

БЕЛОРУССКИЙ ИНСТИТУТ МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

С. И. ДОБРОВОЛЬСКИЙ, Е. Г. ГОЛЬДМАН

РУКОВОДСТВО
к лабораторным работам по физике
Часть II
Электричество и магнетизм

Минск 1968

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Приборы и принадлежности: гальванометр с проводниками и металлическими бандами, лоток с песком и два электрода, цилиндры из проводника и из диэлектрика и два металлических шара.

§ I. Теоретическое введение

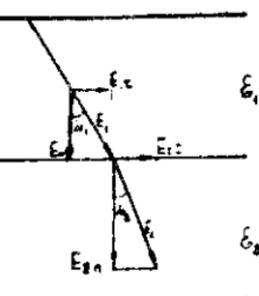
Каждая точка электростатического поля однозначно характеризуется вектором напряженности поля \vec{E} и потенциалом φ . Вектор напряженности поля в данной точке есть величина, численно равная силе, действующей на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля. Направление вектора напряженности совпадает с направлением силы. Потенциал в данной точке численно равен работе, совершаемой силами поля при перемещении единичного положительного заряда из данной точки поля в бесконечность. Наглядное распределение напряженности и потенциала можно получить с помощью силовых линий и эквипотенциальных поверхностей.

Силовой линией называется линия, касательная к которой в любой точке поля совпадает с вектором напряженности. Эквипотенциальной поверхностью называется геометрическое место точек с одинаковыми потенциалами.

Силовые линии всегда нормальны к эквипотенциальным поверхностям. Так, например, проводник, помещенный в электростатическое поле, является эквипотенциальным телом и вблизи его силовые линии перпендикулярны к его поверхности.

На границе раздела двух сред с диэлектрическими постоянными ϵ_1 и ϵ_2 нормальные составляющие вектора напряженности преломляются. Углы, которые образуют силовые линии с нормалью к поверхности раздела, удовлетворяют условию:

$$\epsilon_1 \operatorname{ctg} \alpha_1 = \epsilon_2 \operatorname{ctg} \alpha_2. \quad (1)$$



На границе раздела диэлектриков изменяются также и направления касательных к поверхностям равного потенциала. Углы между касательными к эквипотенциальным поверхностям и направлением нормали к границе раздела будут связаны соотношением:

$$\epsilon_1 \operatorname{ctg} \beta_1 = \epsilon_2 \operatorname{ctg} \beta_2, \quad (2)$$

поскольку в силу ортогональности силовых линий и поверхностей равного потенциала

$$\alpha_1 + \beta_1 = \alpha_2 + \beta_2 = \frac{\pi}{2}.$$

Практическому выполнению задачи следует предпослать следующие существенные замечания.

Ортогональность силовых линий и поверхностей равного потенциала существенно облегчает как экспериментальное, так и теоретическое исследование электростатического поля. Именно, коль скоро найдены значения вектора напряженности поля, облегчается задача нахождения поверхностей равного потенциала. Справедливо и обратное: найденное положение поверхностей равного потенциала позволяет построить силовые линии поля. Последняя возможность имеет практическое значение.

Экспериментально и теоретически обычно легче вести

измерения и расчет потенциалов электрического поля, чем его напряженности. Большинство электроизмерительных приборов применяются для измерения разности потенциалов между различными точками поля, а не напряженности.

Теоретический расчет распределения потенциала как величины скалярной проще расчета векторного поля \vec{E} . Поэтому и в данной задаче экспериментально изучается распределение эквипотенциальных поверхностей в поле, а не напряженностей этого поля.

Силовые линии изучаемых полей строятся как ортогональные линии к экспериментально найденным поверхностям равного потенциала.

Изучение электростатического поля между системой заряженных проводников можно в ряде случаев заменить изучением электростатического поля постоянного тока между той же системой проводников, если потенциалы проводников поддерживаются постоянными и соотношение проводимости среды и проводников допускает предположение об эквипотенциальности последних.

Указанная замена изучения поля неподвижных зарядов изучением поля стационарного тока дает большие экспериментальные преимущества.

Введение в проводящую среду металлических зондов автоматически ведет к выравниванию потенциала зонда с потенциалом точки поля, в которую введен зонд.

В этом случае зонды могут быть соединены с токоизмерительными приборами.

Неизменность потенциалов поля во времени поддерживается батареей.

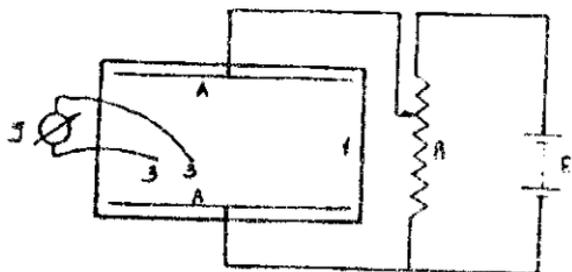


Рис. 2.

Надо иметь в виду, что электрическая цепь зондов должна обладать значительно большим сопротивлением, чем сопротивление проводящих слоев вещества между точками, в которых стоят зонды; в противном случае включение зондов исказит поле.

Практическое осуществление метода измерений будет ясно из описания применяемой установки.

§ 2. Описание прибора

Используемая в задаче электрическая схема изображена на рис. 2, где

AA - электроды;

\mathcal{E} - источник постоянного тока, напряжением около 10-15 в;

З - зонды;

Г - нулевой гальванометр;

R - делитель напряжения;

И - ящик с песком.

Для изучения качественной картины электростатического поля применяется метод зонда. Ящик из диэлектрика засыпается влажным песком, в который вставляются металлические электроды (А). Между ними поддерживается постоянная разность потенциалов при помощи источника постоянного тока (рис 2).

Влажный песок имеет незначительную проводимость по сравнению с металлом, а поэтому металлические электроды можно считать поверхностями равного потенциала, что является принципиально необходимым условием для того, чтобы электрическое поле стационарного тока было одинаково по своему строению с электростатическим полем между теми же электродами. В песке устанавливается постоянный ток. Для изучения распределения потенциалов в поле берут два острых металлических шупа - зонда (З), соединенных с

нулевым гальванометром (рис. 2). Один из них устанавливается вертикально в какой-либо точке поверхности песка, с помощью другого отыскиваются на том же песке точки, для которых гальванометр не дает отклонений. Соединяя эти точки непрерывной кривой, на поверхности песка получают линию равного потенциала.

Указанным способом нужно получить семейство эквипотенциальных кривых. Так как эквипотенциальные кривые и силовые линии взаимно ортогональны, то, как сказано выше, нетрудно графически оформить полученную систему кривых силовыми линиями и получить качественную картину электростатического поля.

Описанный метод исследования электростатического поля имеет не только иллюстративное значение, но широко применяется на практике. Метод этот практически полезен для изучения сложных электростатических полей, точный расчет которых затруднителен из-за сложности граничных условий (многоэлектродные радиолампы в отсутствии объемного заряда, электростатические линзы и т.д.). При этом принципиальное значение имеет правило подобия потенциальных полей, позволяющее в большом масштабе воспроизводить подлежащие изучению поля. Правило подобия утверждает, что если размеры электродов, создающих поле, и все расстояния между этими электродами изменены в одной пропорции, то структура поля остается прежней (то же справедливо и для некоторых задач гидродинамики и теплопроводности).

§ 3. Порядок выполнения работы

1. Подать напряжение на электроды и с помощью делителя напряжения добиться, чтобы при расстоянии между зондами 1-2 см стрелка гальванометра не выходила за пределы шкалы.

2. С помощью зондов найти на песке и зарисовать семейство эквипотенциальных линий в следующих случаях:

а) между параллельными пластинами (плоский конденсатор);

б) между пластинами в песок погрузить металлическое кольцо;

в) между пластинами в песок погрузить кольцо из диэлектрика.

3. Отключить напряжение от пластин и подать его в двум металлическим шарикам, наполовину погрузив их в песок на расстоянии 2-3 см друг от друга (электрический диполь).

Построить для этого случая семейство эквипотенциальных кривых, исследуя поле вокруг шариков.

4. По полученным эквипотенциальным линиям построить линии напряженности.

§ 4. Контрольные вопросы

1. Дать определения напряженности и потенциала электростатического поля, силовой линии и эквипотенциальной поверхности.

2. Как влияют проводники и диэлектрики, помещенные в электростатическое поле, на распределение силовых линий и эквипотенциальных поверхностей?

3. Построить систему силовых и эквипотенциальных линий поля заряженного проводника произвольной формы поля диполя, поля двух точечных положительных (или отрицательных) зарядов.

4. Как изменяется напряженность поля на границе двух диэлектриков?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 22

ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРА ПРИ ПОМОЩИ МОСТИКОВОЙ СХЕМЫ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Приборы и принадлежности: реохорд, телефон, магазин емкостей, суммер или звуковой генератор, два измеряемых конденсатора различной емкости.

§ I. Описание прибора

Мостиковая схема или мостик Уитстона представляет собой схему, употребляемую для сравнения некоторого неизвестного сопротивления R_x с известным сопротивлением R_0 . Принцип действия мостиковой схемы заключается в следующем: цепь, идущая от гальванического элемента E (рис. I), начиная от узла A , разветвляется. Одну ветвь образуют два сопротивления R_x и R_0 , соединенных последовательно. Вторую ветвь — однородный проводник AC (реохорд). В точке B закреплен один зажим гальванометра G . Его второй зажим прикреплен к скользящему контакту D , который может передвигаться вдоль провода AC и таким образом менять отношение со-

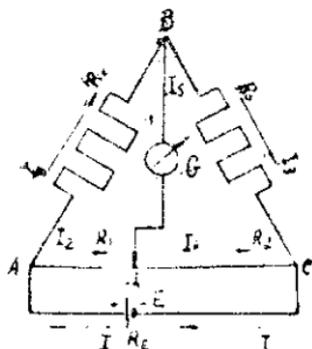


Рис. I

противлений R_1 и R_2 участков АД и ДС. Докажем, что если в участке цепи ВГД отсутствует ток, будет выполняться условие:

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

На участке цепи ВГД ток может быть равен нулю при условии, если между точками В и Д напряжение равно нулю. Следовательно, падение напряжения на участках АВ ($I_1 R_x$), АД ($I_2 R_1$), ВС ($I_3 R_0$) и ДС ($I_4 R_2$) полярно равны.

$$\begin{aligned} I_1 R_x &= I_2 R_1, \\ I_3 R_0 &= I_4 R_2. \end{aligned} \quad (2)$$

Кроме того, в последовательно соединенных участках цепи токи равны (в участке ВГД ток отсутствует), поэтому:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_2, \\ I_3 &= I_4. \end{aligned} \quad (3)$$

Из (2) и (3) следует, что

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{R_1}{R_2}. \quad (4)$$

Равенство (4) можно преобразовать, учитывая, что сопротивление участков АД и ДС пропорционально длинам этих участков (ζ_1 и ζ_2):

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{\zeta_1}{\zeta_2}. \quad (5)$$

Тогда

$$R_x = R_0 \frac{\zeta_1}{\zeta_2}. \quad (6)$$

Конденсатор, включенный в цепь переменного тока, создает в этой цепи определенное сопротивление, называемое емкостным сопротивлением. Величина этого сопротивления определяется формулой

$$Z_x = \frac{1}{C\omega} \quad (?)$$

где C - емкость конденсатора,
 ω - циклическая частота тока.

Измерение емкости в данной работе основано на сравнении емкостных сопротивлений эталонного и исследуемого конденсатора с помощью мостиковой схемы, питаемой переменным током.

Подставляя в (6) вместо R_x и R_0 соответствующие значения емкостных сопротивлений

$$Z_x = \frac{1}{C_x\omega} \quad \text{и} \quad Z_0 = \frac{1}{C_0\omega},$$

получим

$$Z_x = Z_0 \frac{z_1}{z_2}$$

или

$$\frac{1}{C_x\omega} = \frac{1}{C_0\omega} \cdot \frac{z_1}{z_2}$$

выразив из этой зависимости C_x , получим расчетную формулу

$$C_x = C_0 \cdot \frac{z_2}{z_1}, \quad (9)$$

где C_x - емкость исследуемого конденсатора;
 C_0 - емкость эталонного конденсатора;
 z_1 и z_2 - длины плеч реохорда.

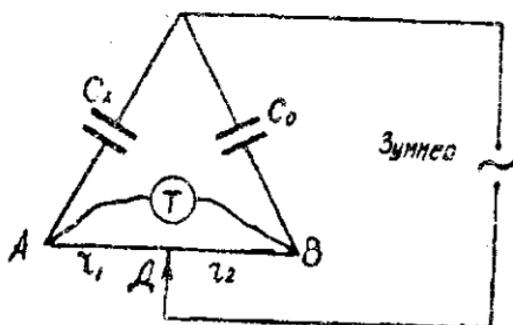


Рис. 2

На рис. 2 приводится мостиковая схема, используемая в данной работе.

- Д - подвижный контакт на реохорде;
- C_1 - исследуемая емкость;
- Т - телефон.

В качестве известной емкости C_0 используется магазин емкости. Включение той или иной емкости достигается перемещением стержня. Каждая пластинка, соединенная со стержнем, соответствует включению емкости в одну десятую мкф (0,1). Источником переменного тока служит зуммер (укреплен на панели). Вместо гальванометра в цепь включается телефон (Т). Отсутствие звука в телефоне указывает, что в ветви с телефоном (АТВ) тока нет, что равнозначно отсутствию тока в цепи гальванометра (рис. 1).

§ 2. Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 2).

В качестве C_x включить один конденсатор.

2. Установить подвижный контакт реохорда на середину шкалы, в магазине емкости подобрать такую емкость C_0 , чтобы звук в телефоне был минимальным. Передвигая подвижный контакт, добиться, по возможности, полного исчезновения звука.

Повторить измерения не менее 4 раз, подбирая при каждом измерении различные C_0 (но не больше 0,6 мкф). Полученные данные занести в таблицу.

3. Измерить емкость второго конденсатора, а затем конденсаторов, соединенных последовательно и параллельно.

4. Подсчитать средние значения измеряемых емкостей и определить погрешности.

	№ измерения	C_0	γ_1	γ_2	C_x	ΔC_x
I-й конденсатор	1					
	2					
	3					
	4					
	Среднее значение					

§ 3. Контрольные вопросы

1. Как с помощью мостиковой схемы измерить сопротивление проводника?

2. Дать определение электроемкости и единиц их измерений.
3. Как использовать мостиковую схему для измерения емкости конденсатора?
4. Вывести формулы для емкости при параллельном и последовательном соединении конденсаторов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 23

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ЭЛЕМЕНТА КОМПЕНСАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Приборы и принадлежности: реохорд, нульгальванометр, аккумулятор, элемент Вестона, исследуемые элементы, перекидной двойной ключ, двойной ключ, соединительные провода.

§ I. Теоретическое введение

Источники тока служат для преобразования неэлектрической энергии в электрическую. В частности, гальванические элементы превращают химическую энергию в электрическую, фотоэлементы - световую в электрическую.

Каждый источник тока характеризуется электродвижущей силой (э.д.с.) Э.Д.С. источника тока есть энергия, расходуемая источником для перемещения единицы заряда по замкнутой цепи.

Закон Ома для замкнутой цепи имеет следующий вид:

$$I = \frac{E}{R + \zeta}, \quad (1)$$

где: I - сила тока;
 E - э.д.с. источника тока;
 R - внешнее сопротивление;
 ζ - внутреннее сопротивление.

