3)$$

Для того, чтобы полностью описать электрическое поле, необходимо задать вектор напряженности в каждой точке поля. Это можно сделать аналитически, выражая зависимость напряженности поля от координат в виде формул. Однако эту зависимость можно представить очень наглядно графически, используя силовые линии. Силовой линией, называют линию, проведенную в электрическом поле таким образом, что направление касательной в любой точке совпадает с направлением вектора напряженности поля  $E$ .



Чтобы при помощи силовых линий изобразить не только направление, но и величину напряженности поля, условились на графиках проводить силовые линии с определенной густотой, а именно так, чтобы число силовых линий, проходящих через единицу поверхности, перпендикулярной к силовым линиям, было пропорционально величине

напряженности поля в данном месте.

Строя силовые линии, мы получаем своеобразные графики или карты поля, которые наглядно показывают, чему равна напряженность в разных частях поля и как она изменяется в пространстве. Вследствие большой наглядности этот способ представления полей широко применяют в электротехнике. Из сказанного следует, что силовую линию можно провести через всякую точку поля и так как в каждой точке поля вектор напряженности имеет вполне определенное направление, то силовые линии нигде не пересекаются. (рис.1).

Принято проводить силовые линии так, чтобы они выходили из положительных зарядов и входили в отрицательные. Силовые линии нигде, кроме зарядов, не начинаются и не заканчиваются.

Электрические поля можно также представлять графически с помощью эквипотенциальных поверхностей. Эквипотенциальной поверхностью или поверхностью равного потенциала, называют воображаемую поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал.

Вектор напряженности в данной точке электрического поля нормален к эквипотенциальной поверхности, проведенной через эту точку, а значит, силовые линии в каждой точке ортогональны к эквипотенциальным поверхностям.

На рис. 2 графически изображено электрическое поле, образованное положительным зарядом  $q$  и отрицательно заряженной плоскостью  $P$ . Сплошными линиями показаны эквипотенциальные поверхности с потенциалами  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ , пунктирными линиями – силовые линии поля. Направление силовых линий показано стрелками. Потенциал и напряженность поля связаны между собой соотношением

$$E = -\frac{\partial \varphi}{\partial \ell} \quad (4)$$

т.е. напряженность поля численно равна изменению потенциала на единицу длины в направлении нормали к эквипотенциальной поверхности в сторону убывания потенциала. Покажем, что это действительно так. Рассмотрим две эквипотенциальные поверхности 1 и 2, расположенные близко друг от друга, потенциалы которых равны соответственно  $\varphi$  и  $\varphi + d\varphi$  (рис.3).

Поместим в точку поля  $A$  пробный заряд  $q$ . Пусть под действием электрических сил поля пробный заряд  $q$  переместился из точки  $A$  в точку  $B$ , т.е. с одной эквипотенциальной поверхности на другую, по пути  $d\ell$ . Тогда работа сил поля равна убыли потенциальной энергии

$$dA = -dW = -q d\varphi \quad (5)$$

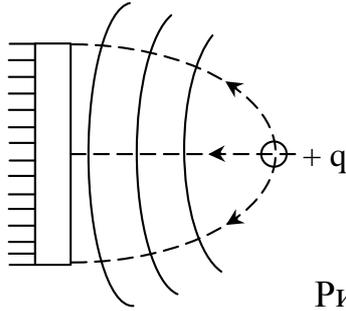


Рис. 2

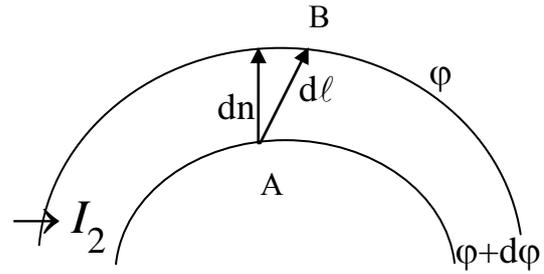


Рис. 3

С другой стороны работу  $dA$  можно записать как произведение  $d$  составляющей электрических сил в направлении перемещения  $d\ell$  на его величину

$$dA = F_e d\ell \quad (6)$$

Из формулы (1) видно, что величина силы, действующей на заряд в электрическом поле, связана с напряженностью  $\vec{E}$  соотношением  $F = q\vec{E}$ , поэтому

$$F_e = qE_e \quad (7)$$

где  $E_e$  – проекция напряженности  $E$  на направление  $d\ell$ . Следовательно

$$dA = qE_e d\ell \quad (8)$$

Приравняв выражения (5) и (8), получаем после сокращения на  $q$

$$E_e d\ell = -d\varphi \quad (9)$$

Откуда

$$E_e = -\frac{d\varphi}{d\ell} \quad (10)$$

В общем случае, когда  $\varphi$  является функцией декартовых координат  $x, y, z$ , по аналогии можно написать

$$E_x = -\frac{\partial\varphi}{\partial x}, \quad E_y = -\frac{\partial\varphi}{\partial y}; \quad E_z = -\frac{\partial\varphi}{\partial z} \quad (11)$$

Вектор с компонентами  $\frac{\partial\varphi}{\partial x}, \frac{\partial\varphi}{\partial y}, \frac{\partial\varphi}{\partial z}$  называется градиентом

функции и обозначается символом  $\text{grad}\varphi$  или  $\Delta\varphi$ .

Следовательно  $\vec{E} = -\text{grad}\varphi = -\Delta\varphi \quad (12)$

Из соотношения (10) следует единица измерения напряженности поля в системе СИ-В/м.

В данной работе на опыте исследуется картина эквипотенциальных поверхностей для различных видов электрического поля, а затем по ним воспроизводится картина силовых линий поля.

### Описание установки и методика измерений

Исследовать электрическое поле (т.е. построить эквипотенциальные поверхности) можно с помощью схемы (рис. 4). В электролитическую ванну наливают воду толщиной 2-3 мм. Вода является электролитом, ионы которого

будут двигаться почти вдоль силовых линий электрического поля, образованного между электродами  $C_1$  и  $C_2$  при помощи источника напряжения  $\varepsilon$ . Перемещением движка  $Д$  потенциометра  $\Pi$  этому движку можно придавать различные значения потенциала относительно электродов  $C_2$  и  $C_1$ .

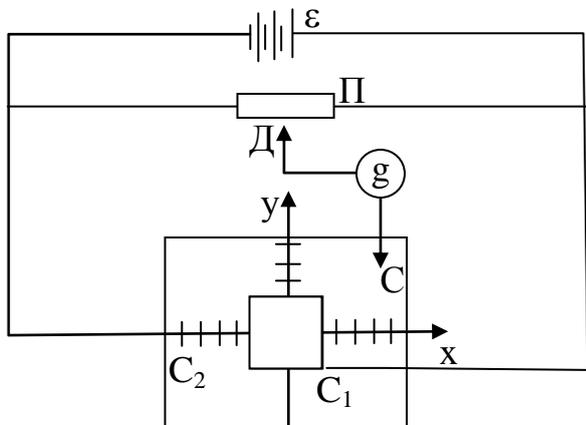


Рис. 4

образует эквипотенциальную поверхность в исследуемом поле. Измерение потенциала этой поверхности относительно электродов  $C_2$  и  $C_1$  можно замерить вольтметром. Процесс изучения исследуемого поля сводится к следующему: перемещая движок на потенциометре, придают ему различные значения потенциала. Для каждого установленного на движке значения потенциала путем перемещения зонда  $C$  по электрической ванне находят соответствующую эквипотенциальную поверхность исследуемого поля.

Наличие или отсутствие тока и цепи гальванометра  $g$  зависит от того, в какой точке поля находится зонд  $C$ . Если он находится в такой точке поля, потенциал которой равен потенциалу, установленному на движке делителя, то тока в цепи зонда и гальванометра не будет.

Геометрическое место всех точек поля, для которых в цепи зонда ток будет равным нулю при данном положении движка на потенциометре,

### Порядок выполнения работы.

1. В ванну налить воды толщиной 2-3 мм.
2. В центр ванны установить центральный электрод.
3. Собрать электрическую схему по рис. 4.
4. Установить определенную разность потенциалов между электродами при помощи движка потенциометра.
5. При помощи зонда в поле ванны найти 20-25 точек, для которых показание гальванометра нулевое.
6. Соединить полученные точки плавной кривой, представляющей собой эквипотенциальную поверхность.
7. Изменив положение движка, проделать то же самое, получив еще одну эквипотенциальную поверхность.

### Полученные результаты внести в таблицу.

№	1-ый электрод				2-ой электрод			
	$\varphi_1=$		$\varphi_2=$		$\varphi_1=$		$\varphi_2=$	
	x	y	x	y	x	y	x	y
1								
2								
3								
4								

### **Контрольные вопросы**

1. Назовите основные характеристики электростатического поля и их единицы измерения.
2. Определите напряженность и потенциал поля.
3. Связь между напряженностью и потенциалом.
4. Что такое силовые линии и эквипотенциальные поверхности.
5. Каким свойствами обладают эквипотенциальные поверхности?
6. Определите работу электрического поля при перемещении заряда по эквипотенциальной поверхности.
7. Опишите метод, используемый в работе для исследования электростатического поля.

## РАБОТА №22

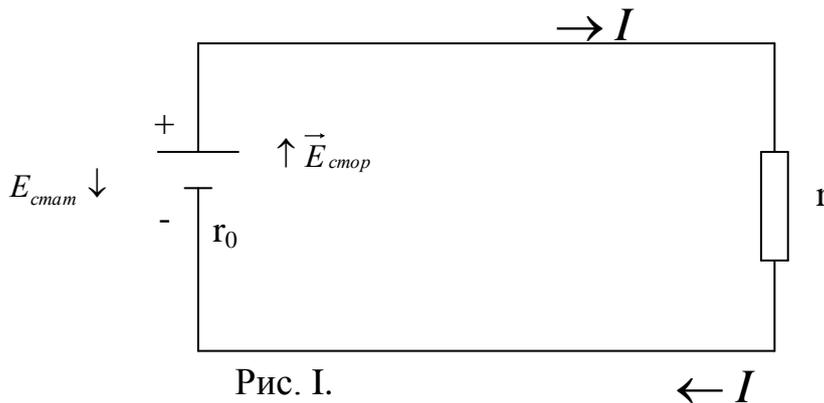
### ОПРЕДЕЛЕНИЕ Э.Д.С. ЭЛЕМЕНТА МЕТОДОМ КОМПЕНСАЦИИ

**Цель работы:** Изучение источников токов и законов постоянного тока.

Принадлежности: источник напряжения, нормальный элемент и элемент с неизвестной э.д.с., реохорд, Гальванометр.

#### Теоретическое введение

На рис.1 показана простейшая замкнутая цепь постоянного тока с источником, внутреннее электрическое поле которого характеризуется напряженностью  $\vec{E}_{\text{стат}}$ . Внутреннее сопротивление источника и сопротивление внешней цепи обозначены через  $r_0$  и  $r_1$ , ток в цепи – через  $I$ .



Рассматривая эту цепь можно заметить, что для непрерывности тока в цепи необходимо движение электрических зарядов внутри источника в направлении, обратном действию силы электрического поля, что возможно только за счет работы, так называемых, сторонних сил.

Роль этих сторонних сил (неэлектрической природы) сводится к разделению разноименных зарядов и их перемещению внутри источника с тем, чтобы создать избыток электронов на одном из полюсов и их недостаток на другом.

Природа сторонних сил может быть различной. Например, в генераторах природа этих сил механическая, имеет место преобразование механической энергии в электрическую в гальванических элементах природа этих сил химическая, в электрическую энергию преобразуется химическая энергия.