Из этого выражения следует, что э.д.с. равна сумме падений напряжений на внешнем и внутреннем участках цепи:

$$E = IR + I\zeta, \quad (2)$$

где $I R = U$ - падение напряжения на внешнем участке цепи;
 $I r = U_2$ - падение напряжения на внутреннем участке
 цепи.

Из последнего выражения следует, что:

$$U_1 = \mathcal{E} - I r, \quad (3)$$

т.е. падение напряжения на внешнем участке цепи U_1 ,
 всегда меньше э.д.с. на величину падения напряжения на внут-
 реннем участке цепи ($I r$). Если цепь разомкнута, то $I = 0$
 и напряжение на зажимах источника тока равно э.д.с. ($U_1 = \mathcal{E}$).

Из приведенных рассуждений следует, что э.д.с. элемен-
 та можно измерить лишь тогда, когда в элементе отсутствует
 ток. В противном случае можно измерить только падение напря-
 жения на внешнем участке цепи.

Компенсационный метод определения э.д.с. дает возмож-
 ность измерить э.д.с. элемента при отсутствии в нем тока,
 применяя приборы, потребляющие ток. Это можно осуществить
 используя следующую схему (рис. I).

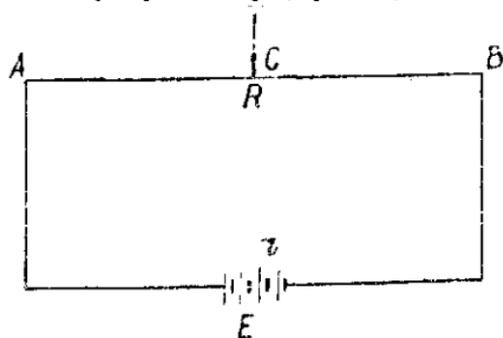


Рис. I.

Если соединить реохорд АВ (длинную однородную проволоку, закрепленную на линейке с делениями) с источником тока (аккумулятором) то по цепи потечет ток

$$I = \frac{E}{R + \zeta}$$

где R - сопротивление реохорда;

ζ - сопротивление аккумулятора;

C - подвижный контакт, который может перемещаться вдоль реохорда.

Падение напряжения IR_{AC} между точками А и С будет зависеть только от сопротивления участка АС, т.е. от положении подвижного контакта С. Дополним схему элементом с определенной э.д.с. (равной E_I) и нульгальванометром, как указано на рис.2.

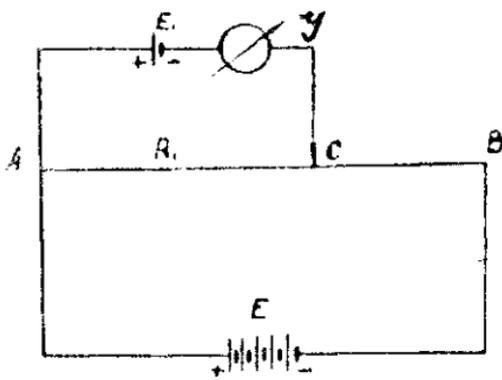


Рис. 2.

Если падение напряжения между точками А и С не будет равно э.д.с. элемента E_I , то в цепи с нульгальванометром потечет ток и стрелка гальванометра отклонится в зависимости от направления тока.

Когда падение напряжения на участке реохорда AC больше э.д.с. элемента E_I , тогда ток потечет в направлении $AE_I C$. Если переместить подвижный контакт C влево, падение напряжения между точками A и C уменьшится, т.к. сопротивление этого участка станет меньше.

Когда падение напряжения между A и C станет меньше E_I , ток потечет в направлении $CE_I A$, и стрелка гальванометра отклонится в другую сторону.

Если э.д.с. аккумулятора E больше э.д.с. элемента E_I ($E > E_I$), всегда можно найти на реохорде такое положение подвижного контакта C, что падение напряжения между A и C окажется равным э.д.с. элемента E_I и в ветви с нульгальванометром и элементом E_I тока не будет. Стрелка не отклонится ни в одну, ни в другую сторону. Э.д.с. элемента E_I в этом случае компенсируется падением напряжения на участке реохорда AC.

Если сопротивление участка реохорда AC равно R_1 , а падение напряжения на этом участке IR_1 равно э.д.с. элемента E_I

$$E_I = IR_1, \quad (4)$$

то ток можно определить по закону Ома (I).

Сопротивление участка цепи с нульгальванометром и элементом E_I в расчет не принимается, т.к. в этой части цепи ток отсутствует.

Подставляя значения I и (I) в (4) получим:

$$E_1 = \frac{E}{R_1 + R_2} \cdot R_1 \quad (5)$$

Если вместо элемента с э.д.с., равной E_1 , включить другой элемент с э.д.с. E_2 , большей E_1 ($E_2 > E_1$), на реохорде также найдется точка C , падение напряжения между точками C и точкой A будет равно E_2 . Если обозначить сопротивление участка реохорда AC через R_2 , то, рассуждая аналогично предыдущему, получим, что э.д.с. второго элемента E_2 окажется равной

$$E_2 = I R_2 \quad (6)$$

или

$$E_2 = \frac{E}{R_1 + R_2} \cdot R_2 \quad (7)$$

Разделив почленно равенство (5) на (7), получим:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (8)$$

Учитывая, что $R_1 = \rho \frac{l_1}{\delta}$, а $R_2 = \rho \frac{l_2}{\delta}$ где

ρ - удельное сопротивление проволоки реохорда;
 δ - сечение реохорда;

и подставляя эти значения в (8), получим:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{l_1}{l_2} \quad (9)$$

В этой зависимости l_1 и l_2 - длины участков реохорда, соответствующие сопротивлениям R_1 и R_2 .

Используя вместо второго элемента E_2 нормальный элемент Вестона, э.д.с. которого известна, можно из равенства (9) определить э.д.с. неизвестного элемента E_I

$$E_I = E_2 \frac{l_1}{l_2} \quad (10)$$

Обозначив э.д.с. неизвестного элемента через E_X , нормального элемента Вестона через E_0 и соответствующие длины реохорда через l_1 и l_0 , выражение (10) можно представить в следующем виде:

$$E_X = E_0 \frac{l_1}{l_0} \quad (11)$$

Нормальный элемент Вестона при температуре 20°C имеет электродвижущую силу, равную 1,0183 в. От этого элемента нельзя брать большие токи (т.е. замыкать накоротко), т.к. в этом случае он легко поляризуется и необходимо продолжительное время "отдыха" (до нескольких суток) для того, чтобы он принял нормальное значение э.д.с.

Э.д.с. этого элемента зависит от температуры. Эта зависимость дается эмпирической формулой

$$E_0 = [1,0183 - 0,0000106(t - 20)] \text{ вольт} \quad (12)$$

В данной работе температурная зависимость э.д.с. нормального элемента не учитывается, т.к. изменение э.д.с. окажется меньше получаемой погрешности.

§ 2. Описание прибора

При выполнении данной работы необходимо учитывать некоторые условия, вытекающие из приведенных выше рассуждений

1. К концу реохорда, к которому присоединен положительный полюс аккумулятора, должен присоединяться положительный полюс испытуемого и эталонного элементов.

2. Цепь должна замыкаться на короткое время, достаточное только для обнаружения наличия или отсутствия тока в цепи гальванометра.

При более длительном пропускании тока нагреваются проводники, изменяется их сопротивление, а э.д.с. элементов меняется вследствие поляризации.

3. Замыкание цепи аккумулятора должно предшествовать замыканию цепи гальванометра. Это достигается с помощью двойного ключа К.

Для выполнения указанных условий собирается цепь по прилагаемой схеме (рис. 3)

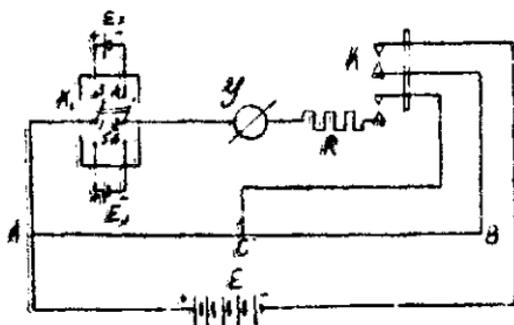


Рис. 3.

В схеме: АВ - реохорд, С - подвижный контакт; Е - аккумулятор; К - двойной ключ, состоящий из деревянной панели с четырьмя клеммами; K_I - перекидной двойной ключ, который позволяет при одном положении рубильника соединять между собой пары клеммы (1,3) и (2,4) и включить в цепь элемент E_X , а при другом положении соединять клеммы (1,5 и 2,6) и включить элемент E_0 , R - дополнительное сопротивление.

§ 3. Порядок выполнения работы

1. Ключом K_I соединить клеммы 1,3 и 2,4, включить в цепь элемент E_X .
2. Перемещая подвижной контакт и замыкая на очень короткое время ключ К, добиться отсутствия отклонения стрелки гальванометра.
3. Измерить по шкале реохорда длину проводника АС (l_x) с точностью до 1 мм..
4. Перекинув рубильник ключа K_I на 180° , включить в цепь нормальный элемент E_0 . Перемещением подвижного контакта С снова добиваются отсутствия отклонения стрелки нульгальванометра.
5. По шкале реохорда измерить l . Измерения повторяют не менее 10 раз.
6. Найти значение E_X для каждого измерения в отдельности.
7. Вычислить среднее значение E_X , и определить погрешности.

8. Определить окончательный результат эксперимента

$$E = (E_{\text{эксп}} \pm \Delta E_{\text{эксп}}) \text{ В.}$$

Все данные занести в таблицу измерений

№ измерения				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
Средние значения				

§ 4. Контрольные вопросы

1. Что такое электродвижущая сила источника тока?
2. Дать вывод рабочей формулы.
3. Почему вольтметром нельзя измерить э.д.с.?
4. В чем сущность метода компенсации?
5. Дать объяснение электрической схеме опыта.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 24

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНЕГО ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

Приборы и принадлежности: универсальный мост для измерения сопротивлений, прибор с измеряемым сопротивлением, термометр, электроплитка.

§ I. Теоретическое введение

Электропроводность металлов обусловлена наличием в металлах свободных электронов. Согласно электронной теории свободные электроны образуют так называемый электронный газ, подчиняющийся законам идеального газа. В отличие от идеального газа, молекулы которого в своем хаотическом движении сталкиваются между собой, электроны сталкиваются с ионами, совершающими колебания в узлах кристаллической решетки.

Для коэффициента электропроводности металлов электронная теория дает следующую зависимость:

$$\lambda = \frac{n e^2 \bar{t}}{2m} \quad (1)$$

где n - число электронов в единице объема;
 e - заряд электрона;
 m - масса электрона;
 \bar{t} - время свободного пробега электрона.

Учитывая, что удельное сопротивление ρ есть величина, обратная коэффициенту электропроводности, находим

$$\rho = \frac{2m}{n e^2 \bar{t}} \quad (2)$$

Из последнего выражения вытекает, что удельное сопротивление ρ , а следовательно и сопротивление R , обратно пропорционально времени свободного пробега электрона. С увеличением температуры возрастает амплитуда колебаний ионов и скорость хаотического движения электронов. Следовательно, время свободного пробега электронов уменьшается, а сопротивление увеличивается.

Зависимость сопротивления проводника R от температуры t характеризуется температурным коэффициентом сопротивления α . Если при температуре $t_0 = 0^\circ\text{C}$ сопротивление проводника равно R_0 , а при температуре t равно R , то приращение сопротивления будет равно $R - R_0$. Разделив $R - R_0$ на начальное сопротивление R_0 и на изменение температуры $t - t_0$, получим выражение для температурного коэффициента сопротивления α :

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 (t - t_0)} \quad (3)$$

Из полученного равенства (3) видно, что температурный коэффициент сопротивления металлов численно равен приращению сопротивления каждой единицы сопротивления, взятой при $t_0 = 0^\circ\text{C}$, при изменении температуры на 1°C .

Опыт показывает, что α при обычных температурах (не очень низких и не очень высоких) для данного вещества можно считать постоянным.

Учитывая, что $t_0 = 0$, из выражения 3 получим, что сопротивление R при температуре t равно:

$$R = R_0 (1 + \alpha t) \quad (4)$$

Если при температуре t_1 сопротивление проводника равно

$$R_1 = R_0 (1 + \alpha t_1) \quad (5)$$

то при более высокой температуре t_2 , оно будет равно

$$R_2 = R_0 (1 + \alpha t_2) \quad (6)$$

Выразив значение R_0 из (5) и подставив в (6), получим:

$$R_2 = \frac{R_1}{1 + \alpha t_1} \cdot (1 + \alpha t_2) \quad (7)$$

Определим из этой зависимости α . Для этого произведем следующие преобразования:

$$R_2 + \alpha t_1 R_2 = R_1 + \alpha t_2 R_1; \quad R_2 - R_1 = \alpha (R_1 t_2 - R_2 t_1),$$

тогда

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1} \quad (8)$$

Выражение (8) может служить рабочей формулой для экспериментального определения температурного коэффициента сопротивления металлов.

§ 2. Описание прибора

Прибор, которым определяют температурный коэффициент сопротивления состоит из стеклянной трубки, на которую намотан исследуемый проводник (рис. I).

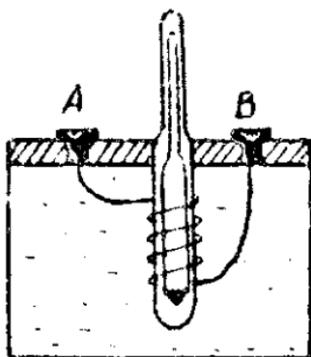


Рис. 1

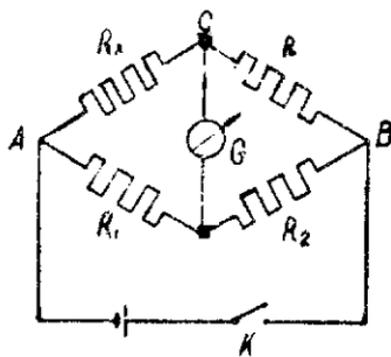


Рис. 2

Концы проводника выведены к клеммам А и В на крышке прибора. Трубка с проводником помещается в стеклянный сосуд, наполненный маслом. Весь прибор погружается в металлический сосуд с водой, который нагревается на электроплитке. Измерение температуры производится с помощью термометра.

Сопротивление измеряется с помощью универсального моста, электрическая схема которого показана на рис. 2. На рис. 3 показана верхняя панель с обозначениями.

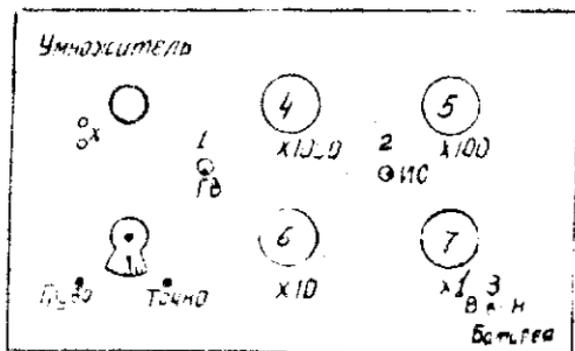


Рис. 3

Мост можно питать либо от внутренней батареи, вмонтированной внутри ящика, либо от наружного источника.

Измеряемое сопротивление подключается к клеммам X (рис.3). Кнопка 1 устанавливается в положение "ГВ", кнопка 2 - в положение "ИС", а кнопка 3 - в положение "Н" - при питании от наружного источника или в положении "В" - при питании от внутренней батареи.

Для измерения сопротивления поступают следующим образом:

1. Рукоятку "Умножитель" устанавливают в положение IXI. С помощью рукояток 4,5,6,7 подбирают сопротивления таким образом, чтобы при легком нажатии кнопки "грубо" стрелка нульгальванометра не отклонялась. Только после этого дальнейшим подбором сопротивлений добиваются, чтобы стрелка нульгальванометра не отклонялась при нажатии кнопки "точно".

2. Для достижения большей точности измерения переводят рукоятку "Умножитель" в положение $\frac{I}{10}$, если величина сопротивления, полученная при предыдущем измерении, выражается трехзначным числом, или в положении $\frac{I}{100}$, если величина сопротивления выражается двухзначным числом. Все измерения производятся с точностью 0,1-0,01 ома.

Когда стрелка нульгальванометра при нажатии кнопки "Точно" не отклоняется, величина измеряемого сопротивления

$$R_x \text{ равна } R_x = WR,$$

(9)

где W — показатель положения рукоятки "Умножитель";

R — сумма показаний рукояток 4, 5, 6, 7.

Пример. Пусть рукоятка "Умножитель" показывает $\frac{1}{100}$,
рукоятка 4 показывает $6 \times 1000, 5-3 \times 100$, $6-8 \times 10$,
 $7-2 \times 1$.

Измеряемое сопротивление в этом случае равно

$$R_x = \frac{1}{100} \times (6 \times 1000 + 3 \times 100 + 8 \times 10 + 2 \times 1) = \frac{1}{100} \cdot 6382 =$$

$$= 63,82 \text{ ом.}$$

§ 3. Порядок выполнения работы

1. Установив кнопку 1 — в положение "ГБ", кнопку 2 — в положение "ИС", кнопку 3 — в положение "Н" или "В" (в зависимости от питания).

2. Присоединить исследуемое сопротивление к клеммам X.

3. Измерить начальную температуру t_1 . (Она должна быть не больше $20-25^{\circ}\text{C}$).

4. Измерить начальное сопротивление R_1 .

5. Включить электроплитку и нагревать прибор до температуры $95-98^{\circ}\text{C}$, снимая показания через каждые $10-12^{\circ}\text{C}$. При наивысшей температуре t_2 измерить конечное сопротивление R_2 . По данным, полученным в пунктах 4 и 5, определить температурный коэффициент сопротивления по формуле (8).

6. Построить график зависимости $R = f(t)$.

Все экспериментальные и расчетные данные занести в таблицу.

№ измерений	1	2	3	4	5	6	7	8
Температура t								
Сопротивление R								

§ 4. Контрольные вопросы.

1. Каков механизм проводимости электрического тока в металлах ?
2. Какова зависимость сопротивления металлов от температуры (дать объяснение этой зависимости на основе электронной теории) ?
3. Дать определение температурного коэффициента сопротивления.
4. Привести вывод рабочей формулы.
5. Объяснить принцип работы универсального моста.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 25

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТОВ

Приборы и принадлежности: зуммер, телефон, реохорд, сосуд для исследуемой жидкости, водяной термостат, термометр, переменное сопротивление.

§ I. Теоретическое введение

К электролитам относятся растворы солей, щелочей и кислот в воде. Проводимость электролитов обусловлена наличием в них положительных и отрицательных ионов.

Ионная проводимость электролитов подтверждается многочисленными опытами. Рассмотрим один из них. Возьмем два металлических электрода с поперечным сечением 10 мм. Опустим их в ванну с дистиллированной водой и подадим на них напряжение 110 в. Амперметр, включенный в цепь, покажет ток порядка 10^{-6} а. Если же растворить в воде немного поваренной соли $NaCl$, то ток возрастет во много раз. Прохождение тока будет сопровождаться выделением на электродах хлора (Cl) у анода и у катода - едкого натра ($NaOH$).

Это свидетельствует о том, что носителями положительных зарядов в водном растворе поваренной соли являются ионы натрия (катионы), а отрицательных - ионы хлора (анионы).

Положительные и отрицательные ионы в электролитах возникают за счет диссоциации (распада) молекул.

Диссоциация молекул растворяемого вещества в воде происходит за счет ослабления примерно в 81 раз сил электрического взаимодействия ($\xi = 81$). Зависимость электропроводности электролитов от температуры обусловлена следующими причинами:

1. При повышении температуры возрастает скорость хаотического движения молекул, что приводит к увеличению числа столкновений. Чем больше число столкновений, тем больше пар ионов образуется в растворе: увеличивается концентрация ионов, что обуславливает увеличение проводимости.

2. Каждый ион, взаимодействуя с соседними молекулами растворителя, образует вместе с ними комплекс, называемый сольватом, который движется в растворителе. Под действием внешнего поля сольваты получают направленное движение. Одновременно они испытывают сопротивление, обусловленное вязкостью растворителя. С увеличением температуры уменьшается вязкость жидкости, что ведет к увеличению электропроводности электролита.

Из сказанного выше следует, что проводимость электролитов растет с увеличением температуры. Поскольку сопротивление есть величина обратная проводимости, то сопротивление электролитов с увеличением температуры уменьшается.

Зависимость сопротивления электролитов от температуры можно представить приближенной формулой

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)], \quad (1)$$

где: R_1 и R_2 - сопротивления при температурах t_1 и t_2 ;
 α - температурный коэффициент сопротивления.

Он численно равен приращению сопротивления каждой единицы сопротивления при изменении температуры на 1° . Написанное линейное соотношение не точно передает зависимость сопротивления электролитов от температуры. Найденный из него для разных значений температуры α не оказывается величиной вполне постоянной. Это указывает на ограниченную применимость написанного выражения. Однако в небольших интервалах температур можно применять и линейное соотношение между R_1 и R_2 .

Измерения сопротивления электролитов делают обыкновенно при помощи так называемого универсального моста Уитстона, в который вместо источника постоянного тока можно включить индуктор, питающий мост переменным током. Вместо гальванометра в таком случае пользуются чувствительным телефоном. Применение переменного тока при измерении сопротивления электролитов необходимо потому, что под действием постоянного тока происходит поляризация электродов продуктами электролиза и измеренное сопротивление не соответствует истинному значению сопротивления объемного слоя электролита. Кроме помех в измерении, связанных с поляризацией электродов, существенно и то, что при прохождении постоянного тока постепенно изменяется состав электролита вследствие электролиза.

Покажем, что если в ветви АТВ (рис. I) отсутствует ток, будет выполняться условие:

$$R_x = R_0 \frac{l_1}{l_2} \quad (2)$$

На участке цепи АТВ ток равен нулю при условии, если между точками А и В напряжение равно нулю. Следовательно, падения напряжений на участках СА ($U_{ca} = I_1 R_1$) и СВ ($U_{cb} = I_2 R_2$) равны между собой. Падения напряжений на участках АД ($U_{da} = I_1 l_1$) и ВД ($U_{db} = I_2 l_2$) также равны между собой, т.е.

$$\begin{cases} I_1 R_1 = I_2 R_2 \\ I_1 l_1 = I_2 l_2 \end{cases} \quad (3)$$

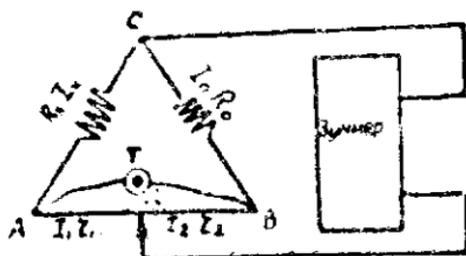


Рис. I.

Кроме того, в последовательно соединенных участках цепи токи равны (в ветви АТВ ток отсутствует).

$$\begin{cases} I_1 = I_2 \\ I_3 = I_4 \end{cases} \quad (4)$$

Из (3) и (4) получим:

$$\frac{R_x}{\tau_1} = \frac{R_0}{\tau_2} \quad \text{или} \quad R_x = R_0 \frac{\tau_1}{\tau_2} \quad (5)$$

Равенство (5) можно преобразовать, учитывая, что сопротивления участков АД и ДВ пропорциональны длинам этих участков l_1 и l_2 :

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{l_1}{l_2} \quad (6)$$

Тогда получим:

$$R_x = R_0 \frac{l_1}{l_2} \quad (7)$$

Для определения температурного коэффициента сопротивления используется прибор, состоящий из U - образной трубки, в которую помещается исследуемый электролит. В эту трубку вставлены неокисляющиеся металлические электроды.

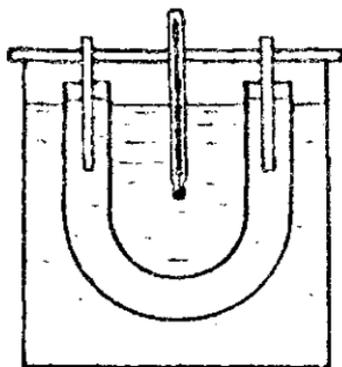


Рис. 3.

Этот сосуд помещают в термостат с водой, снабженный термометром. Для подогрева используется электроплитка. В качестве источника переменного тока используется зуммер.

§ 2. Порядок выполнения работы

1. Собрать цепь по схеме (рис. 1).
2. Определить сопротивление электролита R_x при комнатной температуре, для чего:
 - а) подвижный контакт D установить примерно на середине шкалы;
 - б) с помощью переменного сопротивления подобрать такое сопротивление R_c , чтобы звук в телефоне был возможно слабее;
 - в) перемещением подвижного контакта D добиться отсутствия звука в телефоне;
 - г) температуру t , сопротивление R_c и длины плеч реохорда l_1 и l_2 внести в таблицу;
 - д) изменив сопротивление R_c , снова добиться отсутствия звука в телефоне. Данные занести в таблицу.
3. Включить электроплитку и нагреть раствор до 80°C .
4. Через каждые $10-12^{\circ}$ определять сопротивление электролита согласно 3 (а, б, в, г).
6. При максимальной температуре, как и при комнатной температуре, сопротивление R_x определить дважды, при различных значениях R_c (3 а, б, в, г).

7. Для каждой температуры определить сопротивление электролита R_x по формуле:

$$R_x = R_0 \frac{t_1}{t_2} \quad (8)$$

Сопротивление R_x при комнатной температуре и при максимальной температуре находят как среднее арифметическое двух измерений при соответствующих температурах.

8. Найти температурный коэффициент сопротивления по формуле:

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(t_2 - t_1)} \quad (9)$$

где t_1 - комнатная температура;

t_2 - максимальная температура;

R_1 и R_2 - сопротивления электролита при комнатной и максимальной температурах.

9. По данным таблицы построить график зависимости сопротивления R_x от температуры t .

t	R_0	t_1	t_2	R_x

Контрольные вопросы

1. Чем обусловлена электропроводность электролитов?
2. Какова зависимость сопротивления электролитов от температуры (объяснить эту зависимость)?
3. Что называется температурным коэффициентом сопротивления электролита?
4. Принцип работы универсального моста для измерения сопротивлений.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №26

ГРАДУИРОВКА ТЕРМОПАРЫ

Приборы и принадлежности: термопара, смонтированная на специальном держателе; чувствительный гальванометр; два термометра; электроплитка; два калориметра.

§ I. Теоретическое введение

Металлы - кристаллические тела. Их пространственные решетки составлены из положительных ионов соответствующего металла, между которыми находятся электроны, оторванные от своих атомов. Эти электроны, называемые свободными, являются носителями тока. Совокупность свободных электронов образует электронный газ. К электронному газу приближенно применима кинетическая теория идеального газа. Поэтому можно представить, что электроны в металле ведут себя подобно молекулам газа, обладая средней кинетической энергией

$$\xi = \frac{3}{2} k T \quad (1)$$

где k - постоянная Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{град}}$);

T - абсолютная температура.

Электроны внутри металла обладают меньшей потенциальной энергией, чем вне его. Для извлечения электрона из металла наружу нужно совершить определенную работу A , которую называют работой выхода. Каждый металл характеризуется своей работой выхода. Вместо работы выхода часто пользуются

понятием потенциала выхода φ , который однозначно определяется через работу выхода и заряд электрона e следующим образом:

$$\varphi = \frac{A}{e} \quad (2)$$

При соприкосновении двух металлов (рис. I) электроны, совершая беспорядочное хаотическое движение, будут переходить из одного металла в другой. Предположим, что потенциалы вы-

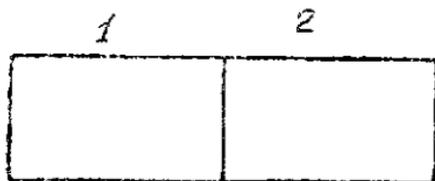


Рис. I.

хода для металлов 1 и 2 соответственно равны φ_1 и φ_2 и для определенности будем считать, что $\varphi_1 > \varphi_2$.

Тогда электронам легче покинуть металл 2 и больше их будет проникать в металл 1, чем обратно.

Это приведет к избытку электронов в металле 1 и к недостатку их в металле 2. Металл 1 окажется заряженным отрицательно, а металл 2 - положительно.

Между металлами возникнет разность потенциалов $\varphi_{1,2}'$, благодаря которой появится электрическое поле, препятствующее даль-

нейшему переходу электронов в металл I. Динамическое равновесие между потоками электронов из металла 2 в металл I и обратно установится, когда разность потенциалов $\varphi'_{1,2}$ окажется равной разности потенциалов выхода

$$\varphi'_{1,2} = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (3)$$

На величину контактной разности потенциалов оказывает влияние и то, что концентрация электронного газа в обоих металлах n_{01} и n_{02} несколько различна. Из металла, в котором на единицу объема приходится больше электронов, их больше будет уходить. Это создаст дополнительную разность потенциалов $\varphi''_{1,2}$, которая может быть определена из распределения частиц в потенциальном поле Больцмана

$$\frac{n_{01}}{n_{02}} = e^{-\frac{e\varphi''_{1,2}}{kT}}$$

Откуда, выразив $\varphi''_{1,2}$ получим:

$$\varphi''_{1,2} = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} \quad (4)$$

Контактная разность потенциалов $\varphi_{1,2}$ между металлами I и 2 представит собой алгебраическую сумму разностей потенциалов $\varphi'_{1,2}$ и $\varphi''_{1,2}$

$$\varphi_{1,2} = \varphi'_{1,2} + \varphi''_{1,2} \quad (5)$$

Подставляя значения для $\varphi_{1,2}'$ (3) и $\varphi_{1,2}''$ (4) для контактной разности потенциалов двух металлов, получим следующее выражение:

$$\varphi_{1,2} = \varphi_1 - \varphi_2 + \frac{kT}{e} \rho_1 \frac{r_{2,1}}{r_{1,2}} \quad (5)$$

Суммарная контактная разность потенциалов замкнутой цепи, состоящей только из проводников первого рода, равна нулю. В этом легко убедиться, если, выбрав определенное направление обхода, просуммировать разности потенциалов на всех контактах.