Величина  $\varepsilon$ , численно равная работе сторонних сил, совершаемой при разделении единицы положительного заряда, называется электродвижущей силой

$$\varepsilon = \frac{A_{\text{ст}}}{q}. \quad (1)$$

Электродвижущая сила возникает в источнике тока и при разомкнутой цепи, поддерживая на зажимах источника тока определенную разность потенциалов.

При протекании электрического тока в замкнутой цепи энергия источника расходуется как внутри источника, вызывая внутреннее падение

напряжения  $U_0$ , так и во внешней цепи, вызывая падение напряжения  $U$ ,  
Отсюда

$$U = \varepsilon - U_0 \quad (2)$$

Согласно закону Ома для участка цепи  $U_0 = Ir_0$ , а значит

$$U = \varepsilon - Ir_0 \quad (3)$$

Напряжение на зажимах работающего источника меньше его э.д.с. на величину падения напряжения внутри источника. Из выражения (3) видно, что  $\varepsilon = U$ , если  $I=0$ . Следовательно для определения э.д.с. источника необходимо измерить напряжение на его зажимах при условии, что ток через источник равен нулю. Эти условия и создаются в компенсационной схеме.

### Описание установки и методика измерений

Компенсационная схема имеет следующий вид (рис.2)

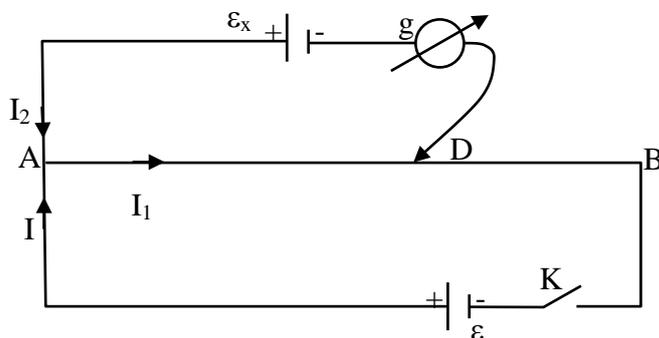


Рис. 2.

$\varepsilon_x, \varepsilon$  - источники э.д.с.

АДВ - потенциометр (реохорд) из однородной проволоки, одинакового сечения по всей длине.

Суть метода состоит в том, что включают два элемента различных э.д.с.  $\varepsilon_x$  и  $\varepsilon$  полюсами навстречу друг другу и добиваются исчезновения тока  $X_x$  через исследуемый элемент ( $\varepsilon_x$  должна быть меньше  $\varepsilon$ ).

При определенном положении движка Д ток в цепи, содержащей гальванометр, становится равным нулю. В этом случае  $U_{AD} = \varepsilon_x$ , т.е. неизвестная э.д.с. уравнивается (компенсируется) напряжением на участке реохорда.

По закону Ома

$$I = \frac{\varepsilon}{R_{AA} + R_{\bar{A}\bar{A}} + r_0} \quad (4)$$

$$U_{\bar{A}\bar{A}} = I \cdot R_{\bar{A}\bar{A}} = \varepsilon \frac{R_{\bar{A}\bar{A}}}{R_{\bar{A}\bar{A}} + R_{AA} + r_0} \quad (5)$$

Отсюда

$$\varepsilon_x = \varepsilon \frac{R_{AA}}{R_{\bar{A}\bar{A}} + R_{AA} + r_0} \quad (6)$$

Если известны  $E$  и  $r_0$ , можно определить  $\varepsilon_x$ . В качестве источника используют аккумуляторы, внутреннее сопротивление которых  $r_0$  которых со временем меняется. Поэтому  $E_x$  сравнивают с  $E_n$  (нормального элемента), у

которого она сохраняется длительное время (ртутно-кадминовый элемент с электролитом – насыщенный раствор сернокислого кадмия;  $\varepsilon_n = 1,018$  В).

Для сравнения после достижения компенсации с  $\varepsilon_x$ , в цепь с гальванометром включают  $E_n$  и, передвигая движок Д. вновь добиваются компенсации при новой  $R_{AD'}$ .

Аналогично

$$\varepsilon_n = \varepsilon \frac{R_{AD'}}{R_{AD'} + R_{ДВ'} + Ч_0} \quad (7)$$

$\varepsilon$  и  $r_0$  одинаковы в обоих соотношениях, т.к. измерения производились почти одновременно. Разделив одно уравнение на другое, получим:

$$\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_n} = \frac{R_{AD}}{R_{AD'}} \quad (8)$$

так как

$$R_{AA} + R_{AA} + r_0 = R_{AA'} + R_{A'A} + r_0$$

и

$$R_{AD} = \rho \frac{\ell}{S}; \quad R_{AD'} = \rho \frac{\ell_{AD'}}{S} \quad (9)$$

то

$$\varepsilon_x = \varepsilon_n \frac{\ell_{AD}}{\ell_{AD'}} = \varepsilon_n \frac{\ell_x}{\ell_n} \quad (10)$$

### Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую схему по рисунку 3.
2. Двойной ключ замкнуть на клеммы 3,5 нормального элемента.
3. Замкнув ключ К, подвижной контакт Д установить в положение, при котором ток через гальванометр равен нулю. Замерить соответствующую длину плеча реохорда АД-  $\ell_n$ .
4. Перекинуть двойной ключ на клеммы 4,6. Снова, перемещая контакт Д замерить длину плеча реохорда  $\ell_x$  для элемента с неизвестной э.д.с.  $\varepsilon_x^1$ .

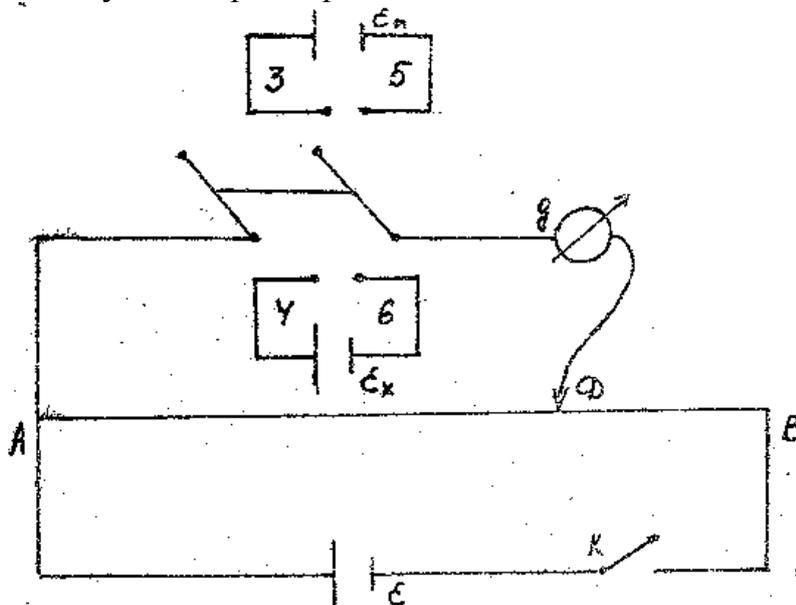


рис. 3

5. По формуле (I0) рассчитать э.д.с. неизвестного элемента.
6. В том же порядке замерить и рассчитать для второго элемента неизвестную э.д.с.  $\varepsilon_x^{II}$ .
7. Соединив оба неизвестных элемента последовательно, добиться компенсации и подсчитать э.д.с. батареи элементов.
8. Соединив оба неизвестных элемента параллельно, добиться компенсации и подсчитать э.д.с. батареи.

Таблица

	$\varepsilon_x^I$	$\ell_n$	$\ell_x^I$	$\varepsilon_x^I$	$\ell_n^I$	$\varepsilon_x^{II}$	$\ell_{пар}$	$\varepsilon_{пар}$	$\ell_{посл}$	$\varepsilon_{посл}$
1.										
2.										
3.										

### Контрольные вопросы

1. Суть метода компенсаций.
2. Вывод расчетной формулы.
3. Физический смысл э.д.с. источника.
4. Последовательное и параллельное соединение элементов в батарею.
5. Закон Ома для замкнутой цепи.
6. Единицы измерения э.д.с. источника.

## РАБОТА № 23

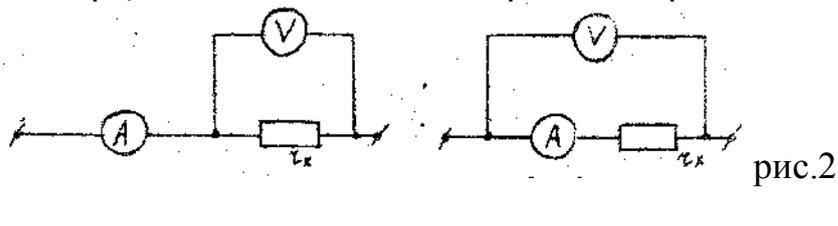
### ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТОДОМ МОСТА УИТСТОНА

**Цель работы:** Изучение законов постоянного тока.

**Принадлежности:** магазин сопротивлений, набор резисторов, реохорд, провода, гальванометр.

#### Теоретическое введение

Методы измерения электрических сопротивлений весьма разнообразны. Примером может служить определение сопротивления  $r_x$  при помощи амперметра и вольтметра, включенных по схеме рис.1 или рис.2.



Измерив ток амперметром  $A$  и напряжение вольтметром  $V$  можно по закону Ома определить неизвестное сопротивление

$$r_x = \frac{U}{I} \quad (1)$$

Однако, такой простой метод определения  $r_x$  не дает достаточно точных результатов. Так, в схеме рис.1 амперметр измеряет ток только в сопротивлении  $r_x$ , но и ток в вольтметре, а в схеме рис.2 вольтметр измеряет падение напряжения и на сопротивлении  $r_x$  и на амперметре. Погрешность этого метода определяется точностью амперметра и вольтметра и обычно бывает не очень велика ( $\sim 1\%$ ).

Одним из наиболее точных методов определения сопротивлений является метод моста Уитстона (метод сравнения сопротивлений, не требующий измерения тока и напряжения).

Принципиальная схема моста Уитстона изображена на рис.3.

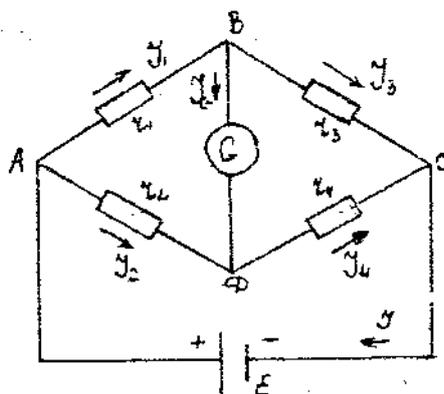


Рис.3.

Резисторы с сопротивлениями  $r_1, r_2, r_3, r_4$ , называются плечами моста, ветви AC и BD- диагоналями. В одну из диагоналей включается источник э.д.с.  $\varepsilon$ , в другую – гальванометр.

С помощью моста Уитстона можно определить сопротивление любого из четырех включенных резисторов.

Процесс измерения сводится к тому, чтобы подобрать такие значения сопротивлений  $r_1, r_2, r_3, r_4$ , при которых ток в цепи гальванометра был равен нулю. В этом случае падение напряжения на участке ВД равно нулю, а потенциалы точек В и Д равны. Такое состояние моста называется равновесным, а мост в этом состоянии – уравновешенным.

Покажем, что условие равновесия определяется соотношением

$$\frac{r_1}{r_3} = \frac{r_2}{r_4} \quad (2)$$

Воспользуемся для этой цели системой уравнений, составленных по законам Кирхгофа.

Составим согласно первому закону Кирхгофа уравнения для узлов В и Д:

$$\begin{aligned} I_1 - I_3 - I_G &= 0 \\ I_2 + I_G - I_4 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

или

$$\begin{aligned} I_1 &= I_3 + I_G \\ I_4 &= I_2 + I_G \end{aligned} \quad (4)$$

Для уравновешенного моста Уитстона  $I_G = 0$ , следовательно,

$$I_1 = I_3 \quad \text{и} \quad I_2 = I_4 \quad (5)$$

Напишем теперь для контуров АВДА и АСДВ уравнения по второму закону Кирхгофа.