Как видно из уравнения (6), контактная разность потенциалов зависит от температуры места соприкосновения металлов. Если в замкнутой цепи из двух металлов (рис. 2) контакты поддерживать при различных температурах T_1 и T_2 , суммарная контактная разность потенциалов будет отлична от нуля. Она получила название термоэлектродвижущей силы и равна алгебраической сумме контактных разностей потенциалов $\varphi_{1,2} + \varphi_{2,1}$

$$\mathcal{E} = \varphi_{1,2} + \varphi_{2,1} \quad (7)$$

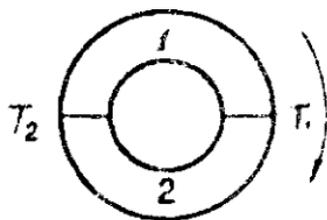


Рис. 2.

Получим выражение для термоэДС, воспользовавшись равенствами 6.67 и выбрав направление обхода контура по часовой стрелке. В этом случае запишем:

$$\mathcal{E} = \mathcal{U}_{1,2} + \mathcal{U}_{2,1} = \left[\mathcal{U}_1 - \mathcal{U}_2 + \frac{\kappa T_1}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} \right] + \left[\mathcal{U}_2 - \mathcal{U}_1 + \frac{\kappa T_2}{e} \ln \frac{n_{02}}{n_{01}} \right];$$

Значения \mathcal{U}_1 и \mathcal{U}_2 в первой и второй скобках сократятся. Во второй скобке поменяем местами числитель и знаменатель под знаком логарифма, для чего перед этим слагаемым поменяем знак на противоположный.

$$\mathcal{E} = \frac{\kappa T_1}{e} \ln \frac{n_{02}}{n_{01}} - \frac{\kappa T_2}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}}.$$

Вынесем за скобки общий множитель $-\frac{\kappa}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}}$ и

обозначим его буквой C .

$$C = \frac{\kappa}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} \quad (8)$$

Тогда для термоэДС получим выражение: $\mathcal{E} = C(T_1 - T_2)$

§ 2. Описание прибора.

Установка представляет собой термопару, укрепленную на штативе (рис. 3). Стопорный винт А позволяет по мере необходимости поднимать, опускать, а также поворачивать перекладину В с термопарой. Места контактов заключены в стеклянные сосуды С, заполненные маслом.

Термометры T_1 и T_2 опущены в масло и закреплены. Оба стеклянных сосуда помещены в металлические сосуды M , заполненные водой.

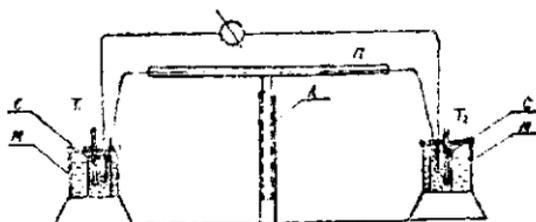


Рис. 3.

Один из металлических сосудов стоит на электролитке, что позволяет изменять температуру одного спая. Другой сосуд с водой поддерживает температуру второго спая неизменной.

К термонаре подключен гальванометр.

§ 3. Порядок выполнения работы

1. Собрать схему установки (рис. 3).
2. Проверить равенство показаний термометров T_1 и T_2 . При этом стрелка гальванометра должна стоять на нуле шкалы. Записать показания термометров и гальванометра.

3. Включить электроплитку в сеть (220 в). По мере повышения температуры, через каждые 10-12 градусов снимать показания гальванометра и данные записать в таблицу. Измерения температуры и снятие соответствующих показаний гальванометра производить одновременно.

4. При достижении температуры 95-98 градусов плитку выключить. Отпустить стопорный винт, поднять планку, повернуть её на угол 45-60° и закрепить стопорным винтом.

5. Измерения продолжать и при понижении температуры. Предпочтительно при охлаждении снимать показания гальванометра при тех же температурах, что и при нагревании.

Чтобы ускорить охлаждение, можно вылить горячую воду и, заменив её холодной, снова опустить термопару.

6. Построить график зависимости показаний гальванометра n от разности температур между спаями ($T_1 - T_2$).

Кривые, полученные при нагревании и охлаждении, не будут точно совпадать из-за тепловой инерции масла. Среднюю линию, проведенную между ними, можно считать градуировочной кривой.

№ п/п	Нагревание			Остывание		
	Показание термомет- ра T_1	Разность темпе- ратур $T_1 - T_2$	Показе- ния гальва- нометра	№№ п/п	Пока- зания термо- метра T_1	Разность темпера- тур $T_1 - T_2$

§ 4. Контрольные вопросы

1. Какова причина возникновения контактной разности потенциалов?
2. Какова причина возникновения термоэдс?
3. От чего зависит величина термоэдс?
4. Как строится градуировочная кривая и как ею пользоваться?
5. Указать применение термопар.

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ КАТОДНОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Приборы и принадлежности: катодный осциллограф представляет собой высоко-чувствительный прибор для изучения периодических электрических колебаний произвольной формы в широком диапазоне частот, а также непериодических импульсов различной длительности.

Осциллограф типа ЭО-6М дает возможность:

1. Рассматривать импульсы длительности от 0,5 до 3000 мксек с частотой следования от 100 гц до 10 кгц.
2. Наблюдать фигуры Лиссажу.
3. Наблюдать кривые периодических процессов.
4. Измерять длительность и амплитуду импульсов.

Катодный осциллограф состоит из электронно-лучевой трубки, дающей возможность получить тонкий пучок электронов, ряда электронных устройств, осуществляющих управление этим пучком.

1. Электронно-лучевая трубка

Электронно-лучевая трубка представляет собой сложную многоэлектродную электронную лампу (рис. 1)

В баллоне сложной конфигурации расположены следующие устройства: катод (2) с подогревом в виде нити накала (1). Передняя поверхность катода покрыта эмитирующим слоем (4) (чаще всего окисью какого-либо металла), обладающим способностью при высокой температуре интенсивно испускать электроны.

Электроны выделяются в основном с передней поверхности катода и распространяются при отсутствии полей строго прямолинейно.

Подобно световым лучам электроны могут быть сфокусированы в одной точке. Роль линз для них выполняют электрические или магнитные поля. В электронно-лучевых трубках чаще всего фокусировка осуществляется электрическими, а в электронных микроскопах — магнитными полями.

Фокусирующий цилиндр (5), заряженный отрицательно относительно катода, собирает электроны в точке А, откуда они снова движутся расходящимся пучком и попадают на аноды (6) и (7).

Первый фокусирующий анод (6) собирает расходящийся пучок электронов в сходящийся и фокусирует этот пучок в одной точке на передней стенке колбы (10), представляющей собой круглый экран, покрытый слоем флуоресцирующего вещества, светящегося под ударами электронов. Фокусировка регулируется изменением потенциала фокусирующего анода (6) и осуществляется поворотом ручки "фокус" на передней панели осциллографа (рис. 2). Второй анод (7) служит для ускорения электронов. Вся вышеописанная часть трубки, обведенная на чертеже пунктиром, носит название электронной пушки (3).

Вылетающий из электронной пушки сфокусированный пучок электронов проходит между управляющими металлическими пластинами, расположенными вертикально (8) и горизонтально (9).

Электростатическая электронно-лучевая трубка.

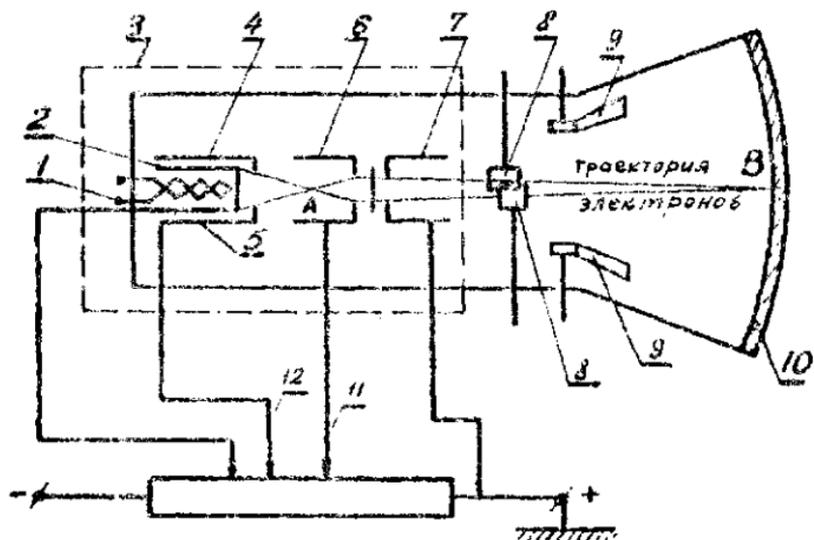


Рис. I

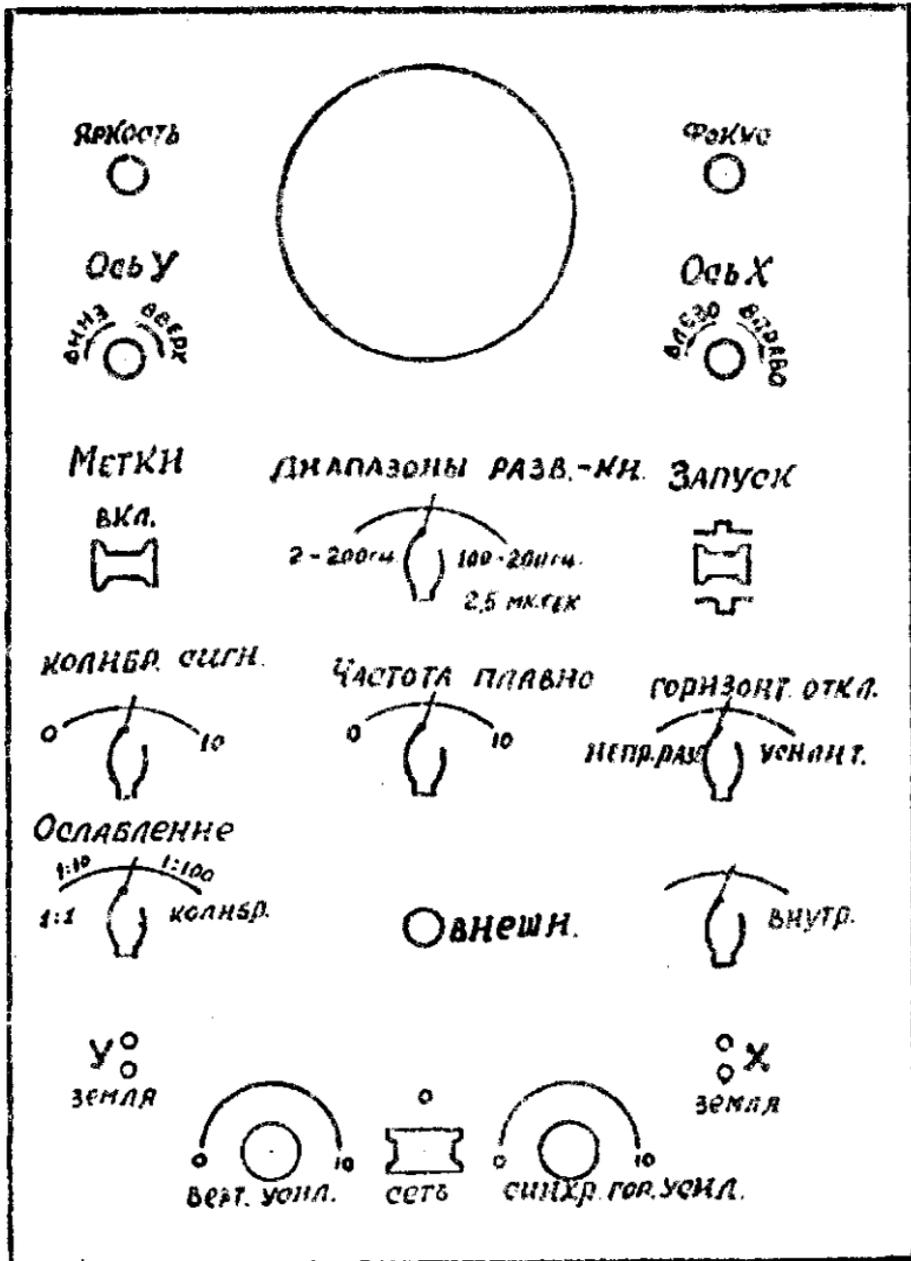


Рис. 2

Если к пластинам (9) приложить некоторую разность потенциалов, то можно перемещать электронный пучок вверх и вниз в вертикальной плоскости. Это осуществляется поворотом ручки " ось y ". Если приложить разность потенциалов к пластинам (8), можно перемещать его в горизонтальной плоскости (ручка " ось X ").

Таким образом, воздействуя на электронный луч постоянными напряжениями, приложенными к пластинам (8) и (9), можно установить светящуюся точку в любом месте экрана. Прикладывая к пластинам переменные напряжения, можно вызвать сложное движение точки по экрану и получить на экране кривую, характеризующую поданный на осциллограф сигнал.

2. Управление электронным пучком

Поступающий на осциллограф сигнал подается на отклоняющие пластины (8) и (9) через два независимых усилителя (" усилитель X ", усилитель Y "). Подавая, например, на усилители синусоидальные колебания от двух разных источников, можно получить на экране фигуры Лиссажу.

Если источники сигналов обеспечивают достаточно высокие напряжения, то сигналы можно подавать непосредственно на отклоняющие пластины. Для этого надо открыть дверцу на задней стенке прибора, отключить усилители, имеющимися на задней стенке выключателями, и подключить источники колебаний к установленным там клеммам X и Y .

Слабые сигналы подаются через усилители, от которых клеммы "гориз.усил.Х" и "верт.усил.У" выведены на переднюю панель прибора (рис.3).

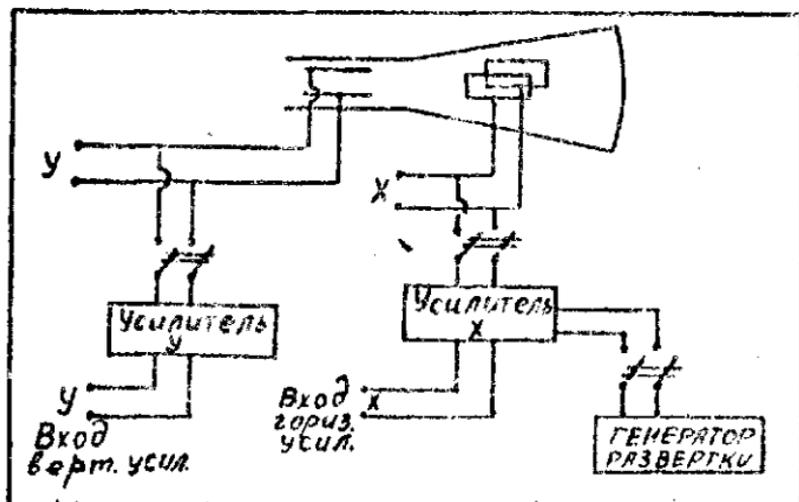


Рис. 3

Значительно чаще возникает необходимость наблюдать не фигуры Лиссажу, а кривую колебаний или импульсов, выдаваемых каким-либо прибором. Кривая строится на экране как обычный график зависимости какой-либо величины от времени. На таких графиках, как правило, ось абсцисс является осью времени, поэтому перемещение луча вдоль этой оси (ось X) должно быть равномерным.