Для контура АВДА имеем:

$$I_1 r_1 + I_G r_G - I_2 r_2 = 0 \quad (6)$$

Для контура ВСДВ имеем:

$$I_3 r_3 - I_4 r_4 - I_G r_G = 0 \quad (7)$$

Так как  $I_G = 0$ , то

$$I_1 r_1 = I_2 r_2 \quad (8)$$

$$I_3 r_3 = I_4 r_4 \quad (8^1)$$

Поделив почленно (8) на (8<sup>1</sup>), получим

$$\frac{I_1 r_1}{I_3 r_3} = \frac{I_2 r_2}{I_4 r_4} \quad (9)$$

Откуда с учетом соотношений (5) следует окончательное условие равновесия моста

$$\frac{r_1}{r_3} = \frac{r_2}{r_4} \quad (10)$$

Пользуясь этим условием, можно определить сопротивление любого из четырех резисторов, включенных в плечи моста, если сопротивление остальных трех резисторов известны.

### Описание установки и методика измерений

При определении сопротивлений методом моста Уитстона собирают цепь по схеме рис.4. в схеме:  $r_2$  и  $r_4$  – сопротивления участков реохорда, представляющего собой укрепленную проволоку, вдоль которой перемещается скользящий контакт Д,  $r_2 = r_x$ , – неизвестное сопротивление,  $r_3 = r_m$ , –

сопротивление магазина сопротивлений,  $\varepsilon$  – э.д.с. источника, К – ключ, G – гальванометр.

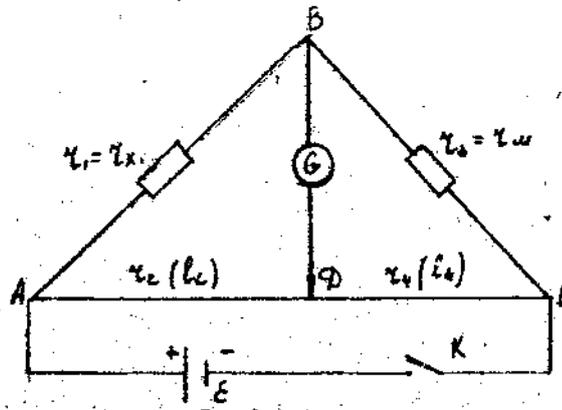


Рис.4.

Так как реохорд представляет собой однородную проволоку, то для его участков можно написать:

$$r_2 = \rho \frac{l_2}{S}; \quad r_4 = \rho \frac{l_4}{S} \quad (11)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проволоки, S – ее сечение,  $l_2, l_4$  – длина участков.

Соответственно этому уравнение (10) принимает вид:

$$\frac{r_1}{r_3} = \frac{r_2}{r_4}, \quad \frac{r_0}{r_i} = \frac{l_2}{l_4} \quad (12)$$

Если сопротивление  $r_1 = r_x$  – искомое неизвестное сопротивление, в  $r_3 = r_m$  – значение установленного сопротивления в магазине сопротивлений, то

$$r_0 = r_i \frac{l_2}{l_4} \quad (13)$$

формула (13) является расчетной.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать цепь по схеме моста Уитстона (рис.4.), включив в плечи  $r_1$ , и резистор неизвестного сопротивления  $r_x$ .
2. Установив подвижной контакт Д в положение, указанное преподавателем, замкнуть ключ К и в магазине сопротивлений подобрать такое значение  $r_m$ , при котором отсутствует ток через гальванометр.
3. Значения сопротивления  $r_m$  и длина плеч реохорда  $l_2$  и  $l_4$  занести в таблицу.
4. проделать опыт 3 раза.
5. подобным же образом осуществить измерения сопротивления второго резистора  $r_{x2}$ , сопротивления последовательно соединенных первого и второго  $r_{x \text{ посл}}$ , сопротивления параллельно соединенных первого и второго резисторов  $r_{x \text{ парал}}$ .
6. Вычислить значения сопротивлений.

Примечание: Измерения проводить при положениях движка реохорда, близких к середине.

Таблица

	№	Результаты измерений			$r_x$	$\Delta r_x$	$r_x \phi \pm \Delta r_x$ ср
		$r_m$	$l_2$	$l_4$			
$r_{x1}$	1						
	2						
	3						
$r_{x2}$	1						
	2						
	3						
$r_{x посл}$	1						
	2						
	3						
$r_{хнар.}$	1						
	2						
	3						

### Контрольные вопросы

1. Что представляет собой уравновешенный и неуравновешенный мост Уитстона ?
2. Правила Кирхгофа.
3. Вывод расчетной формулы.
4. Точность метода Уитстона.
5. Последовательное и параллельное соединение проводников.

## РАБОТА № 24. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА ПРИ ПОМОЩИ МОСТИКОВОЙ СХЕМЫ

**Цель работы:** Изучение электроёмкости конденсаторов.

**Принадлежности:** реохорд, источник переменного тока, конденсаторы, осциллограф.

### Теоретическое введение

Опыт показывает, что разные проводящие тела, будучи заряжены одинаковым количеством электричества, приобретают различные потенциалы. Это указывает на то, что такие тела отличаются друг от друга некоторым физическим свойством, которое принято характеризовать величиной, называемой электрической емкостью.

Емкость тела зависит не только от размеров и формы самого тела, но также от расположения других окружающих его тел.

Определим вначале емкость уединенного тела, т.е. такого тела, вблизи которого нет никаких других тел, которые могли бы повлиять на распределение на нем электрических зарядов.

Между потенциалом уединенного заряженного тела  $\varphi$  и величиной его заряда  $q$  существует линейная зависимость:

$$q = C\varphi \quad (1)$$

Действительно, при увеличении поля  $\vec{E}$  увеличивается прямо пропорционально ему. Например, для точечного заряда:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$$

Пропорционально увеличивается и работа по перемещению единичного положительного заряда от данного тела в бесконечность, т.е. увеличивается потенциал тела.

Коэффициент пропорциональности  $C$  зависит от геометрических размеров и формы проводящего тела и называется его электроемкостью. Из равенства (1)

$$C = \frac{q}{\varphi} \quad (2)$$

Это соотношение указывает на то, что емкость уединенного проводящего тела есть физическая величина, численно равная количеству электричества, которое надо сообщить ранее незаряженному телу, чтобы потенциал его принял значение равное единице (при  $\varphi=1$ ,  $c=q$ ).

Отсюда же следует, что за единицу емкости можно принять емкость такого тела, потенциал которого изменяется на 1В при сообщении ему заряда в 1 Кулон. Эта единица в системе СИ называется фарадой (Ф)

$$1\text{Ф} = \frac{1\text{Кл}}{1\text{В}}$$

Уединенные тела обладают малой емкостью. Даже шар таких размеров, как Земля, имеет емкость всего лишь около 700 мкФ. Вместе с тем на практике возникает необходимость в устройствах, которые при небольшом,

относительно окружающих тел, потенциале накапливали бы на себе (конденсировали) значительные электрические заряды.

В основу таких устройств, называемых конденсаторами, положен тот факт, что емкость проводящего тела существенно возрастает при приближении к нему других проводящих тел. Конденсаторы выполняются в виде проводников, расположенных близко друг от друга. Образующие конденсатор проводники называются обкладками. Обкладкам придают такую форму и так располагают их друг относительно друга, чтобы поле, было полностью сосредоточено внутри конденсатора. Линии электрического поля при этом начинаются на одной обкладке и заканчиваются на другой. Этому условию удовлетворяют расположенные близко друг к другу две параллельные пластины, два коаксиальных цилиндра или две концентрические сферы. Соответственно этому различают плоские, цилиндрические или сферические конденсаторы.

При зарядке одной обкладке сообщается положительный заряд, а другой – равный по величине отрицательный заряд.

Аналогично соотношению (1), между зарядом конденсатора и разностью потенциалов между его обкладками  $U = \varphi_2 - \varphi_1$  существует линейная зависимость

$$q = CU \quad (3)$$

Емкостью конденсатора называется величина, численно равная количеству электричества, которое необходимо сообщить каждой из обкладок, ранее незаряженного конденсатора, чтобы создать между его обкладками разность потенциалов в 1 Вольт. Величина емкости определяется формулой и размерами обкладок конденсатора, величиной зазора между обкладками, а также диэлектрическими свойствами среды, заполняющей пространство между обкладками.

Определим емкость плоского конденсатора. Если внутренняя поверхность одной обкладки  $S$ , а заряд на ней  $q$ , то напряженность электрического поля между обкладками.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \varepsilon} = \frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon S} \quad (4)$$

где:  $\sigma$  -поверхностная плотность заряда,  $\varepsilon$ -диэлектрическая проницаемость среды:  $\varepsilon_0$ - электрическая постоянная.

Разность потенциала между обкладками

$$U = Ed = \frac{qd}{\varepsilon_0 \varepsilon S} \quad (5)$$

Откуда согласно (3) для емкости плоского конденсатора получаем

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} \quad (6)$$

где  $d$ -величина зазора между обкладками.

Конденсаторы широко применяются в различных электротехнических устройствах. Иногда емкость отдельных конденсаторов бывает недостаточной или, наоборот, слишком большой для данной электрической цепи. В таких случаях конденсаторы соединяют в батареи.

При последовательном соединении конденсаторов (рис.1) емкость отдельных конденсаторов определяется соотношением.

$$\frac{1}{C_{\text{бат}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad (7)$$

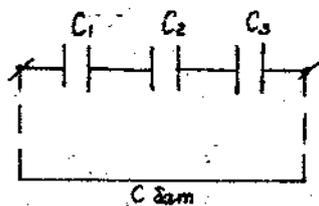


Рис.1

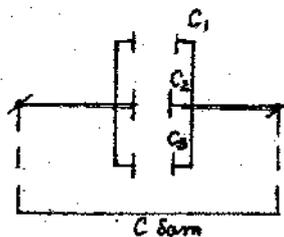


Рис.2

При параллельном соединении конденсаторов (рис.2) емкость батареи  $C_{\text{бат}}$  равна сумме емкостей конденсаторов, составляющих эту батарею.

$$C_{\text{бат}} = C_1 + C_2 + C_3 \quad (8)$$

### Описание установки и методика измерений

Для измерения емкости применяют такую же мостиковую схему как и в работе № 23 (см. теоретическое введение в работе № 23).

Отличие схемы для измерения емкости состоит в том. Что вместо измеряемого сопротивления стоит емкость  $C_x$ , вместо магазина сопротивлений – магазин емкостей, а вместо гальванометра – осциллограф (рис.3).

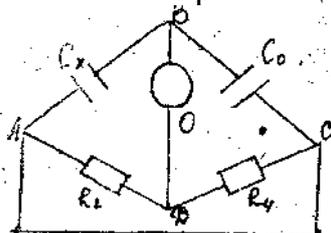


Рис. 3

В соответствии с этим постоянное напряжение заменяется переменным (т.к. конденсатор пропускает только переменный ток), которое фиксируется осциллографом. Участок АДС представляет собой реохорд (рис.4.).

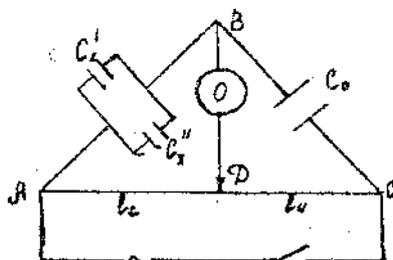


Рис. 4

Емкостное сопротивление в цепи переменного тока определяется формулой

$$r_c = \frac{1}{\omega \tilde{N}} \quad (9)$$

Следовательно

$$r_{\tilde{N} \tilde{O}} = \frac{1}{\omega \tilde{N} \tilde{O}}, \quad r_{\tilde{N} O} = \frac{1}{\omega \tilde{N}_0} \quad (10)$$

где  $\omega=2\pi\nu$  циклическая частота

В соответствии с формулой (13) (см. работу №23) для условия равновесия мостика имеем:

$$r_{\bar{N}\bar{O}} = r_{\bar{N}\bar{I}} \frac{\ell_2}{\ell_4} \quad (11)$$

В итоге получаем:

$$C_x = C_0 \frac{\ell_4}{\ell_2} \quad (12)$$

где  $C_0$  емкость конденсатора из магазина емкостей,  $\ell_2$  и  $\ell_4$  плечи реохорда при получении на экране осциллографа прямой линии (равенство потенциалов точек В и Д).

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему, показанную на рис.4.
2. Для данного  $C_0$ , включив в схему  $C_x$  подвижным контактом Д найти условие равновесия (на экране прямая линия).
3. Значения длин плеч реохорда  $\ell_2$  и  $\ell_4$  записать в таблицу.
4. Те же измерения проделать для конденсатора  $C_x$ .
5. Соединив  $C_x^1$  и  $C_x^{11}$  последовательно, снова добиться равновесия и значения  $\ell_2$  и  $\ell_4$  записать в таблицу.
6. Соединив  $C_x^1$  и  $C_x^{11}$  параллельно, добиться равновесия и определить  $\ell_2$  и  $\ell_4$ .
7. По расчетной формуле (12) подсчитать  $C_x^1$  и  $C_x^{11}$ .

Таблица

	$\ell_2$	$\ell_4$	$C_x$	Проверка
$C_x^1$				
$C_x^{11}$				
$C_x$ посл				$C_{\text{посл}} = \frac{C_{x^1} - C_{x^4}}{C_{x^1} - C_{x^4}}$
$C_x$ парал.				$C_{\text{пар}} = C_1 + C_2$

### Контрольные вопросы

1. Схема мостика Уитстона.
2. Физический смысл емкости тела.
3. Что представляет собой конденсатор?
4. В цепь какого тока включается конденсатор?
5. Вывод расчетной формулы.
6. Чему равно емкостное сопротивление?
7. Единицы измерения емкости проводников.

**РАБОТА № 25**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И МОЩНОСТИ ЛАМПОЧЕК**  
**МЕТОДОМ ВОЛЬТМЕТРА И АМПИЕРМЕТРА**

**Цель работы:** Изучение работы и мощности тока

**Принадлежности:** лампочки накаливания, амперметры, вольтметры, реостат.

**Теоретическое введение**

Направленное движение заряженных частиц под действием внешнего электрического поля называется электрическим током.

Электрический ток в металлах создается электронами. Согласно классической электронной теории электроны проводимости в металле ведут себя подобно молекулам одноатомного идеального газа и называются электронным газом.

Внутри проводника электрическое поле создается источником тока, в результате чего беспорядочное движение электронов становится упорядоченным. Движущиеся электроны на своем пути сталкиваются с ионами в узлах кристаллической решетки. В процессе соударений электроны передают свою энергию ионам, в результате чего ионы переходят в колебательное движение, а это ведет к повышению температуры.

Физическая величина, численно равная количеству теплоты (энергии), выделенной в одну секунду, называется мощностью тока.

Если работа тока за время  $t$  равна  $A$ , то мощность

$$N = \frac{A}{t} \quad (1)$$

Работа тока равна энергии, затраченной зарядами проводника в процессе движения. Если на концах проводника создается разность потенциалов  $\varphi_2 - \varphi_1$ , то при перемещении заряда  $q$  совершается работа

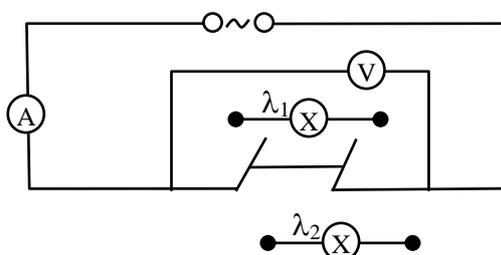
$$A = q(\varphi_2 - \varphi_1) \quad (2)$$

Разность потенциалов на концах проводника называется напряжением

$$U = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (3)$$

Если сила тока неизменна, то

$$q = It \quad (4)$$



Из соотношений (2), (3) и (4) получим

$$A = IUt \quad (5)$$

Это уравнение определяет работу тока. Воспользовавшись (5) и (1), получим мощность

$$N = \frac{A}{t} = IU \quad (6)$$

Итак, для определения мощность лампочки нужно измерить силу тока и напряжение. Сопротивление можно рассчитать по закону Ома

$$R = \frac{U}{I}$$

### **Порядок выполнения работы**

- 1.Собрать электрическую цепь из лампочки неизвестной мощности, амперметра и вольтметра.
2. Измерить силу тока при различных напряжениях (напряжение задаётся преподавателем). Данные измерений занести в таблицу.
3. Аналогично пунктам 1 и 2 провести измерения с другой лампочкой. Данные измерений занести в таблицу.
4. Собрать электрическую цепь из двух последовательно соединенных лампочек неизвестной мощности амперметра и вольтметра
5. Измерить силу тока при различных напряжениях (напряжение задается преподавателем). Данные измерений заносятся в таблицу
6. Аналогично пунктам 4 и 5 провести измерения при параллельном соединении двух лампочек
7. По известным значениям силы тока и напряжения определить сопротивление и мощность лампочек каждой в отдельности и при последовательном и параллельном соединениях.
8. Провести проверку по определению сопротивления при последовательном и параллельном соединениях.
9. Данные проанализировать и объяснить теоретически.

Таблица

1-я лампа				2-я лампа			Последовательное соединение			Параллельное соединение		
U	I	R	N	I	R	N	I	R	N	I	R	N

### **Контрольные вопросы**

1. Сила тока.
2. Классическая электронная теория проводимости металлов.
3. Работа и мощность тока.
4. Единицы измерения работы и мощности тока.
5. Сопротивление проводника. Зависимость сопротивления от температуры.
6. Единицы измерения сопротивления и удельного сопротивления.
7. Последовательное и параллельное соединения проводников.
8. Сопротивление при последовательном и параллельном соединениях проводников.
9. Правила подключения амперметра и вольтметра в электрическую цепь.
10. Правила использования шунта в амперметрах и вольтметрах.

## РАБОТА №26 СНЯТИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАМПЫ – ДИОДА

**Цель работы:** изучение термоэлектронной эмиссии.

**Приборы и принадлежности:** электронная лампа, батарея аккумуляторов на 4-6 В, вольтметр на 150 В, вольтметр на 6 В, миллиамперметр, два реостата, два ключа, источник постоянного напряжения на 120В, амперметр.

### Теоретическое введение

Как показывает опыт, свободные электроны металла при обычных температурах практически не вылетают из него. Следовательно, вблизи поверхности существуют силы, действующие на электроны и направленные внутрь металла. Происхождение сил объясняется двумя причинами. Первая заключается в индукционном действии удаленного из металла электрона, который вызывает на поверхности металла индуцированный заряд противоположного знака. Поэтому между электроном и металлом возникают кулоновские силы притяжения. Вторая причина заключается в том, что некоторые из свободных электронов, совершая тепловое движение, могут выйти за пределы поверхности металла, образуя электронное облако, которое препятствует дальнейшему выходу электронов. Обе эти причины и обуславливают существование скачка потенциала на границе металла. Чтобы преодолеть его, электрон должен обладать достаточным запасом кинетической энергии. Для вырывания электрона из металла нужно совершить определенную работу  $A$ , называемую работой выхода электрона:

$$A = q_e \varphi$$

где  $q_e$  - заряд электрона,  $\varphi$  - поверхностная разность потенциалов.

Условие, при котором электрон может вылетать из металла, имеет вид:

$$\frac{m v_n^2}{2} \geq q_e \varphi$$

где  $m$  – масса электрона,  $v_n$  – проекция скорости электрона на направление нормали к поверхности металла.

По мере повышения температуры число быстрых электронов возрастает, благодаря чему возрастает и число электронов, вырывающихся из металла. Выход свободных электронов из металла называется эмиссией электронов.

Эмиссия, порождаемая тепловым движением электронов, называется термоэлектронной эмиссией. Интенсивность ее возрастает с увеличением температуры. На явлении термоэлектронной эмиссии основано действие электронных ламп.

Электронная лампа состоит из стеклянного или металлического баллона, из которого тщательно удален воздух (давление  $10^{-8}$ - $10^{-10}$  мм рт.ст.). Внутри баллона помещается несколько электродов, один из которых (катод) выполнен в виде металлической проволоки, накаливаемой электрическим током для создания термоэлектронного облака в баллоне. В простейшей электронной

лампе (диоде) катод в виде тонкой нити располагается внутри другого металлического электрода-анода, имеющего цилиндрическую форму или форму, близкую к цилиндрической (рис.1)

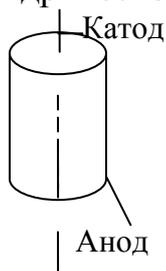


Рис.1

Катод нагревается с помощью добавочной накальной батареи  $E_k$ .

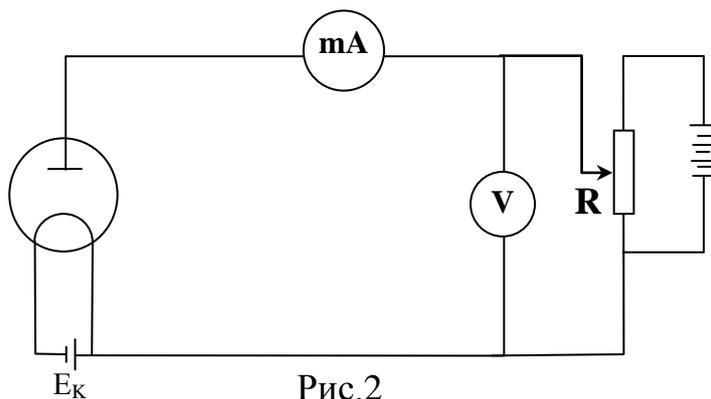


Рис.2

После включения батареи  $E_k$  из накаливаемого катода вылетают свободные электроны, небольшая часть которых попадает на анод, и миллиамперметр, включенный во внешнюю цепь между анодом и катодом, покажет очень малый ток  $I_a$  (рис.2).

Если между анодом и катодом включить источник  $E_a$ , соединив катод с отрицательным полюсом анодной батареи, а анод с положительным, то возникшее электрическое поле будет ускорять вылетевшие электроны: анодный ток увеличится. При увеличении напряжения  $U_a$  при помощи потенциометра  $R$  анодный ток будет расти до некоторого предела  $I_n$ , после чего дальнейшее повышение напряжения  $U_a$  не будет приводить к увеличению тока. Ток  $I_n$  называется током насыщения. Насыщение происходит потому, что число электронов, вылетающих с поверхности нити в секунду, имеет предельную величину, зависящую от температуры нити, и при напряжении  $U_a$ , соответствующем току  $I_n$ , все вылетевшие электроны попадают на анод.

Таким образом, анодный ток может изменяться при изменении анодного напряжения и температуры нити. Если задать определенное напряжение накала  $U_n$ , установив тем самым постоянную температуру нити, а напряжение на аноде  $U_a$  изменять, то анодный ток  $I_a$  будет зависеть от изменяемого анодного напряжения  $U_a$

$$I_a = f(U_a)$$

Эта зависимость называется вольт-амперной характеристикой лампы.