Равномерное перемещение луча вдоль оси X осуществляется генератором развертки, подающим на вертикальные пластины (B) через усилитель X пилообразное напряжение (рис.

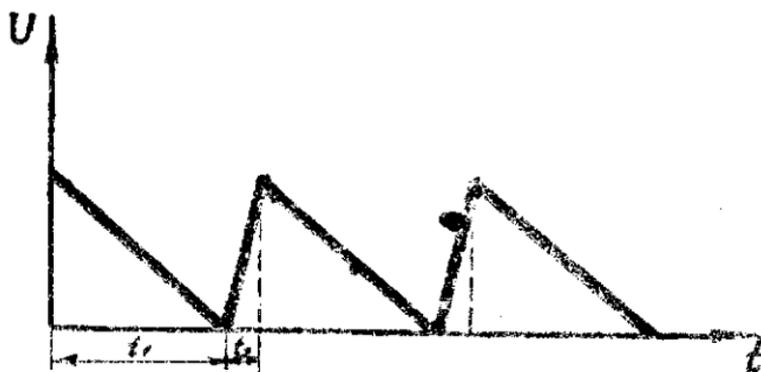


Рис. 4

Рассмотрим, каким образом под действием пилообразного напряжения обеспечивается равномерное перемещение луча. На рис. 5 изображен экран электронно-лучевой трубки

и вынесенные наружу, для наблюдности, вертикальные пластины. Если на пластины подано постоянное напряжение, то при определенной величине этого напряжения электронный луч будет попадать на левый край экрана и даст там светящуюся точку (5а). Если теперь напряжение начнет равномерно убывать, точка по экрану будет перемещаться с постоянной скоростью (5б). Когда точка достигнет правого края экрана, напряжение на пластинах (8) скачкообразно возрастет (участок кривой t_2 рис.4), и точка очень быстро возвратится в первоначальное положение - на левый край экрана (5в). Так как повысить напряжение до некоторого

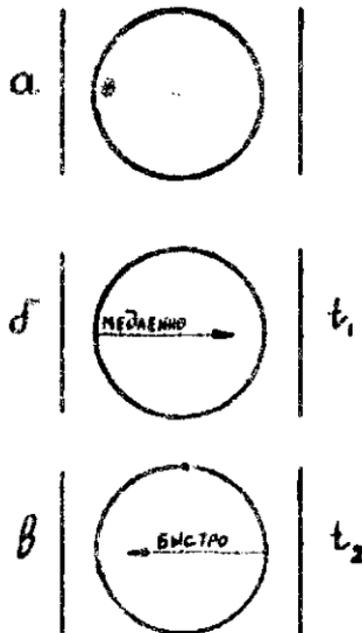


Рис. 5

значения мгновенно нельзя, то возвратное движение точки требует некоторого времени.

Характер пилообразного напряжения такое, что $t_1 \gg t_2$, поэтому временем возвратного движения луча (t_2) можно пренебречь.

3. Развертка

Если выключить усилитель сигнала по оси X и подать переменное напряжение (сигнал) только на клеммы оси Y, то на экране появится вертикальная линия. Она будет существенно отличаться своим характером от горизонтальной линии, образованной пилообразным напряжением. Это отличие будет заключаться в том, что перемещение луча по экрану в этом случае будет неравномерным. Скорость перемещения луча будет соответствовать скорости изменения напряжения.

Если подан синусоидальный сигнал, то смещение точки за равные промежутки времени Δt будет соответствовать отрезкам a, b, c, d и a', b', c', d' (рис. 6).

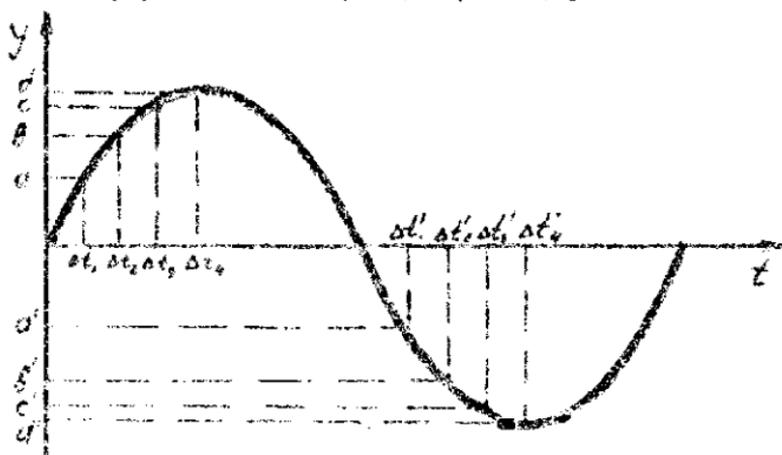


Рис. 6

Развертка осуществляется перемещением точки по горизонтали под действием пилообразного напряжения. Тогда каждому отклонению точки от нулевого положения по вертикали будет соответствовать смещение её на равные отрезки по горизонтали, в результате чего на экране появится изображение синусоиды.

Аналогично можно получить развертку периодических колебаний или импульсов любого характера.

Чтобы изображение на экране получилось устойчивым, необходимо, чтобы в последующем периоде кривая началась в той же точке экрана, что и в предыдущем. В противном случае, например, для синусоиды график на экране будет иметь вид, показанный на рис. 7.

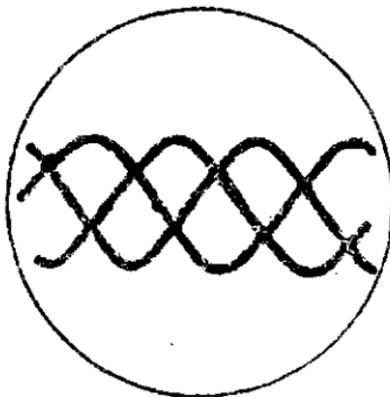


Рис. 7

Здесь возникли как бы изображения ряда одинаковых синусоид, сдвинутых по фазе. На самом деле это одна синусоида, разные периоды которой сдвинуты друг относительно друга по фазе. Поворачивая расположенную на передней панели ручку " синхронизация", можно добиться, чтобы частота развертки (пилообразного напряжения) сравнялась с частотой поступающего сигнала. Тогда кривая будет всегда начинаться в одной точке и на экране возникнет изображение синусоиды (рис.8). Если частота развертки будет кратно частоте сигнала, то на экране будут укладываться два, три и более периодов (рис.9).

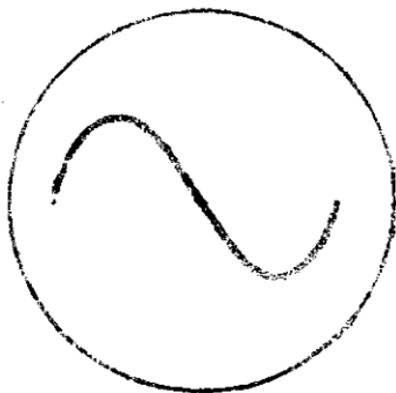


Рис. 8

Для высокочастотных непериодических импульсов такой способ синхронизации неприменим, т.к. они могут следовать один за другим через неодинаковые промежутки времени. В этом случае никакая установка частоты развертки не обеспечит необходимого совпадения начала развертки с моментом прихода импульса. Поэтому, специально для таких случаев, в каждом осциллографе предусмотрено устройство ядущей развертки, которое регулирует её таким образом, что развертка начинается только в момент прихода импульса. Генератор развертки в этом случае, как бы "ждет" прихода импульса для того, чтобы начать работу.

Каждый осциллограф дает возможность не только наблюдать, но и измерить проходящий сигнал. Для этого надо ручку делителя "ослабление" поставить в положение "калибровка". При этом на усилитель "У" (горизонтальной пластины) поступает через трансформатор ослабленное сетевое синусоидальное напряжение, которое можно регулировать потенциометром (ручка "калибр. сигнал"). Против этой ручки нанесены деления от 0 до 10, которые можно проградуировать в вольтах. Если эта градуировка известна (обычно она выполняется в виде графика, прилагаемого к осциллографу и помещается на передней крышке осциллографа), то измерение сигнала производится следующим образом:

1. Замечают по сетке высоту измеряемого сигнала.
2. Ставят ручку "ослабление" в положение "калибр".
3. Ручкой "калибр-сигнал" получают такую же высоту синусоиды, что и у измеряемого сигнала.

4. Замечает положение ручки "калибр-сигнал" и по графику определяет напряжение.

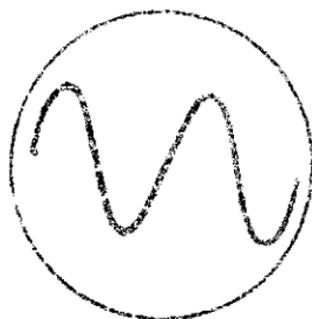


Рис. 9

Упражнение I. I. Не включая прибор, ознакомиться с передней панелью осциллографа, запомнив расположение ручек.

2. Поставить ручки в следующее положение:

- а) ручку "яркость" в крайнее левое;
- б) ручку "диапазон развертки" в положение 20-200гц;
- в) ручку "метки" в положение "выкл".
- г) ручку "гориз. отклонение" в положение "усилит.";
- д) ручку "синхронизация" в положение "внутр."

Положение остальных ручек роли не играет.

3. Включать прибор. Выждать 3 минуты пока прогреются лампы.

4. Повернуть вправо ручку " яркость". На экране должна появиться светящаяся точка. Если точки не появляются, то поворотом ручек "ось X " и " ось Y " найти её и установить точку в центре экрана.

5. Поворачивая ручки " ось X " и " ось Y ", наблюдать движение точки по экрану.

6. Ручку "Гориз. отклонения" поставить в положение " непр. разв.," получить на экране прямую линию.

7. Ручку "ослабление" поставить в положение "калибр" и получить на экране синусоиду. Повернуть ручку " синхронизация" в положение " внутрь " ручкой " калибр . сигнал" получить синусоиду, по высоте равную половине диаметра экрана. Поворотом ручки " частота плавно" добиться устойчивого положения синусоиды на экране.

ПРИМЕЧАНИЕ. Для того, чтобы не повредить светящийся слой следует избегать длительного свечения экрана в одной точке.

Упражнение II. I. Определить чувствительность пластины осциллографа к напряжению.

Чувствительностью пластины осциллографа к напряжению называется отклонение луча на экране в миллиметрах, вызванное разностью потенциалов в I вольт.

Для определения чувствительности нужно:

I. Открыть крышку на задней стенке кожуха осциллографа и выключить оба усилителя, имеющимися там выключателями.

2. Собрать схему (рис. 10), которая дает возможность подать напряжение от трансформатора непосредственно на пластины "У". После проверки схемы выключить в сеть трансформатор.

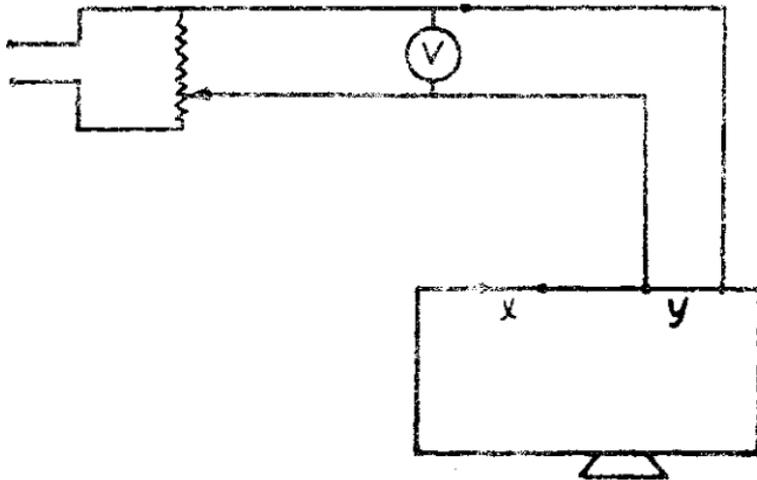


Рис. 10

3. Подать на пластины напряжение (не больше 50в).

4. Отсчитать по шкале на трубке осциллографа длину световой полоски в миллиметрах l , замечая при этом величину подаваемого напряжения U .

5. Чувствительность j определяется по формуле:

$$j = \frac{l}{2\sqrt{2}U}$$

(17)

6. Меняя не менее 8 раз величину подаваемого напряжения (но не больше 50 вольт) и замечая при каждом напряжении длину l световой полоски, определить для каждого значения l чувствительность j . Данные занести в таблицу:

Номер измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Напряжение	10									
Длина плоскости	15									
Чувствительность										
Погрешность										

7. Определить среднее значение j_{cp} , среднее значение абсолютной погрешности Δj_{cp} , относительную погрешность

$$\xi = \frac{\Delta j_{cp}}{j_{cp}}$$

8. Окончательный результат записывать в виде:

$$j = j_{cp} \pm \Delta j_{cp}$$

4. Контрольные вопросы.

1. Назначение осциллографа.
2. Как работает электронно-лучевая трубка?
3. Как достигается разветка луча в горизонтальной и вертикальной плоскостях?

4. Каково назначение ручек на передней панели осциллографа?
5. Как управлять электронным лучом?
6. Как последовать переменный электрический сигнал?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 28

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Приборы и принадлежности: тангенс-гальванометр, амперметр, реостат, источник постоянного тока, переключатель двойной ключ.

§ 1. Теоретическое введение

Земля представляет собой магнит. Его ось не совпадает с осью вращения земли. Южный магнитный полюс находится на севере в точке с координатами 70° северной широты и $26^{\circ}45'$ западной долготы, а северный магнитный полюс находится на юге. Его координаты $72^{\circ}45'$ южной широты и $155^{\circ}15'$ восточной долготы. Положение магнитных полюсов периодически меняется из года в год. Напряженность магнитного поля на поверхности Земли равна примерно 40 а/в ($0,5 \text{ эрстед}$). Направление и величина напряженности поля Земли также меняется в небольших пределах в зависимости от положения Солнца и солнечных пятен. Магнитная стрелка устанавливается так, что линия, соединяющая полюсы стрелки, является касательной к земному магнитному меридиану в данной точке, т.е. направление магнитной стрелки совпадает с направлением вектора напряженности магнитного поля Земли.

Вектор индукции \vec{B} связан с вектором напряженности \vec{H} соотношением

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

где μ_0 - абсолютная магнитная проницаемость вакуума. Направление этих векторов совпадает.

Вектор индукции магнитного поля Земли в каждой точке можно разложить на две составляющие: горизонтальную B_h - параллельно оси, соединяющую магнитные полюсы Земли, и вертикальную B_v , перпендикулярную этой оси (рис.1)

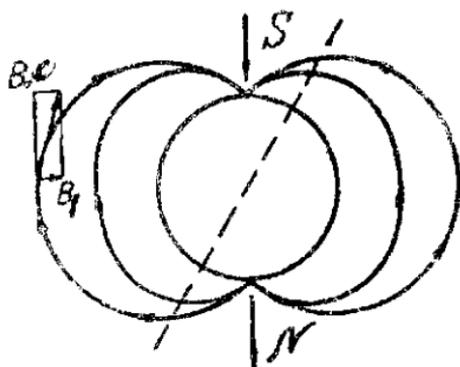


Рис. 1.

Горизонтальная составляющая устанавливает магнитную стрелку в плоскости магнитного меридиана, а вертикальная составляющая определяет наклон стрелки к оси.