Для разных температур нити накала анодные характеристики при низких напряжениях  $U_a$  совпадают, а при дальнейшем увеличении напряжения

переходят в прямые, параллельные оси абсцисс, ординаты которых соответствуют току насыщения при данной температуре (рис.3)

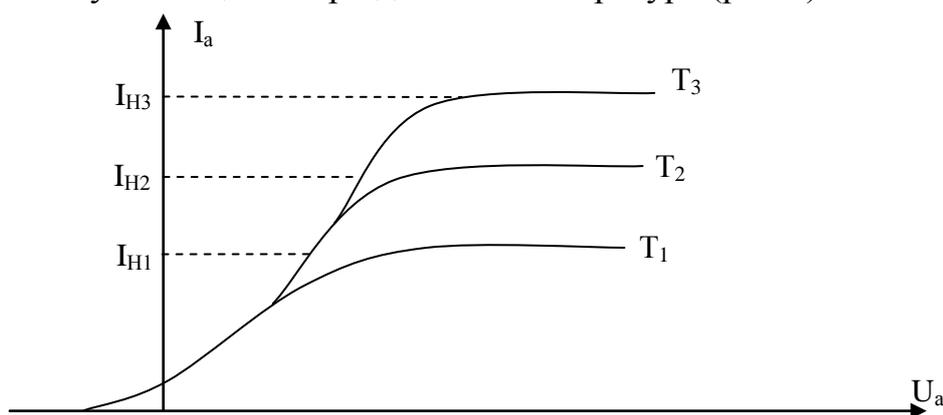


Рис.3

Как следует из рисунка 3 при малых напряжениях с ростом  $U_a$  анодный ток  $I_a$  быстро возрастает. Это объясняется тем, что с увеличением электрического поля растет число электронов, достигающих анода. Это приводит к постепенному рассасыванию электронного облака до полного его исчезновения при установлении тока насыщения. Зависимость анодного тока  $I_a$  от анодного напряжения  $U_a$  до достижения тока насыщения выражается законом Багуславского-Ленгмюра (закон трех вторых)

$$I_a = BU_a^{\frac{3}{2}}$$

Где константа  $B$  зависит от размеров и взаимного положения электродов. Плотность тока насыщения  $j_H = \frac{I_H}{S}$  определяется формулой Ричардсона-Дёшмана

$$j_H = CT^2 e^{-\frac{A}{kT}},$$

где  $S$  – площадь катода,  
 $C$  – эмиссионная постоянная,  
 $T$  – абсолютная температура,  
 $A$  – работа выхода электрона,  
 $k$  – постоянная Больцмана.

Если напряжение между анодом и катодом приложить в обратном направлении, то электрическое поле будет тормозить электроны и они не будут достигать анода; говорят, что лампа «заперта».

Для снятия вольт-амперных характеристик диода собирают приборы по схеме (рис.4).

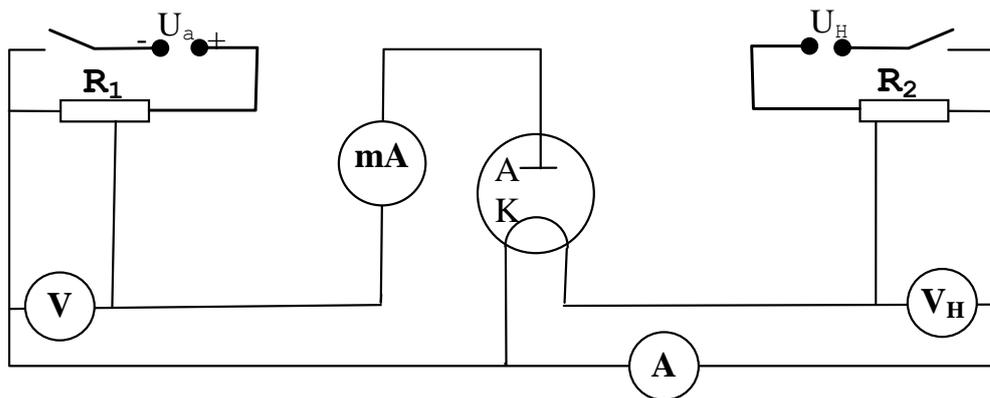


Рис. 4

### Порядок выполнения работы

1. Потенциометром  $R_2$  установить наименьшее из заданных преподавателем напряжений накала.
2. включить анодное напряжение и с помощью потенциометра изменить его скачками по 10 В от 0 до максимальной величины (до установления тока насыщения), производя отсчеты анодного тока по миллиамперметру для каждого анодного напряжения.
3. Аналогично произвести измерения анодного тока для двух больших значений накала.
4. Результаты измерений записать в таблицу.
  
5. По полученным данным построить семейство вольт-амперных характеристик.

### Контрольные вопросы

1. Какое явление носит название термоэлектронной эмиссии? Дать объяснение. От чего зависит ее интенсивность?
2. Что такое работа выхода электрона из металла и от чего она зависит?
3. Объяснить устройство и принцип действия диода.
4. Что такое вольт-амперная характеристика лампы? Как ее получить?
5. Каким законам подчиняется ток через диод? Записать их формулы.
6. какой ток называется током насыщения? Объяснить его зависимость от температуры катода.
7. Нарисовать принципиальную схему для получения вольт-амперной характеристики диода.
8. Что означают слова «лампа заперта»?
9. Почему снятие вольт-амперных характеристик нужно начинать с меньших значений  $U_a$  ?

## РАБОТА №27

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШКИ И СДВИГА ФАЗ МЕЖДУ ТОКОМ И НАПРЯЖЕНИЕМ

**Цель работы:** изучение явления самоиндукции.

**Принадлежности:** катушка индуктивности, амперметры, вольтметры, ползунковый реостат, ключ.

#### Теоретическое введение

В замкнутом контуре, находящемся в переменном магнитном поле, возникает электродвижущая сила электромагнитной индукции  $\varepsilon_{\text{инд}}$ . Явление возбуждения  $\varepsilon_{\text{инд}}$  в замкнутом контуре при изменении магнитного потока, пронизывающего контур, называется электромагнитной индукцией.

Величина э.д.с. индукции пропорциональна скорости изменению магнитного потока

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Это математическое выражение основного закона электромагнитной индукции в форме, данной Максвеллом (закон Фарадея-Максвелла). Коэффициент пропорциональности в законе Фарадея-Максвелла равен единице при измерении всех величин либо в «СИ», либо в «СГС» системе. Знак «минус» для э.д.с. индукции является математическим выражением закона (правила) Ленца: «индукционный ток всегда направлен так, чтобы своим действием препятствовать причине, его вызвавшей». Иными словами, индукционный ток направлен таким образом, чтобы создаваемое им магнитное поле было направлено против вызвавшего этот ток изменения магнитного потока. Этот закон вытекает из закона сохранения энергии.

Индукционный ток находится по закону Ома делением э.д.с. индукции на сопротивление контура.

При изменении силы тока в контуре изменяется и его собственный магнитный поток и, следовательно, в контуре индуцируется э.д.с. Индукционная э.д.с., возникающая в контуре с током при изменении этого тока, называется э.д.с. самоиндукции, а само явление – явлением самоиндукции.

Поток, связанный с контуром, пропорционален току в контуре, т.е.

$$\Phi = LI \quad (2)$$

$$\Phi = BS, \quad B = \mu\mu_0 \cdot H, \quad dH = k \frac{d\ell \sin\alpha}{r^2}$$

Подставив выражение (2) в формулу (1), определим э.д.с. самоиндукции:

$$\varepsilon_c = -L \frac{dI}{dt} \quad (3)$$

Э.д.с. самоиндукции пропорциональна скорости изменения силы тока. Коэффициент пропорциональности  $L$  называется коэффициентом самоиндукции или индуктивностью катушки, который зависит от формы, размеров проводника и от магнитной проницаемости среды ( $\mu$ ).

Если  $\varepsilon_c = 1B$ ,  $\frac{dI}{dt} = 1 \frac{A}{C}$ , то  $L = 1$  Генри (Гн)

Таким образом, индуктивностью в  $1 \text{ Гн}$  обладает такой проводник, в котором изменение силы тока в  $1 \text{ А}$  за  $1 \text{ с}$  вызывает э.д.с. самоиндукции в  $1 \text{ В}$ .

У линейных проводников коэффициент самоиндукции мал. Большими  $L$  обладают катушки индуктивности с большим числом витков. Железный сердечник значительно увеличивает индуктивность катушки. В цепи постоянного тока катушка обладает омическим сопротивлением  $R$ , которое называют активным. Если включить эту катушку в цепь переменного тока, то вследствие периодического изменения силы тока возникает э.д.с. индукции, препятствующая приложенному напряжению: замедляет его возрастание или убывание. Это приводит к увеличению сопротивления катушки: теперь катушка обладает не только активным, но и индуктивным (реактивным) сопротивлением  $R_L$ .

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из последовательно включенных сопротивления  $R$  и катушки с индуктивностью  $L$ . (рис.1)

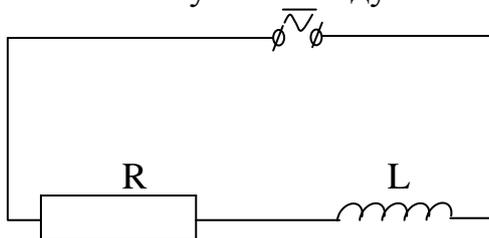


Рис.1

Ток в цепи изменяется по синусоидальному закону

$$I = I_0 \sin \omega t \quad (4)$$

так как э.д.с. источника

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (5)$$

где  $I_0, \varepsilon_0$  – амплитудные значения тока и э.д.с.,  
 $\omega$  – циклическая (круговая) частота.

При прохождении переменного тока в катушке возникает э.д.с. самоиндукции  $\varepsilon_c$ .

По второму закону Кирхгофа для замкнутого контура

$$IR = \varepsilon + \varepsilon_c \quad (6)$$

или, учитывая (3) и (5),

$$IR = \varepsilon_0 \sin \omega t - L \frac{dI}{dt} \quad (7)$$

Подставляя вместо  $I$  его выражение из (4), получим:

$$RI_0 \sin \omega t + LI_0 \omega \cos \omega t = \varepsilon_0 \sin \omega t$$

на

$$\cos \omega t = \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right)$$

поэтому последнее равенство можно записать в виде

$$RI_0 \sin \omega t + L\omega I_0 \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (8)$$

Первый член представляет собой падение напряжения на омическом сопротивлении  $R$ , второй член – падение напряжения на индуктивности

$$L\omega I_0 \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_L;$$

$L I_a \omega = U_{0L}$  – амплитудное значение индуктивного напряжения. Учитывая закон Ома, получаем

$$R_L = L \omega \quad (9)$$

Индуктивное сопротивление увеличивается с возрастанием  $\omega$ . При  $\omega=0$   $R_L = 0$ , т.е. постоянному току индуктивность оказывает только омическое сопротивление. Из сопоставления первого и второго членов формулы (8) следует, что падение напряжения на индуктивности опережает по фазе на  $\pi/2$  падение напряжения на омическом сопротивлении. Для определения полного напряжения удобно воспользоваться методом векторных диаграмм. Отложим амплитудное значение падения напряжения на омическом сопротивлении по горизонтальной оси, тогда индуктивное напряжение нужно отложить против часовой стрелки под углом  $\pi/2$ , т.к. фазы их отличаются на  $\pi/2$ . Полное напряжение изобразится на диаграмме равнодействующей этих двух векторов (рис.2), т.е.

$$U_0 = \sqrt{I_0^2 R^2 + I_0^2 \omega^2 L^2} \quad (10)$$

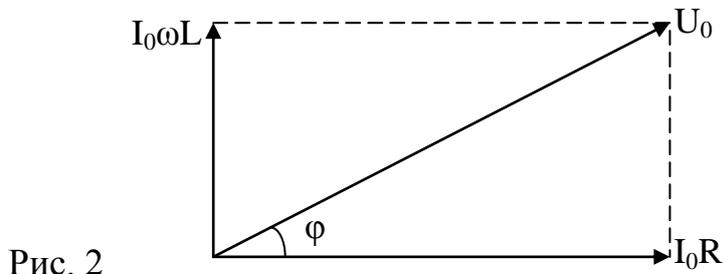


Рис. 2

Из (10) следует  $I_0 = U_0 / \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (11)$

Величина  $Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} \quad (12)$

Определяет полное сопротивление в цепи переменного тока с самоиндукцией.

Аналогично графически можно определить полное сопротивление в цепи переменного тока с самоиндукцией по омическому сопротивлению  $R$  и индуктивному сопротивлению  $L\omega$

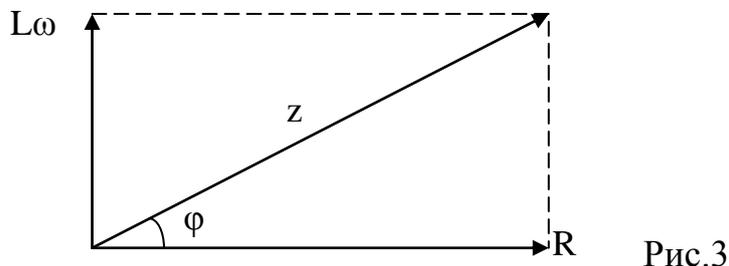


Рис.3

Измерительные приборы регистрируют не максимальные значения силы тока и напряжения, а их эффективные значения  $I_{эф}$  и  $U_{эф}$ . За эффективное значение переменного тока принимают такое значение постоянного тока, тепловое действие которого равно тепловому действию переменного тока. Таким образом, количество выделяющегося тепла в цепи переменного тока определяется лишь эффективной силой тока  $I_{эф}$  (эффективным напряжением

$U_{эф}$ ) и омическим сопротивлением  $R$ . Индуктивное сопротивление  $L\omega$  никакой роли в процессе выделения тепла не играет. Поэтому оно иногда называется безваттным сопротивлением. Если омическое сопротивление цепи  $R$  мало, то мало и количество выделяемого в ней тепла; общее же сопротивление  $Z = \sqrt{R^2 + L^2\omega^2}$  такой цепи может быть велико, если велика ее индуктивность и частота переменного тока.

Расчет показывает, что

$$I_{эф} = \frac{I_c}{\sqrt{2}} \quad (13)$$

$$U_{эф} = \frac{U_c}{\sqrt{2}} \quad (14)$$

Подставляя значения  $I$  и  $U_0$  из формул (13) и (14) в (II), получим закон Ома для цепи переменного тока, обладающей омическим и индуктивным и индуктивным сопротивлениями:

$$I = \frac{U_{эф}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

Рассчитав по измеренным  $I_{эф}$  и  $U_{эф}$  общее сопротивление  $Z$  можно определить индуктивность катушки:

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega}$$

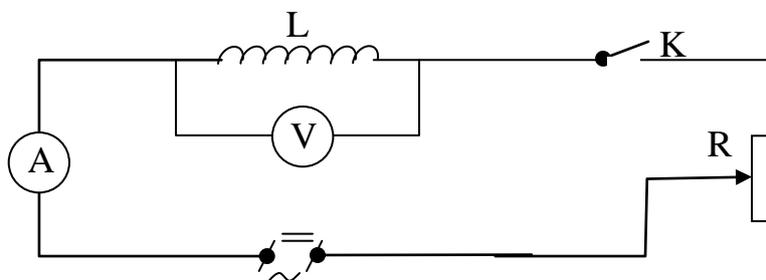
Где  $\omega = 2\pi\nu$  (для городской сети  $\nu = 50$  Гц).

Согласно рис.2, тангенс угла сдвига фаз между напряжением и током равен

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{L\omega}{R}$$

### Порядок выполнения работы.

1. Собрать электрическую цепь по схеме



$A$  и  $V$ - амперметр и вольтметр,  $L$ - исследуемая катушка,  $R_1$ - ползунковый реостат,  $K$ - ключ.

2. Подключить схему к источнику постоянного тока. При определенных (заданных преподавателем) значениях напряжения измерить силу тока и определить омическое сопротивление по формуле  $R=U/I$ .

3. Переключить схему к источнику переменного тока. При тех же значениях напряжения измерить силу тока и определить общее сопротивление по формуле  $Z = U_{\text{эф}} / I_{\text{эф}}$ .

4. Подставив в формулу (16) средние значения  $Z$  и  $R$ , определить  $L$  в Генри.

5. По формуле (17) найти  $\text{tg}\varphi$

6. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

N	Постоянный ток			Переменный ток			t	tgφ	φ
	U	I	R	$U_{\text{эфф}}$	$I_{\text{эфф}}$	Z			

### Контрольные вопросы.

1. В чем заключается явление электромагнитной индукции и самоиндукции?
2. Сформулируйте основной закон электромагнитной индукции.
3. Объясните правило Ленца.
4. От чего зависит индуктивность катушки и в каких единицах она измеряется?
5. Объясните возникновение индуктивного сопротивления.
6. Почему его называют безваттным?
7. Выведите формулу для индуктивного сопротивления. От чего оно зависит?
8. Запишите закон Ома для цепи переменного тока, содержащей омическое и индуктивное сопротивления.
9. Дайте определения  $I_{\text{эф}}$  и  $U_{\text{эф}}$ . Как они связаны с амплитудными значениями  $I_0$  и  $U_0$ ?
10. Почему возникает сдвиг фаз между током и напряжением? От чего зависит величина сдвига фаз?

## РАБОТА №28

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ С ПОМОЩЬЮ ТАНГЕНСА-БУССОЛИ

**Цель работы:** Определение напряженности магнитного поля Земли.

**Принадлежности:** компас, круговой проводник с током, гальванометр, реостат, ключ.

#### Теоретическое введение.

Земля представляет собой естественный магнит, полюса которого располагаются недалеко (300 км) от географических полюсов. Магнитный полюс земли, который расположен на севере, называется южным магнитным полюсом, другой, соответственно на юге-Северным магнитным полюсом.

Через магнитные полюса земли можно провести линии больших кругов- магнитные меридианы, перпендикулярно к ним- линию большого круга- магнитный экватор- и параллельно последнему линии малых кругов- магнитные параллели. Таким образом, каждой точке земли будут соответствовать не только географические, но и магнитные координаты.

Если в данной точке земли свободно подвесить магнитную стрелку (подвесить за центр масс так, чтобы она могла поворачивается и в горизонтальной и в вертикальной плоскостях), то она установится по направлению напряженности магнитного поля земли в данной точке.

Магнитное поле земли подобно полю прямого магнита. Поэтому силовые линии этого поля лишь на магнитных полюсах вертикальны, а на магнитном экваторе горизонтальны (рис.1).

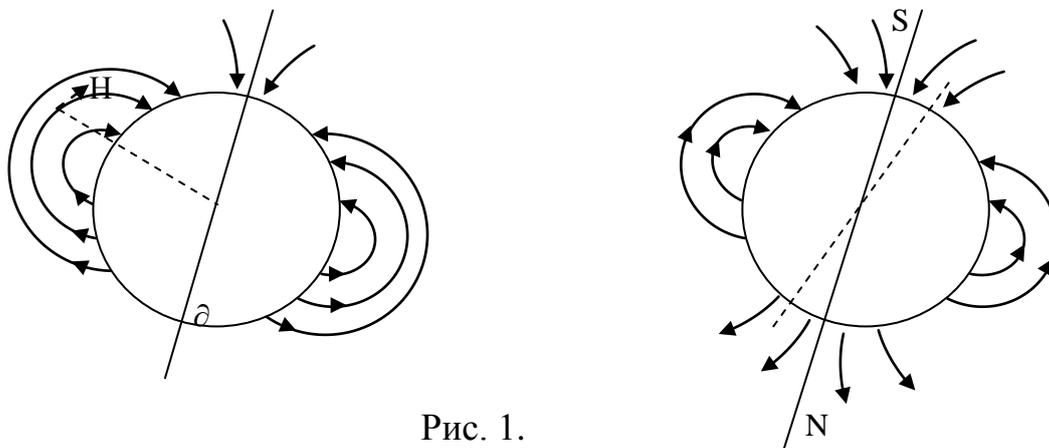


Рис. 1.

В любой другой точке земной поверхности силовая линия и, следовательно, свободно подвешенная стрелка располагаются под каким-то углом к вертикали в этой точке земли и, значит, под каким-то углом к горизонтальной плоскости в данной точке. Из-за несовпадения магнитных и географических полюсов земли не совпадают и плоскости магнитного и географического меридианов, проходящих через данную точку земной поверхности. Таким образом, положение свободно расположенной магнитной стрелки характеризуется двумя углами  $\alpha$  и  $\beta$ , определенными для данной точки земли. Магнитное склонение  $\alpha$ - угол между направлениями географического и магнитного меридианов (рис.2)

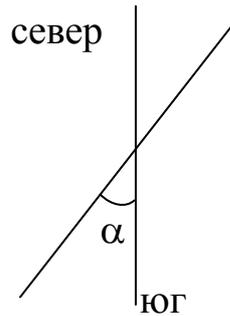


Рис. 2

Различают восточное и западное склонение (северный полюс стрелки отклоняется соответственно вправо или влево от географического меридиана).

Магнитное наклонение  $\beta$ - угол между направлениями напряженности магнитного поля в данной точке и горизонтальной плоскостью (рисю.3)

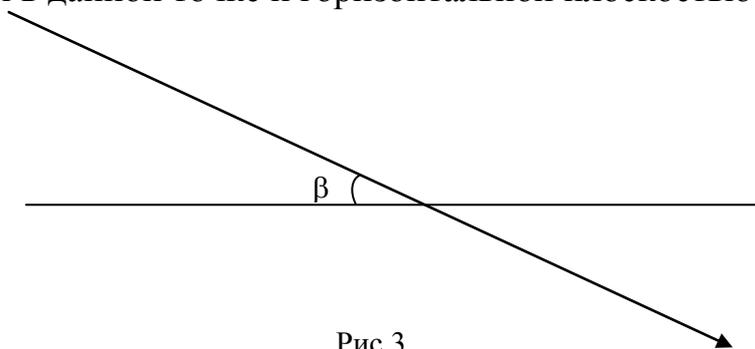


Рис.3

Наклонение бывает северное и южное (северный или южный конец стрелки ниже горизонтальной плоскости).

Горизонтальная составляющая  $H_0$ , магнитное склонение  $\alpha$  и наклонение  $\beta$  называются элементами земного магнетизма. Точные измерения элементов земного магнетизма помогают обнаруживать железорудные ископаемые. Знание их помогает ориентации на местности, морской и воздушной навигации, в ориентации и маневре космических аппаратов. Магнитное поле земли подвержено суточным, годовым, вековым колебаниям. Соответственно меняются и элементы земного магнетизма.

Кроме того, наблюдается кратковременные отклонения- так называемые магнитные бури, появление которых связано с деятельностью солнца, в частности с числом солнечных пятен.

Существующие в настоящее время теории земного магнетизма можно разбить на две группы:

1. Теории, объясняющие наличие магнитного поля электрическими токами, циркулирующими на больших глубинах в жидком ядре земли.
2. Теории, основанные на предположении, что земная кора содержит в разных своих участках различное количество магнитных пород.

Однако происхождение магнитного поля земли пока еще не выяснено. Напряженность магнитного поля у поверхности земли возрастает от экватора к полюсу с 33,4 до 55,7 А/м (от 0,42 до 0,70 Э). Лишь в отдельных районах

магнитных аномалий (как курская) она может быть над мощными пластами железных руд в 2-3 раза больше.