§ 2. Описание прибора

Для определения величины горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли используется тангенс-гальванометр. Он представляет собой круговой виток, в центре которого на вертикальной оси расположена магнитная стрелка, которой укреплен круговая шкала (бусоль). На оправе имеется приспособление для отсчета угла поворота стрелки. Кроме того, отпущен стопорный винт, можно произвольно устанавливать плоскость витков. Магнитная

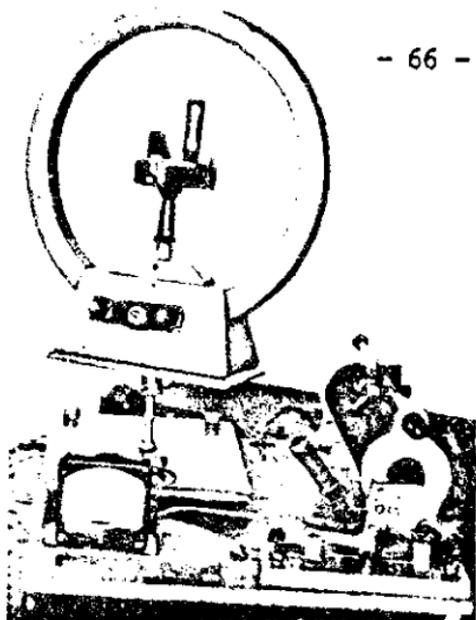


Рис. 2.

стрелка подбирается достаточно малой, чтобы индукцию магнитного поля тока можно было считать постоянной в области, где расположена стрелка, и равной индукции в центре витков.

В центре витков кругового тока индукция магнитного поля тока равна

$$B_m = \frac{\mu_0 n I}{2z}, \quad (2)$$

где I - сила тока, протекающего по виткам;

n - число витков, ($n = 40$);

z - их радиус ($z = 0,12$ м).

При отсутствии тока стрелка располагается по направлению магнитного меридиана. Если при этом и плоскость витков расположена в плоскости магнитного меридиана, то стрелка окажется в плоскости витков.

При включении тока индукция магнитного поля тока направлена перпендикулярно к плоскости витков и перпендикулярно индукции магнитного поля Земли (рис.3). На магнит-

ную стрелку будут действовать вращающие моменты со стороны магнитного поля тока и со стороны магнитного поля Земли. В результате этого стрелка займет такое положение, при котором вращающие моменты будут равны по величине и направлены в противоположные стороны. Магнитная стрелка эквивалент-

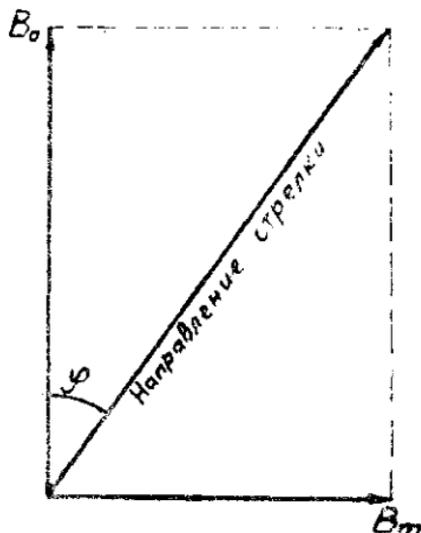


Рис. 3.

на соленоиду, по которому течет ток. Величина вращающего момента, действующего на стрелку в однородном магнитном поле, равна

$$M = P_m \cdot B \sin(\vec{P}_m \vec{B}), \quad (3)$$

где P_m — собственный магнитный момент соленоида (стрелки).

На магнитную стрелку будут действовать два вращающих момента: со стороны магнитного поля Земли

$$M_1 = P_m B_0 \sin \varphi \quad (3)$$

и со стороны магнитного поля тока

$$M_2 = P_m B_m \cos \varphi. \quad (4)$$

таблицу.

5. Изменяя силу тока в цепи добиться отклонения стрелки на угол 50° , а затем на угол 60° и повторить измерения, указанные в пункте 3.

6. Для каждого измерения вычислить величину горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля Земли H_0 , среднее значение $H_{0,ср}$ и погрешности эксперимента.

7. Окончательный результат записать в виде

$$H_0 = H_{0,ср} \pm \Delta H_{0,ср}$$

Число витков $n =$		Радиус витков $r =$					
№ опыта	Величина тока, а	Угол отклонения стрелки			среднее значение угла	H_0	ΔH_0
		в одну сторону	в другую сторону				
1							
2							
3							
Среднее значение							

§ 4. Контрольные вопросы

1. На каком принципе основано определение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли в этой работе?

2. Вывести рабочую формулу.

3. Какое действие на магнитную стрелку оказывают горизонтальная и вертикальная составляющие магнитного поля Земли?

4. В каких точках Земли горизонтальная и вертикальная составляющие магнитного поля Земли принимают максимальные и минимальные значения?

5. Как зависит величина горизонтальной составляющей от географической широты местности?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 29

ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОДИНАМОМЕТРОМ

Приборы и принадлежности: электродинамометр, два амперметра постоянного тока, два реостата, источники постоянного тока на 120в и 10в, два ключа, разновесы, масштабная линейка.

§ I. Теоретическое введение

Любой электрический ток создаст в окружающем пространстве магнитное поле. Это поле проявляет себя, в частности, своим силовым действием на всякий другой ток, помещаемый в поле.

На проводник длиной l , по которому течет ток I , в магнитном поле действует сила, равная

$$F = B I l \sin(\alpha), \quad (1)$$

где B - индукция магнитного поля.

Индукция магнитного поля является величиной, характеризующей магнитное поле. Чтобы выяснить её физический смысл, поместим проводник с током перпендикулярно линиям индукции. В этом случае уравнение (1) примет следующий вид:

$$F = B I l \quad (2)$$

откуда

$$B = \frac{F}{Il}, \quad (3)$$

где F - сила, действующая со стороны магнитного поля на проводник с током,

l - длина проводника,

I - сила тока в проводнике.

Из равенства (3) следует, что индукция магнитного поля B есть величина, численно равная силе, действующей на проводник единичной длины и перпендикулярный линиям индукции поля, по которому течет ток, равный единице.

За единицу индукции в системе СИ принимается Тесла (тл) - индукция такого однородного поля, в котором на прямой проводник длиной 1 м и с током в 1 ампер действует сила в 1 ньютон.

(При условии, что проводник перпендикулярен линиям поля).

$$1 \frac{\text{НЬЮТОН}}{\text{метр} \cdot \text{ампер}} = 1 \frac{\text{ВОЛЬТ} \cdot \text{СЕК}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{ВООЕР}}{\text{м}^2} = 1 \text{ тесла.}$$

Выражение (3) дает возможность экспериментально определить индукцию магнитного поля. Для этого необходимо измерить величину силы F , действующей на проводник, длину проводника l и силу тока в нем I .

§ 2. Описание прибора

Для измерения магнитной индукции используется электродинамометр. С его помощью можно измерить силу, с которой магнитное поле одного электрического тока действует на другой ток, находящийся в этом поле (рис. I).

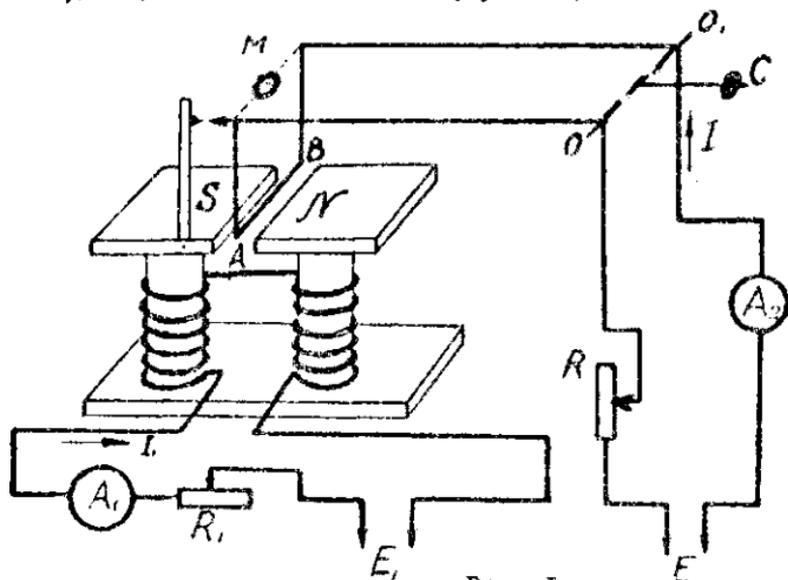


Рис. I.

Магнитное поле, индукцию которого необходимо определить, создается электромагнитом. По обмотке электромагнита от источника тока E_1 течет ток I_1 . Между полюсами магнитов (SN) помещается проводник AB . Этому проводнику придают определенную форму и конструктивно укрепляют так, чтобы он образовал подвижную систему.

При пропускании тока I от источника E через проводник AB на него действует сила F . Направления токов подбираются такими, чтобы эта сила выталкивала проводник AB вверх. Силы, действующие на остальные участки подвижной системы, взаимно уравновешиваются.

Величину выталкивающей силы F можно определить, если на чашечку M поместим разновески, которые возвратят подвижную систему в исходное положение. Сила F будет равна весу разновесок P

$$F = P \quad (3)$$

Силу тока I , протекающего по проводнику AB , измеряют амперметром A_2 , а длину проводника AB — масштабной линейкой. Таким образом, пользуясь равенством (3), можно определить индукцию магнитного поля B .

В данной работе требуется установить графическую зависимость индукции B от тока I , в катушке электромагнита.

§ 3. Порядок выполнения работы

1. Собрать установку по схеме (рис. 1).
2. С помощью противовеса "С" установить подвижную систему в равновесное положение.
3. Замкнуть цепь батареи E и установить в подвижной системе с помощью реостата ток I , равный I_0 , который необходимо поддерживать неизменным в процессе всей работы.
4. Замкнуть цепь источника E_1 . Направление тока должно быть таким, чтобы проводник AB выталкивался вверх. С помощью реостата установить в обмотке электромагнита ток, равный $0,5$ а.
5. Нагрузить чашу весов M разновесками и добиться возвращения системы в исходное положение. Определить вес

этих равновесок Р.

6. Указания в пунктах 4 и 5 измерения повторить не менее 8 раз для различных токов I_1 в электромагните, увеличивая его каждый раз на 0,25а.

Данные занести в таблицу.

7. Результаты измерений выразить в системе СИ и по формуле (3) вычислить величину В для каждого значения тока I_1 в катушке электромагнита

№ измерений	I (ампер)	F (миллиграмм)	F (ньютон)	B (тесла)
-------------	----------------	---------------------	-----------------	----------------

8. По полученным данным на миллиметровой бумаге построить график зависимости $B = f(I_1)$.

§ 4. Контрольные вопросы

1. Дать определение индукции магнитного поля. Какими единицами она измеряется?

2. От каких параметров зависит величина и направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле?

3. Дать описание метода определения индукции, применяемого в данной работе.

4. Объяснить зависимость $B = f(I_1)$, выраженную графиком.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 30

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА САМОИНДУКЦИИ МЕТОДОМ
ЛУБЕРА

Приборы и принадлежности: исследуемая катушка самоиндукции с вставным сердечником, реостат, амперметр постоянного тока, вольтметры постоянного и переменного тока, понижающий трансформатор, ключ, соединительные провода.

§ 1. Теоретическое введение

При всяком изменении тока в электрической цепи изменяется и величина связанного с ним магнитного потока. Так как связанный с током магнитный поток пронизывает площадь, ограниченную контуром цепи, то при изменении тока в какой-нибудь электрической цепи в ней самой возникает электродвижущая сила индукции, называемая электродвижущей силой самоиндукции. Величина электродвижущей силы самоиндукции определяется по формуле

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

где Φ - поток магнитной индукции, связанный с током, текущим по цепи.

Величина магнитного потока, т.е. число линий индукции, охватывающих контур цепи, пропорционально току протекающему в цепи

$$\Phi = L I. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности L в этой зависимости носит название индуктивности или коэффициента самоиндукции

контур. Если ток $I = 1$, тогда $\mathcal{L} = \Phi$, т.е. индуктивность контура численно равна потоку магнитной индукции, пронизывающему площадь, ограниченную контуром, когда по этому контуру течет ток, равный единице. Величина этого коэффициента зависит от размеров и формы контура и от магнитной проницаемости среды.

Электрический ток не может существовать без связанного с ним и окружающего его магнитного поля, поэтому всякий контур обладает индуктивностью. Однако, можно изготовить контур, индуктивность которого будет достаточно мала. Для этого необходимо максимально облизить участки контура, по которым ток проходит в противоположных направлениях (шнур осветительной сети, бифилярная обмотка в реостатах).

Большой индуктивностью обладает соленоид с большим числом близко расположенных витков и большой площадью сечения. Индуктивность еще больше увеличивается при наличии в соленоиде железного сердечника.

Величину электродвижущей силы самоиндукции, возникающей при изменении тока в контуре, можно получить, подставив в формулу (1) значения Φ из формулы (2). Тогда:

$$\mathcal{E} = - \frac{d\mathcal{L}I}{dt} \quad (3)$$

Если форма контура не меняется, то \mathcal{L} выносится за знак производной как постоянная величина и

$$\mathcal{E} = - \mathcal{L} \frac{dI}{dt} \quad (4)$$

Здесь L - величина положительная. Следовательно, знак электродвижущей силы самоиндукции определяется знаком $\frac{dI}{dt}$. Если $\frac{dI}{dt} > 0$, то $\mathcal{E} < 0$ - электродвижущая сила самоиндукции направлена навстречу возрастающему току. Если $\frac{dI}{dt} < 0$, т.е. если ток в контуре уменьшается, то $\mathcal{E} > 0$, и направление электродвижущей силы самоиндукции совпадает с направлением тока.

Формула (4) дает возможность дать другое определение индуктивности: производная от тока по времени, есть скорость изменения тока. Если она будет равна единице, то $L = 1/\mathcal{E}$. Это значит, что индуктивность контура численно равна электродвижущей силе самоиндукции, возникающей в контуре при равномерном изменении в нем тока на одну единицу за единицу времени (при скорости изменения тока, равной единице).

Исходя из этого определения, вводится единица индуктивности или коэффициента самоиндукции. В системе единиц СИ она называется ГЕНРИ (гн).

1 генри - есть индуктивность такого контура, в котором возникает электродвижущая сила самоиндукции в 1 вольт при равномерном изменении в нем тока на 1 ампер за 1 сек

$$1_{\text{гн}} = \frac{1 \text{ вольт} \cdot 1 \text{ сек}}{1 \text{ ампер}}$$

При прохождении по проводнику переменного тока в нем возбуждается э.д.с. самоиндукции. Токующий по провод-

нику с индуктивностью L ток меняется не только вследствие изменения приложенного напряжения, но и вследствие действия возникающей в нем э.д.с. самоиндукции. Это же действие сказывается в том, что максимального значения ток достигает позже, чем приложенное напряжение. В случае, если проводник обладает ничтожным омическим сопротивлением, ток отстает от напряжения на $1/4$ периода; сдвиг фаз между приложенным напряжением и силой тока равен $\frac{\pi}{2}$. При этом максимальное или амплитудное значение тока будет равно

$$I_{max} = \frac{U_{max}}{\omega L}, \quad (5)$$

где ω - циклическая частота;

U - напряжение.