Так как вектор напряженности магнитного поля в данной точке наклонен, то он имеет горизонтальную и вертикальную составляющие. Следовательно, магнитная стрелка, вращающаяся на закрепленной вертикальной оси, устанавливается в плоскости магнитного меридиана под действием горизонтальной составляющей магнитного поля земли.

Если с помощью кругового тока около стрелки создать еще одно магнитное поле, то стрелка установится по направлению равнодействующей обоих магнитных полей. Так как поле кругового тока нетрудно вычислить, зная ток, то горизонтальную составляющую земного магнитного поля можно определить по углу отклонения стрелки и величине магнитного поля. Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля земли производится с помощью прибора, называемого тангенс-буссолью. В центре кругового проводника помещена на острие небольшая магнитная стрелка (при достаточно большом радиусе проводника можно считать, что магнитная стрелка находится в однородном магнитном поле). При прохождении тока  $I$  по витку напряженность магнитного поля в его центре может быть определена по закону Био-Савар-Лапласа:

$$H = \frac{I \cdot n}{2r}$$

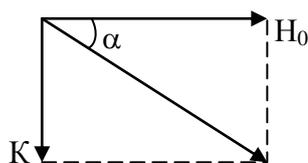


Рис.4

Где  $I$  - сила тока,  $r$  - радиус витка буссоли,  $n$  - число витков.

Если контур буссоли установить в плоскости магнитного меридиана земли, то горизонтальная составляющая магнитного поля земли  $H_0$  и поле кругового тока в центре буссоли окажутся перпендикулярными друг другу.

Тогда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{H}{H_0} \quad \text{и} \quad H_0 = \frac{nI}{2r \operatorname{tg} \alpha}$$

Величина  $\frac{2rH_0}{n} = C$  является постоянной для данного места земного шара и прибора и называется постоянной тангенс-буссоли.

#### **Описание прибора и схемы.**

Тангенс-буссоль состоит из пластмассового кругового каркаса большого диаметра, на котором намотано несколько витков. В центре каркаса помещена магнитная стрелка в футляре (компас) так, что она может свободно вращаться в горизонтальной плоскости. Стрелка освобождается от арретира поворотом стеклянной крышки или специального рычажка.

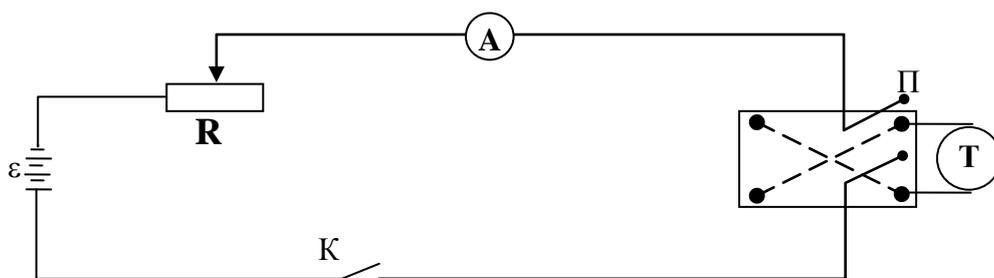


Рис.5

Схема включения приборов:

Т-тангенс-буссоль

П-переключатель

R-реостат

A-амперметр

K-ключ

ε-источник питания

**Порядок выполнения работы.**

1. Составить электрическую цепь по схеме (рис.5).
2. Освободить стрелку от арретира и установить тангенс-буссоль так, чтобы стрелка находилась в плоскости магнитного меридиана. При этом один конец стрелки показывает  $0^{\circ}$ , а другой  $180^{\circ}$ .
3. После проверки электрической цепи включить ток.
4. Реостатом установить ток  $I=0,2$  А и измерить углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  отклонения обоих концов стрелки.
5. Переключателем П изменить направление и отсчитать углы  $\alpha_4$  и  $\alpha_3$  отклонения стрелки в другом направлении при том же токе. Из четырех значений отклонения вычислить среднее значение. Отсчеты четырех углов производятся с целью исключения неточности установки кругового контура в плоскости магнитного меридиана.
6. Аналогичные измерения проводят при токах  $I=0,3; 0,4; 0,5; 0,6$  А.
7. По формуле вычислить горизонтальную составляющую напряженности магнитного поля земли  $H_0$  для каждого измерения, найти среднее значение и определить абсолютную и относительную ошибки.
8. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу.

Таблица

№	I	Отклонение стрелки					tgα	H <sub>0</sub>	H <sub>оф</sub>	ΔH <sub>о</sub>	ΔH <sub>оср</sub>	ε = $\frac{\Delta H_{оср}}{H_{оср}} 100\%$
		α <sub>1</sub>	α <sub>2</sub>	α <sub>3</sub>	α <sub>4</sub>	α <sub>ср</sub>						

### **Контрольные вопросы.**

1. Каковы элементы земного магнетизма?
2. Сформулируйте и запишите закон Био-Савара-Лапласа.
3. Что характеризуют вектора магнитной индукции и напряженности магнитного поля?
4. Почему магнитная стрелка тангенс-буссоли должна быть малых размеров?
5. Выведите формулу напряженности магнитного поля на оси кругового тока.
6. Для чего применяется тангенс-буссоль?
7. Объясните причину повороте стрелки после подачи напряжения на катушку тангенс-буссоли.
8. Дайте вывод рабочей формулы для определения горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля земли?
9. Для чего устанавливается стрелки на нуль?
10. Как определить направление напряженности магнитного поля кругового и прямолинейного тока?

**РАБОТА №29**  
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА**  
**«МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА»**

**Теоретическое введение**

В настоящей работе удельный заряд ( отношение  $\frac{e}{m}$  для электрона) определяется при помощи метода, получившего название «метода магнетрона». Это название связано с тем, что применяемая в работе конфигурация электрического и магнитного полей очень напоминает конфигурацию полей в магнетронах-генераторах электромагнитных колебаний в области сверхвысоких частот. Движение электронов в этом случае происходит в кольцевом пространстве, заключенном между катодом и анодом двухэлектродной электронной лампы. Нить накала лампы /катод/ располагается вдоль оси цилиндрического анода так, что электрическое поле направлено по радиусу. Лампа помещается внутри соленоида, создающего магнитное поле, параллельное катоду.

Рассмотрим траекторию электронов, движущихся под действием электрического и магнитного полей, и силы, действующие на них. Сила, действующая на электрон со стороны электрического поля, направлена по радиусу и определяется формулой

$$F_{эл} = eE, \quad (1)$$

Где  $E$  – напряженность электрического поля в цилиндрическом конденсаторе, образованном катодом и анодом.

Рассмотрим теперь силы, действующие на электрон со стороны магнитного поля. Поскольку магнитное поле в нашем случае направлено по оси  $Z$ , то

$$F_{zмагн} = 0 \quad (2)$$

А в плоскости  $P$  на движущийся электрон действует сила Лоренца

$$F_{лмагн} = eV \vartheta \sin \alpha \quad (3)$$

Где  $e$  – заряд электрона,  $\vartheta$  – скорость электрона,  $B$  – индукция магнитного поля,  $\alpha$  – угол между векторами  $\vartheta$  и  $B$ , равный  $90^\circ$ .

Магнитное поле, действующее на электрон, никакой работы не производит, следовательно, при вылетании с катода электроны обладают запасом кинетической энергии, которая обусловлена только напряжением, приложенным между катодом  $K$  и анодом  $A$ .

$$eU_a = \frac{m\vartheta^2}{2}, \quad (4)$$

Где  $U_0$  – разность потенциалов между катодом и анодом,  $m$  – масса электрона.

Рассмотрим теперь траекторию электронов, вылетающих из катода. В отсутствии магнитного поля (рис.2) траектория электрона прямолинейна и направлена вдоль радиуса  $R$  (прямая 1). При слабом магнитном поле ( $B < B_{кр.}$ ) траектория несколько искривляется (кривая 2) вследствие действия силы Лоренца.

Сила Лоренца перпендикулярна скорости движения электронов и направлению магнитного поля (находится по правилу левой руки с учетом знака заряда электрона) и не меняется по величине. Сила F-центробежная, поэтому

$$e\vartheta B = \frac{m\vartheta^2}{r} \quad (5)$$

При слабом магнитном поле электрон попадает на анод. При некотором критическом значении индукции магнитного поля  $B=B_{кр}$  ( $B=\mu\mu_0H$ ) траектория изменится настолько, что коснется анода (кривая 3).

Для случая  $B=B_{кр}$  радиус траектории  $r = \frac{R}{2}$

Наконец, при  $B>B_{кр}$  электрон вовсе не попадает на анод и возвратится к катоду – анодный ток в лампе прекратится (кривая 4).

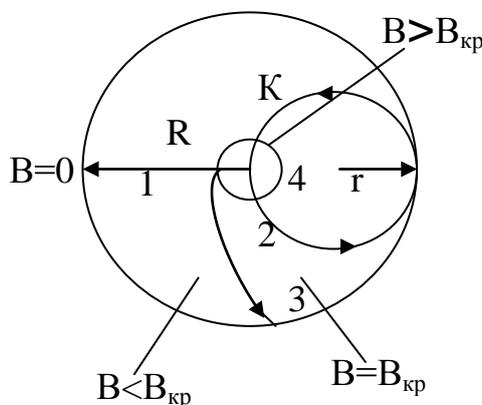


Рис. 2

Электроны, испускаемые нагретым катодом, обладают различными начальными скоростями, поэтому критические условия для разных электронов достигаются при разных значениях.

В работе изучается графическая зависимость анодного тока  $I_a$  от тока соленоида  $I_c$ , т.к. по закону Био-Савара-Лапласа напряженность магнитного поля соленоида прямо пропорциональна силе тока, протекающего по виткам. По графику находится  $I_{c\text{кр}}$ . (рис.3).

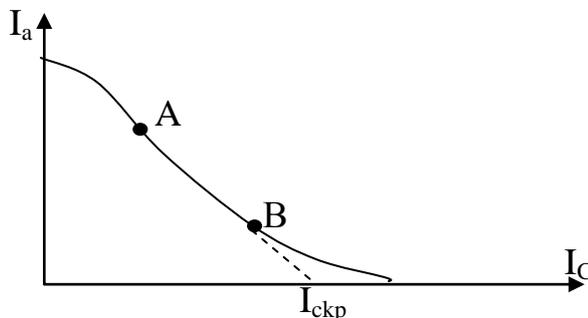


Рис.3

Для определения удельного заряда электрона найдем скорость из формулы (4) и подставим в формулу (5). Так как

$$eU_a = \frac{m\vartheta^2}{r},$$

то

$$g = \sqrt{\frac{2eu_a}{m}}$$

подставляя в (5), получим

$$eB = \frac{m\sqrt{\frac{2eU_a}{m}}}{r},$$

откуда

$$\frac{e}{m} = \frac{2U_a}{B_{кр}^2 \cdot r^2} = \frac{8U_a}{B_{кр}^2 \cdot R^2} \quad (6)$$

где  $R$  – радиус цилиндрического анода,  $B_{кр}$  – критического значение индукции магнитного поля, определяемое по формуле

$$B_{кр} = \mu_0 n I_{с.пр}$$

$\mu_0$  – магнитная постоянная, разная  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м

$n$  – число витков соленоида,

$I_{с.пр}$  – критической ток соленоида.

### Порядок выполнения работы.

1. Ползунки реостатов установить в положение минимального напряжения.
2. Установить катодное напряжение 6 В и анодное 250 В и прогреть лампу в течение 1-2 минут.
3. При помощи реостата установить анодное напряжение 160-190В.
4. Подать напряжение на соленоид.
5. Увеличивая напряжение на соленоиде при помощи реостата, измерить показания токов соленоида и анодного тока и записать их в таблицу.