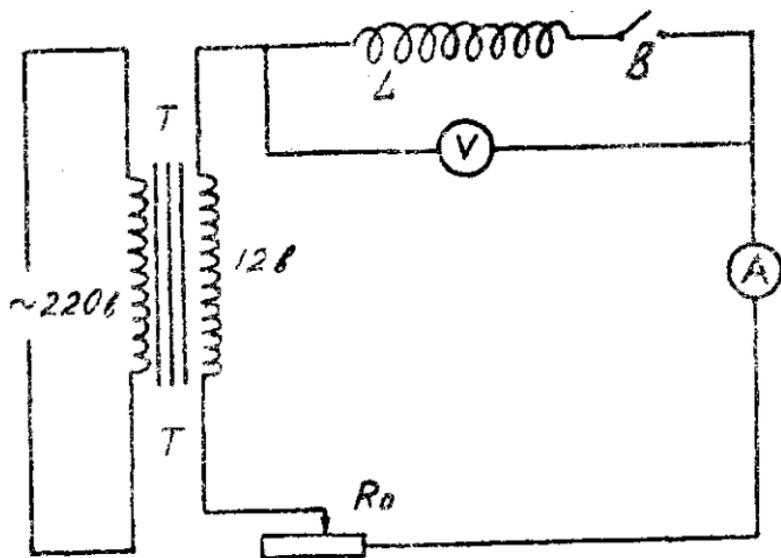


Рис. 2.

Сравнение формулы (5) с законом Ома $I = \frac{U}{R}$ показывает, что величина ωL играет роль сопротивления. Она называется индуктивным сопротивлением.

Чтобы индуктивное сопротивление ωL было выражено в омах, L нужно выразить в генри. Индуктивное сопротивление зависит не только от индуктивности контура, но и пропорционально циклической частоте тока ($\omega = 2\pi f$).

Теория переменных токов показывает, что при наличии в цепи омического сопротивления (R) и индуктивного сопротивления (ωL) полное сопротивление (Z) переменному току равно

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}. \quad (6)$$

Пользуясь формулой (6), можно определить индуктивность соленоида L методом Жубера, измеряя его омическое и полное сопротивление. Для этой цели, подключив исследуемую катушку в цепь постоянного тока и измеряя силу тока I и напряжение U , определяют омическое сопротивление

$$R = \frac{U}{I}. \quad (7)$$

Подключив эту же катушку в цепь переменного тока и измеряя силу тока i и напряжение u , определяют полное сопротивление

$$Z = \frac{u}{i}. \quad (8)$$

Рабочую формулу для вычисления коэффициента самоиндукции можно получить, если выражение (6) возвести в квадрат и из него выразить L ,

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - R^2}.$$

Учитывая, что пользуясь током от сети с частотой

$$V = 50 \text{ гц. } \omega = 2\pi f = 314, \text{ что } Z^2 - R^2 = (Z-R)(Z+R)$$

окончательно получим

$$L = \frac{1}{314} \sqrt{(Z-R)(Z+R)}. \quad (9)$$

§ 2. Порядок выполнения работы

I. Собрать цепь по схеме, приведенной на рис. I.

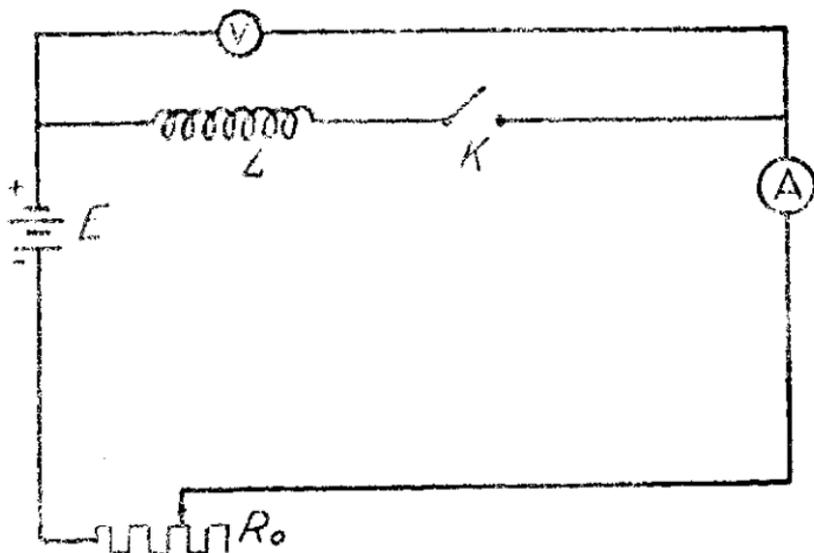


Рис. I.

Здесь \mathcal{E} - источник постоянного тока, \mathcal{L} - исследуемая катушка; R_0 - реостат; A - амперметр и V - вольтметр постоянного тока.

Вынуть сердечник из катушки.

2. Произвести не менее пяти измерений тока и соответствующего напряжения, начиная от силы тока в 1 ампер, и изменяя её всякий раз на 0,5-1 ампер. Изменения тока добиваться перемещением ползунка реостата.

3. Данные измерений занести в таблицу 1 и по формуле $R = \frac{U}{I}$ рассчитать для каждого измерения омическое сопротивление катушки R , среднее значение $R_{ср}$ и среднюю абсолютную погрешность $\Delta R_{ср}$.

4. Собрать цепь с источником переменного тока (рис. 2). На этой схеме Т-Т - понижающий трансформатор, \mathcal{L} - исследуемая катушка, R_0 - реостат, A, V - амперметр и вольтметр переменного тока.

5. Измерить силу тока и напряжение при различных положениях сердечника:

- а) без сердечника;
- б) сердечник вставлен на $1/3$ длины катушки;
- в) на $1/2$ - длины катушки;
- г) сердечник полностью введен в катушку;

При каждом положении сердечника произвести не менее трех измерений.

Данные занести в таблицу 2.

По данным каждого измерения рассчитать полное сопротивление Z .

Для каждого положения сердечника рассчитать среднее значение полного сопротивления Z_{cp} и среднюю абсолютную погрешность ΔZ_{cp} .

6. По среднему значению Z_{cp} и средним значениям $R_{сд}$ вычислить коэффициент самоиндукции L для каждого положения сердечника.

7. Для случая полностью введенного сердечника рассчитать абсолютную погрешность ΔL и относительную погрешность $\frac{\Delta L_{cp}}{L_{cp}}$.

Таблица I

№ измерения	I	II	III	ΔR
среднее				

Длина ввод. сердеч- ника	Число измерен.	1	2	3	4	5
0	1 2 3 среднее					
$\frac{1}{2}$	1 2 3 среднее					
1	1 2 3 среднее					

§ 4. Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление самоиндукции?
2. Что называется коэффициентом самоиндукции и в каких единицах он измеряется?
3. Дать описание метода Жубера для определения коэффициента самоиндукции.
4. Вывести рабочую формулу для определения коэффициента самоиндукции.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 31

СНЯТИЕ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА *1

Приборы и принадлежности: звуковой генератор ЗГ-2А, электронный осциллограф ЭО-7, тороид.

§ I. Теоретическое введение

Все вещества по своим магнитным свойствам делятся на диамагнетики и парамагнетики. К диамагнетикам относятся: медь, висмут, сурьма, серебро, золото, свинец, углерод, ртуть, цинк и др.

К парамагнетикам - натрий, калий, алюминий, хром, марганец, а также железо, никель, кобальт, гадолиний и некоторые сплавы. Деление на диа- и парамагнетики производится по следующему принципу.

Бсякий движущийся заряд создает вокруг себя магнитное поле. Закрытому контуру с током приписывается магнитный момент $\vec{P}_m = I\vec{S}$,

где I - ток в контуре; S - площадь, ограниченная контуром.

Направление вектора \vec{P}_m связано с направлением тока правилом правого винта. Электрон, движущийся вокруг ядра атома, можно представить как замкнутый контур с током.

Электрон в атоме вследствие движения вокруг ядра обладает орбитальным магнитным моментом и вследствие спина - спиновым магнитным моментом. Векторная сумма

*1 Данную работу подготовил П. П. САВИЦКИЙ,

всех магнитных моментов электронов в атоме (молекуле) образует собственный магнитный момент атома (молекулы). Если вещество состоит из атомов, собственный магнитный момент которых равен нулю, то такие вещества называются диамагнетиками. Если вещества состоят из атомов (молекул), собственные магнитные моменты которых не равны нулю, то такие вещества называются парамагнетиками.

На электроны в атомах, помещенные в магнитное поле, действует пара сил, которая вызывает прецессионное движение электрона (ось электрона описывает коническую поверхность). Это прецессионное движение обуславливает возникновение дополнительного магнитного поля, направленного всегда против внешнего поля. Поэтому диамагнетик, помещенный во внешнее магнитное поле, создает результирующее магнитное поле, направленное противоположно внешнему полю. У парамагнетиков, помещенных во внешнее магнитное поле, также возникает указанный выше эффект. Кроме того, на молекулы парамагнетика, обладающие собственными магнитными моментами, действует вращающий момент сил, ориентирующий их так, чтобы собственные магнитные моменты были направлены в сторону внешнего поля.

Собственный магнитный момент атомов (молекул) парамагнетика компенсирует диамагнитный эффект и создает дополнительный (результирующий) магнитный момент, который направлен в сторону внешнего магнитного поля.

Таким образом, магнетик в магнитном поле намагничивается. Степень намагничения вещества принято характеризовать вектором намагничения \vec{J} .

Вектором намагничения называется величина, численно равная суммарному магнитному моменту единицы объема вещества.

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{P}_m}{\Delta V}, \quad (2)$$

где $\sum \vec{P}_m$ - суммарный магнитный момент вещества;
 ΔV - объем.

Вектор намагничения оказывается пропорциональным напряженности внешнего магнитного поля \vec{H}

$$\vec{J} = \chi \vec{H}, \quad (3)$$

где χ - относительная магнитная восприимчивость вещества.

Магнитное поле, создаваемое магнетиком, векторно складывается с внешним магнитным полем, и суммарное поле характеризуется индукцией \vec{B} магнитного поля. Вектор индукции равен

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{J} \\ \text{или} \quad \vec{B} &= \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \chi \vec{H} \end{aligned} \quad (4)$$

Каждый магнетик характеризуется относительной магнитной проницаемостью μ_r , которая показывает, во сколько раз индукция поля B в присутствии магнетика больше индукции B_0 магнитного поля в вакууме, т.е.

$$\mu_r = \frac{B}{B_0} \quad (5)$$

Из сказанного выше следует, что для диамагнетиков ($\mu_r < 1$), а для парамагнетиков ($\mu_r > 1$). Однако как для диамагнетиков, так и для большинства парамагнетиков μ_r очень мало отличается от единицы.

Существует группа парамагнетиков, которые обладают целым рядом особых свойств, что заставляет выделить их в особую группу, получившую название ферромагнетиков. К ним относятся: железо, никель, гадолиний, эрбий и их сплавы, а также некоторые сплавы, не содержащие ферромагнетиков.

Например, сплав из 61,5% Cu , 23,5% Mn и 15% M (сплав Гейслера).

К особым свойствам ферромагнетиков относятся:

- 1) все ферромагнетики - кристаллические вещества;
- 2) для всех ферромагнетиков относительная магнитная проницаемость ($\mu_r \gg 1$) и является сложной функцией от H ;
- 3) у всех ферромагнетиков, после снятия внешнего поля, остается остаточная намагниченность;
- 4) зависимость вектора намагничения \vec{J} от H не является линейной, а выражается следующим графиком (рис. I)

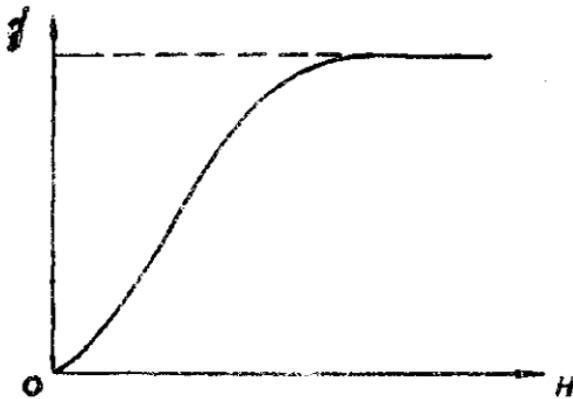


Рис. 1.

Зависимость \vec{B} от H в соответствии с формулой (4) может быть представлена следующим графиком (рис.2)

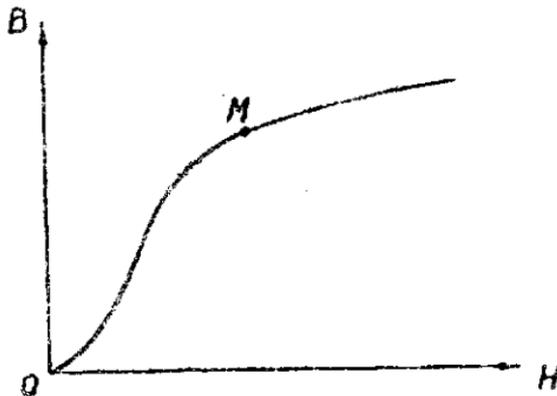


Рис. 2.

Точка M соответствует магнитному насыщению. Во:
ростание \vec{B} , начиная от точки M обусловлено только
возрастанием \vec{H} , а \vec{j} , достигнув насыщения, оста:
ется постоянным.

Важной характеристикой ферромагнетиков является магнитный гистерезис.

Если ранее ненамагниченный ферромагнетик поместить в среду, магнитное поле в которой постепенно увеличивается, начиная от нуля, зависимость B от H (кривая намагничивания) выразится кривой OM , где точка M соответствует магнитному насыщению (рис 3).

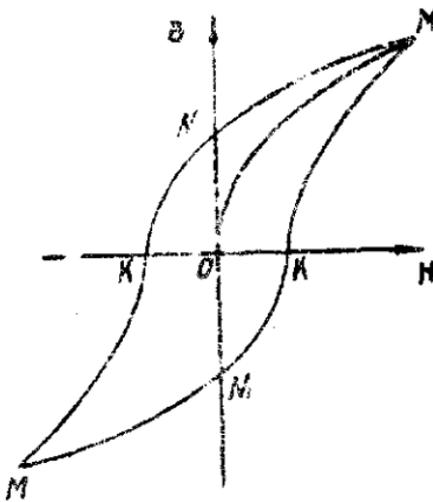


Рис. 3.

Так как ферромагнетику присущи свойства остаточного намагничивания, то при уменьшении напряженности магнитного поля до нуля, кривая, как видно из графика (рис. 3), не совпадает с OM , а пойдет по MM' .

Величина $B = ON$ называется остаточной индукцией. Для того, чтобы снять остаточную индукцию, необходимо изменить направление поля H .

Величина $H_c = OK$, необходимая для снятия остаточной индукции, называется коэрцитивной силой. При дальнейшем изменении напряженности магнитного поля H вновь достигается насыщение (точка M_s). Если напряженность магнитного поля H изменить до нуля, а затем увеличивать, получим кривую M, M, K, M .

Замкнутая кривая M, M, K, M, M, K, M называется петлей гистерезиса. Остаточная индукция, коэрцитивная сила и петля гистерезиса в целом являются важными характеристиками ферромагнетиков.

Различные ферромагнетики дают весьма разнообразные петли гистерезиса.

Принято различать "мягкие" магнитные материалы, характеризуемые малой коэрцитивной силой, и "жесткие", характеризуемые большой коэрцитивной силой.

К числу первых относятся мягкое железо, кремниевая сталь, сплавы железа с никелем. К числу "жестких" относятся углеродистые и специальные стали.

Теория ферромагнетизма была создана Я.И.Френкелем и В. Гейзенбергом (1928 г.). Из опытов следует, что магнитные свойства ферромагнетиков обуславливаются собственными (спиновыми) магнитными моментами электронов. При определенных условиях в процессе кристаллизации возникает структура, которая выстраивает магнитные моменты электронов параллельно друг другу. В результате возникает микроскопические области спонтанного (самопроиз-

вольного) намагничения, которые называются доменами. В пределах каждого домена ферромагнетик спонтанно намагничен до насыщения и обладает определенным магнитным моментом. Вследствие хаотического расположения доменов в отсутствие внешнего поля суммарный момент образца равен нулю. Под действием внешнего магнитного поля происходит ориентация доменов в направлении внешнего поля, в результате чего возрастает индукция поля B и при сравнительно небольших полях достигается насыщение. Этот процесс является необратимым, что и служит причиной гистерезиса.

Возможность возникновения ферромагнетизма определяется:

1. Наличием нескомпенсированных спинов на недостроенных оболочках атома.

2. Отношение параметра кристаллической решетки к диаметру электронной орбиты, на которой находится электрон с нескомпенсированным спином, должно быть равно или превышать 1,5, т.е.

$$\frac{d}{2R} \geq 1,5, \text{ где}$$

d - параметр решетки,

$2R$ - диаметр орбиты.

Для каждого ферромагнетика имеется определенная температура T_k , при которой домены распадаются, вещество утрачивает ферромагнитные свойства и становится обычным парамагнетиком. Эта температура называется точкой Кюри.

§ 2. Описание прибора

Схема установки приведена на рис. 4

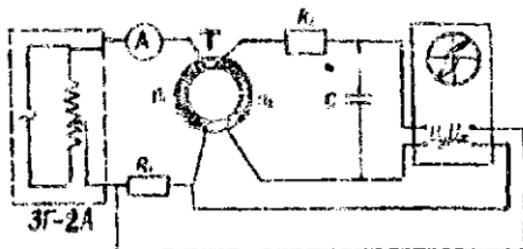


Рис. 4.

Первичная обмотка тороида Т питается от звукового генератора ЗГ-10 через сопротивление R_1 переменным током J_1

Напряженность магнитного поля внутри полого тороида равна

$$H = n_1 J_1, \quad (6)$$

где n_1 - число витков на единицу длины в первичной обмотке; J_1 - ток в обмотке.

Напряжение на сопротивлении R_1 , которое подается на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа ЗС-6, будет равно

$$U_x = J_1 R_1. \quad (7)$$

Согласно формуле (6) ток J_1 равен $J_1 = \frac{H}{n_1}$

Подставив J в формулу (7), получим

$$U_x = \frac{R_2}{R_1} H. \quad (8)$$

Напряжение U_x , подаваемое на горизонтальные пластины осциллографа, пропорционально напряженности магнитного поля H .

Ток во вторичной обмотке с числом витков n_2 тороида T появляется за счет э.д.с. индукции. Э.д.с. индукции равна

$$\mathcal{E} = - \frac{d\varphi}{dt}, \quad (9)$$

где φ - поток вектора магнитной индукции через поверхность, охватываемую всеми витками вторичной обмотки. Если S - площадь, охватываемая одним витком, а n_2 - число витков ее, тогда $\varphi = BS n_2$

и э.д.с. будет равна

$$\mathcal{E} = - S n_2 \frac{dB}{dt}. \quad (10)$$

Закон Ома для вторичной цепи, пренебрегая самоиндукцией вторичной обмотки, запишется в следующем виде:

$$\mathcal{E} = U_c + I R_2, \quad (11)$$

$$191 \quad U_c = U_y = \frac{q}{c} = \frac{\int J dt}{c}. \quad (12)$$

Здесь U_c - напряжение на конденсаторе,

Q - заряд на конденсаторе.

Если R_1 велико, то величиной U_c в формуле (II) можно пренебречь, тогда

$$\mathcal{E} = IR_1 = -S n_1 \frac{dB}{dt},$$

откуда

$$I = -\frac{n_1 S}{R_1} \frac{dB}{dt} \quad (13)$$

Подставляя значения I из (13) в формулу (12), получим напряжение, подаваемое на вертикально отклоняющие пластины осциллографа,

$$U_c = -\frac{n_1 S}{R_1 C} \int \frac{dB}{dt} dt = -\frac{n_1 S}{R_1 C} \int dB = -\frac{n_1 S}{R_1 C} B, \quad (14)$$

т.е. U_y пропорционально индукции B .

В результате, на одни пластины подается напряжение, пропорциональное напряженности магнитного поля H , а на другие - пропорциональное индукции B ; на экране осциллографа получается петля гистерезиса.

§ 3. Порядок выполнения работы

1. Собрать установку по схеме рис.4.
2. Включить в цепь образец № 1. Для чего тумблеры на передней панели футляра установить в положение "1".
3. На генераторе ручки управления установить в следующих положениях:
 - а) "затухание g " - в нулевых положениях;

- б) " вых.сопротивление" - в положении 50,
- в) " множитель" - в положении 10,
- г) ручкой " рег.вых.напр." установить напряжения на выходе 40-60 вольт.

4. На осциллографе ручки управления установить в следующих положениях:

а) переключатель диапазона частот - в положение " выключить";

б) "ослабление" - в положение 1:10 .

5. Ручками "усиление" по осям "X" и "Y" на осциллографе, а также подбором частоты генератора добиться максимального изображения петли гистерезиса на экране осциллографа.

6. Зарисовать полученную петлю гистерезиса на миллиметровой бумаге.

7. Определить l_x (длину световой полоски по оси "X") и l_y (длину световой полоски по оси "Y") для исследуемого образца.

8. Зная цену деления по осям "X" и "Y" (h и β), определить коэрцитивную силу и остаточную индукцию образца по формулам

$$H_c = h l_x \quad \text{и} \quad B = \beta l_y .$$

Данные измерений занести в таблицу.

9. Включить в цепь образец № 2.

Для чего тумблеры на передней панели футляра установить в положение " 2 ".

Выполнить задания, предусмотренные пунктами 5-8.

Образцы № 1									
Образцы № 2									

§ 4. Контрольные вопросы

1. По какому признаку вещества делятся на диамагнетики и парамагнетики?
2. Как и почему изменяется магнитное поле при внесении в него диамагнетика и парамагнетика?
3. Какие вещества относятся к ферромагнетикам и каковы их основные свойства?
4. Каково объяснение ферромагнитных свойств веществ?
5. В чем состоит явление гистерезиса и его объяснение?

ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

I. Основные физические постоянные

Физическая постоянная	Обозначение	Числовое значение
Нормальное ускорение свободно падающих тел	g	$9,81 \text{ м/сек}^2$
Гравитационная постоянная	γ	$6,67 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{сек}^2$
Число Авогадро	N	$6,02 \cdot 10^{26} \text{ кмоль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	R	$8,32 \cdot 10^3 \text{ Дж/град} \cdot \text{кмоль}$
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/град}$
Стандартный объем идеального газа (объем одного киломоля идеального газа при нормальных условиях)	V_0	$22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$
Элементарный электрический заряд	e	$1,60 \cdot 10^{-19} \text{ к}$
Число Фарадея	F	$9,65 \cdot 10^7 \text{ к/кг-экв}$
Скорость света в вакууме	c	$3 \cdot 10^8 \text{ м/сек}$
Постоянная закона Стефана-Больцмана	σ	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}^4$
Постоянная закона смещения Вина	c'	$2,89 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{град}$
Постоянная в формуле второго закона Вина	c''	$1,50 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/м}^3 \cdot \text{град}^5$
Постоянная Планка	h	$6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{сек}$
Постоянная Ридберга (для атома водорода I H^{I})	R	$1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$

	1	2	3
Радиус первой боровской орбиты	r_1	$0,529 \cdot 10^{-10} \text{ м}$	
Комптонская длина волны электрона	λ	$2,43 \cdot 10^{-12} \text{ м}$	
Магнетон Бора	μ_B	$0,927 \cdot 10^{-29} \text{ Дж/тл}$	
Потенциал ионизации атома водорода (энергия ионизации)	I_a	$2,18 \cdot 10^{-18} \text{ Дж}$ (13,6 эВ)	
Атомная единица массы	-	$1,660 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$	
Коэффициент пропорциональности между энергией в МэВ и массой в а.е.м.	k	931 МэВ/а.е.м.	

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Вещество	Плотность кг м ³	Температура плавления °С	Удельная теплоемкость		Удельная теплота плавления дж кг	Коэффициент линейного расширения град ⁻¹
			дж кг.град.	ккал кг.град.		
Алюминий	2600	659	896	0,214	$3,22 \cdot 10^5$	$2,3 \cdot 10^{-5}$
Железо	7900	1530	500	0,119	$2,72 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Латунь	8400	900	386	0,092	-	$1,9 \cdot 10^{-5}$
Л е д	900	0	2100	0,5	$3,85 \cdot 10^5$	-
Медь	8600	1100	395	0,094	$1,76 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Олово	7200	232	230	0,055	$5,86 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^{-5}$
Платина	21400	1770	117	0,028	$1,13 \cdot 10^5$	$0,89 \cdot 10^{-5}$
Пробка	200	-	2050	0,49	-	-
Свинец	11300	327	126	0,030	$2,26 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^{-5}$
Серебро	10500	960	234	0,056	$8,8 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^{-5}$
Сталь	7700	1300	460	0,11	-	$1,06 \cdot 10^{-5}$
Цинк	7000	420	391	0,093	$1,17 \cdot 10^5$	$2,9 \cdot 10^{-5}$

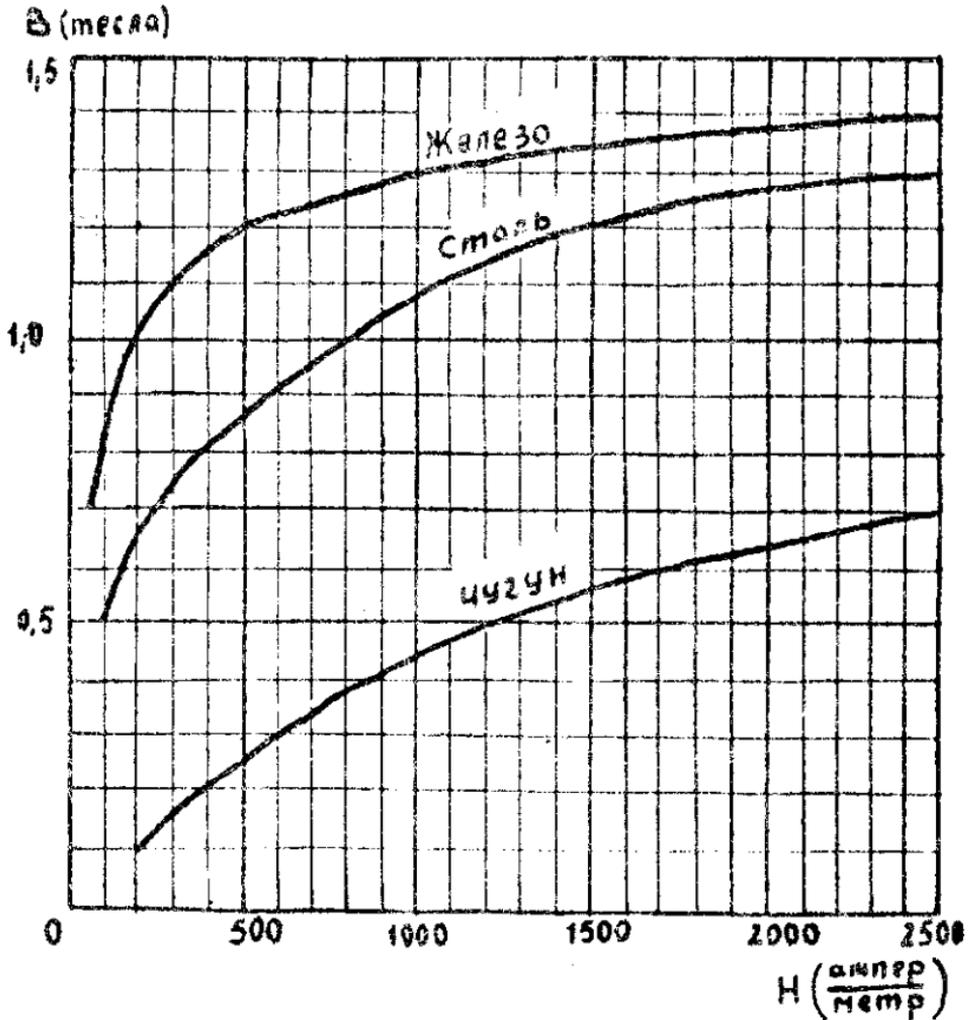
3. УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ
СОПРОТИВЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ПРОВОДНИКОВ

Материал проводника	Удельное сопротивление ом.м. при 0°C	Температурный коэффициент сопротивления (град ⁻¹)
Алюминий	$2,53 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$
Вольфрам	-	$4,6 \cdot 10^{-3}$
Железо	$8,7 \cdot 10^{-8}$	-
Константан (сплав) 60% <i>Cu</i> + 40% <i>Ni</i> :	$(0,40-0,51) \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^{-4}$
Манганин (сплав) 84% <i>Cu</i> +4% <i>Ni</i> +12% <i>Mn</i>	$0,42 \cdot 10^{-6}$	-
Медь	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$0,4 \cdot 10^{-2}$
Никелин (сплав) 62% <i>Cu</i> + 18% <i>Ni</i> +20% <i>Zn</i>	$(0,40-0,44) \cdot 10^{-6}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$
Нихром (сплав) 57% <i>Ni</i> + 16% <i>Cr</i> + 26% <i>Fe</i> + 1% <i>Mn</i>	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$0,3 \cdot 10^{-3}$
Ртуть	$9,4 \cdot 10^{-7}$	$2,7 \cdot 10^{-3}$
Серебро	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$0,4 \cdot 10^{-2}$
Свинец	$2,2 \cdot 10^{-7}$	$0,41 \cdot 10^{-2}$

4. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ НЕКОТОРЫХ
ВЕЩЕСТВ (относительная)

№№ п/п	Наименование веществ	Диэлектрическая проницаемость
1.	Воздух	1,0006
2.	Воск	7,8
3.	В о д а	81
4.	Керосин	2,0
5.	Масло трансформа- торное	2,2
6.	Парафин	2,0
7.	Слюда	4-5
8.	Стекло	4-7
9.	Фарфор	6-7
10.	Янтарь	12,8

5. Зависимость магнитной индукции от напряженности.



Редактор Л. КАРШАКЕВИЧ
Корректор М. БЕРЕЗАЙТЕС

Подписано к печати 8. УП. 1968 г. Формат 60 x 84 $\frac{1}{16}$. Печ. л. 3,474.

Уч.-изд. л. 3,86. Заказ 172. Тираж 1000 экз. Цена 11 коп. Отпечатано на
роталпривте БИМСХ.