$I_c$								
$I_a$								

6. Начертить график зависимости анодного тока  $I_c$  от тока, проходящего через соленоид  $I_c$ . При помощи графика найти критический ток  $I_{скр}$ , который определяется точкой пересечения продолжающейся прямой графика с осью абсцисс (рис.3).
7. Определить индукцию магнитного поля  $B_{кр}$  и удельный  $e/m$ .

### Контрольные вопросы.

1. Объяснить метод определения удельного заряда электрона.
2. Охарактеризуйте поведение заряженной частицы в электрическом и магнитном полях.
3. Сила Лоренца.
4. На что тратится энергия электрического и магнитного поля?
5. Вывести формулу для определения удельного заряда электрона.

## РАБОТА № 30. ГРАДУИРОВКА ТЕРМОПАРЫ

**Цель работы:** изучение контактных явлений.

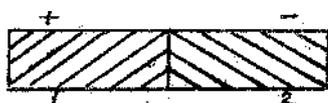
**Приборы и принадлежности:** термопара, милливольтметр (гальванометр), печь, магазин сопротивлений.

### Теоретическое введение

При соприкосновении двух различных металлов, находящихся при одинаковой температуре, между ними возникает разность потенциалов, называемая контактной разностью потенциалов. С точки зрения электронной теории данное явление можно объяснить так:

1. Свободные электроны металла, совершающие тепловое хаотическое движение, при соприкосновении двух металлов будут диффундировать из одного в другой. Однако, встречные диффузионные потоки будут неодинаковы, так как условия перехода неодинаковы.

Электронов больше переходит от того металла, где их концентрация больше в том, в котором концентрация меньше. В результате, металл, в котором концентрация свободных электронов была больше, зарядится положительно, в второй отрицательно. Возникшее электрическое поле вызывает дополнительное движение электронов в обратном направлении, поэтому общее количество электронов, переходящих от 1 к 2 (рис.1), будет уменьшаться, а идущих в противоположном направлении увеличивается



$n_1 > n_2$       рис. 1

При некоторой разности потенциалов  $U_i$  между металлами установится равновесие и потенциалы металлов не будут меняться. Эта разность потенциалов и является внутренней контактной разностью потенциалов обоих металлов.

Вследствие большой тепловой скорости электронов равновесие устанавливается в ничтожные доли секунды. В классической электронной теории состояние свободных электронов отождествляется с состоянием идеального газа, поэтому распределение концентрации определяется законом Больцмана:

$$n = n_0 e^{\frac{W-W_0}{kT}} \quad (1)$$

Где  $n$  и  $n_0$  – концентрации в точках пространства с потенциальной энергией  $W$  и  $W_0$ .

В случае двух соприкасающихся металлов

$$n_1 = n_2 e^{\frac{W_1-W_2}{kT}} \quad (2)$$

а так как

$$W_1 - W_2 = q_2 U$$

то

$$n_1 = n_2 e^{\frac{q_e U_i}{kT}} \quad (3)$$

Отсюда

$$U_i = \frac{kT}{q_e} \ln \frac{n_2}{n_1} \quad (4)$$

Следовательно, чем больше различие в концентрации свободных электронов, тем больше внутренняя контактная разность потенциалов. Величина ее мала, при комнатной температуре  $U_i \sim 10^{-2} - 10^{-3} \text{В}$ .

2. Электронам легче переходить к тому металлу, у которого работа выхода больше (для удаления электрона из этого металла необходимо совершить большую работу).

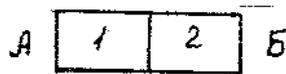


рис.2.

Вследствие неодинаковых значений работы выхода электронов между любыми точками А и Б, находящимися вне металла, но расположенными в непосредственной близости от их поверхностей, возникает разность потенциалов. Ее называют внешней контактной разностью потенциалов  $U_a$ . Между соприкасающимися металлами на внешнем пространстве появляется электрическое поле, а на поверхности металла возникают электрические заряды (рис-3).

$$U_a = \frac{A_2 - A_1}{q_e} = - \frac{A_1 - A_2}{q_e} \quad (5)$$

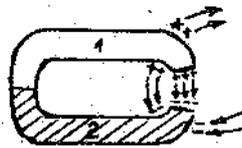


рис.3.

Внешняя контактная разность потенциалов порядка нескольких вольт. Контактная разность потенциалов между металлами 1 и 2 представляет собой алгебраическую сумму  $U_i$  и  $U_a$ .

$$U_{12} = - \frac{A_1 - A_2}{q_e} + \frac{kT}{q_e} \ln \frac{n_2}{n_1} \quad (6)$$

Если составить цепочку из ряда последовательно соединенных различных металлов, то контактная разность потенциалов зависит лишь от крайних металлов, а промежуточные металлы не влияют на нее. Эта закономерность носит название закона Вольта.

$$U_{12} + U_{23} + U_{34} = \frac{kT}{q_e} \left( \ln \frac{n_2}{n_1} + \ln \frac{n_3}{n_2} + \ln \frac{n_4}{n_3} \right) - \frac{A_1 - A_2}{q_e} - \frac{A_2 - A_3}{q_e} - \frac{A_3 - A_4}{q_e} = - \frac{A_1 - A_4}{q_e} + \frac{kT}{q_e} \ln \frac{n_4}{n_1} \quad (7)$$

В замкнутой цепи из двух и большего числа металлов при одинаковой температуре всех контактов сумма контактных разностей потенциалов

равна нулю. Если же температура контактов не одинакова, то цепи возникает термоэлектродвижущая сила. Для цепи из двух различных металлов

$$E = \frac{kT}{q_e} \ln \frac{n_1}{n_2} - \frac{kT_2}{q_e} \ln \frac{n_1}{n_2} = \frac{H}{q_e} \ln \frac{n_1}{n_2} x(T_1 - T_2) = \alpha(T_1 - T_2) \quad (8)$$

(предполагается, что отношение концентраций  $n_1/n_2$  электронов в металле не зависит от температуры). Явление термоэлектричества впервые было обнаружено Зеебексм.

Коэффициент  $\alpha$  в формуле (8) называется дифференциальной термо-э.д.с.:  $\alpha = \frac{dE}{dT}$

Это величина, численно равная разности потенциалов, возникающей при разности температур нагретого и холодного контактов, равной одному градусу.

Термоэлектрические явление в металлах используются для измерения температур. Для этого применяются термопары. Схема простейшей термопары изображена на рис.4.



Рис. 4.

Термопара состоит из двух разных металлов А и Б, спаянных с одного конца. Другие концы металлов присоединены к цепи милливольтметра или другого измерителя напряжения. Спаянный конец термопары помещают в пространство, температуру  $T_1$  которого надо измерить относительно температуры  $T_2$ , например, комнатной.

Термопары обладают большой чувствительностью и широким диапазоном (термопара железо-константан имеет чувствительность  $5,3 \cdot 10^{-5}$  В/град и применяется для измерения температур до  $500^0$  С). для каждого температурного интервала подбирается наиболее подходящая пара металлов.

В работе производится градуировка термопары, т.е. определение экспериментальным путем зависимости термоэлектродвижущей силы  $\epsilon$ , возникающей в термопаре, от разности температур  $\Delta T$  ее спаев. Зависимость  $\epsilon$  от  $T$  в общем случае является нелинейной, но почти каждая термопара имеет линейный участок. При достаточно больших температурах величина термо-э.д.с. начинает падать.

### Описание установки и метода работы

Градуировка термопары производится при помощи следующей схемы (рис.5.)

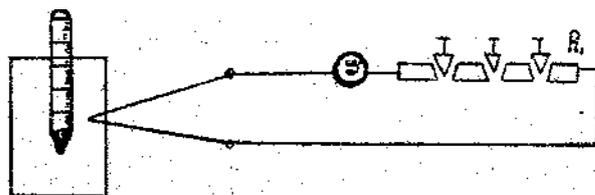


Рис. 5

Горячий спай помещается в печь, снабженную термометром. Холодные спаи имеют комнатную температуру. Если магазин сопротивлений  $R_1$  выключен из цепи, то ток, идущий через гальванометр, равен

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{R_0} = K_i n_1$$

где  $R_0$  – сопротивление гальванометра, термопары и подводящих проводов,  $K_i = 10^{-6}$  А/дел – цена деления гальванометра  $\gamma$ . При этом стрелка гальванометра отклонится на  $n_1$  делений. Если, не изменяя температуры спаев, включить магазин, то

$$I_2 = \frac{\varepsilon}{R_0 + R_1} = K_i n_2$$

где  $R_1$  – сопротивление магазина.

Исключая из полученных уравнений  $R_0$ , находим

$$\varepsilon = K_i \frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 - n_2} R_1$$

Сравнивая с формулой (8), получаем, что

$$\alpha = \frac{K_i R_1}{t_1 t_2} \cdot \frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 - n_2} \quad (9)$$

Сопротивление  $R_1$  подбирается таким образом, чтобы сила тока в цепи уменьшилась примерно в два раза.

### Порядок выполнения

1. Собрать схему (рис.5.)
2. Включить печь следить за температурой и начиная от  $40^{\circ}\text{C}$  через каждые  $10^{\circ}\text{C}$  производить отсчет по гальванометру  $n_1$ , сопротивления и  $n_2$ , с сопротивлением  $R_1$ . Отсчеты продолжать до температуры  $90-100^{\circ}\text{C}$ .
3. По термометру определить температуру помещения
4. Построить график зависимости (градуировочный график)

$n_1 = f(t_1 - t_2)$  и по формуле (8) определить постоянную термопары.

5. Результаты измерений и вычислений записать в таблицу.

№	Температуры			Показания гальванометра		$R_1$	$\alpha$	$\alpha_{cp}$	$\Delta\alpha$	$\Delta\alpha_{cp}$	$\frac{\Delta\alpha_{cp}}{\alpha_{cp}}$
	$t_1$	$t_2$	$\Delta t$	$n_1$	$n_2$						

6. Пользуясь градуировочным графиком, определить температуру горячего спая. Для этого по показанию гальванометра на графике найти соответствующее ему  $\Delta t = t_1 - t_2$  а затем  $t_1 = t_2 + \Delta t$

### **Контрольные вопросы**

1. Что называется контактной разностью потенциалов?
2. Какими причинами обусловлена контактная разность потенциалов?
3. Что называется работой выхода?
4. В чем заключается явление термоэлектричества (явление Зеебека)?
5. От чего зависит величина термо - э.д.с.?
6. Что называется термопарой и где она находит применение?
7. Что называют постоянной термопары?
8. Как постоянная термопары определяется в работе? Вывести формулу (9)
9. Как с помощью термопары можно измерить температуру тела?

# Содержание

<b>Введение.....</b>	<b>4</b>
<b>Работа №21. Исследование электростатического поля.....</b>	<b>10</b>
<b>Работа №22. Определение э.д.с. Элемента методом компенсации.....</b>	<b>15</b>
<b>Работа № 23. Измерение сопротивления методом моста уитстона.....</b>	<b>19</b>
<b>Работа № 24. Определение емкости конденсатора при помощи мостиковой схемы. ....</b>	<b>23</b>
<b>Работа № 25. Определение сопротивления и мощности лампочек методом вольтметра и амперметра .....</b>	<b>27</b>
<b>Работа №26. Снятие вольт-амперной характеристики. Электронной лампы – диода.....</b>	<b>29</b>
<b>Работа №27. Определение индуктивности катушки и сдвига фаз между током и напряжением .....</b>	<b>33</b>
<b>Работа №28. Определение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля земли с помощью тангенса-буссоли...38</b>	<b>38</b>
<b>Работа №29. Определение удельного заряда электрона «методом магнетрона» .....</b>	<b>43</b>
<b>Работа № 30. Градуировка термомпары .....</b>	<b>46</b>