

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ «ВИТЕБСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

# **МАГНЕТИЗМ И ЭЛЕКТРИЧЕСТВО**

**лабораторный практикум по курсу «Физика»**

**Витебск  
2008**

УДК 531/534 + 539.19

ББК 22.3

Э 55

Магнетизм и электричество. лабораторный практикум по курсу «Физика»

Министерство образования Республики Беларусь, Витебск, УО «ВГТУ», 2007г.

Составители: ст. пр. Мясоедов А.В.,  
д. т. н., профессор Рубаник В.В.;  
к.т.н., доцент Джежора А.А.;  
ассистент Аристов А.А.;  
к.ф-м.н., доцент Шилин А.А.

Лабораторный практикум содержит теорию основных вопросов раздела физики «Электричество и магнетизм», в практической части изложен порядок выполнения работ в учебной лаборатории. Приводится перечень контрольных вопросов и рекомендуемой литературы для самостоятельной работы. Рекомендуется для аудиторной и индивидуальной работы студентов УО «ВГТУ» технологических специальностей.

Одобрено кафедрой физики УО «ВГТУ», протокол № 2 от 17 сентября 2007 г.

Рецензент: доцент кафедры автоматизации научных исследований ВГУ им. П.М. Машерова, к.т.н. Жидкевич В.И.

Редактор: доцент кафедры физики Кузнецов А.А.

Рекомендовано к опубликованию редакционно - издательским Советом УО «ВГТУ», протокол № от 2007 года.

Ответственный за выпуск Сапежинский В.С.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»

Подписано к печати \_\_\_\_\_ Формат \_\_\_\_\_ Уч.-изд. лист \_\_\_\_\_  
Печать ризографическая. Тираж \_\_\_\_\_ Заказ \_\_\_\_\_ Цена \_\_\_\_\_ руб.

Отпечатано на ризографе Учреждения образования «Витебский государственный технологический университет». Лицензия № 02330/0133005 от 01.04.04.  
210035, г. Витебск, Московский проспект, 72.

## Лабораторная работа Э -11

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ СОЛЕНОИДА

**Цель работы:** изучение явления индуктивности

**Приборы и принадлежности:** катушка индуктивности, железный сердечник, источник переменного тока, амперметр и вольтметр переменного тока, мост для измерения сопротивления, ключи, провода.

**Теоретическое обоснование.** М. Фарадей установил (1828-1831 гг.), что во всяком проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции, пронизывающего этот контур, возникает электродвижущая сила индукции.

Э. Ленц в 1833 г. сформулировал правило, определяющее направление индукционного тока. Согласно этому правилу (закону Ленца) индукционный ток в замкнутом контуре имеет такое направление, при котором его собственный магнитный поток компенсирует то изменение потока индукции, которое его вызвало.

Величина э.д.с. индукции пропорциональна скорости изменения потока магнитной индукции во времени (закон Фарадея).

$$E_i = -k \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \text{ или } E_i = -k \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

где  $k$  - коэффициент пропорциональности.

Знак минус, стоящий в правой части равенства (1), показывает, что увеличение потока ( $\frac{d\Phi}{dt} > 0$ ) вызывает э.д.с.  $E_i < 0$ , т. е. поле индукционного тока на-

правлено навстречу потоку; уменьшение потока ( $\frac{d\Phi}{dt} < 0$ ) вызывает  $E_i > 0$ , т. е. направления потока и поля индукционного тока совпадают. Величина  $k$  зависит от выбора системы единиц. В СИ  $k=1$  и формула (1) принимает вид

$$E_i = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2)$$

Если поток магнитной индукции измеряется в веберах, а время в секундах, то э.д.с. измеряется в вольтах.

Индукционный ток возникает также в проводящем контуре, включенном в цепь переменного тока. В этом случае при всяком изменении тока в электрической цепи изменяется и поток магнитной индукции, созданный этим током. Так как этот изменяющийся поток пронизывает площадь, ограниченную контуром, то в контуре и возникает э.д.с. индукции. Такое явление называется самоиндукцией. Таким образом, самоиндукция - это возбуждение э.д.с. индукции в проводящем контуре вследствие изменения потока магнитной индукции, который создается током, протекающим в этом же контуре. Поток магнитной индукции, сцепленный с контуром, зависит от силы тока в этом контуре, т.е.

$$\Phi = L I, \quad (3)$$

где  $L$  - коэффициент пропорциональности, называемый индуктивностью контура. Он зависит от размеров, формы контура и от магнитных свойств среды, в которой расположен контур.

В СИ индуктивность измеряется в генри;

$$1 \text{ Гн} = 10^3 \text{ мГн} = 10^6 \text{ мкГн}.$$

Подставляя в формулу (2) значение  $\Phi$  из формулы (3), получим

$$E_1 = - \frac{d(LI)}{dt} \quad (4)$$

Для данного контура  $L$  - величина постоянная и поэтому ее можно вынести за знак дифференциала.

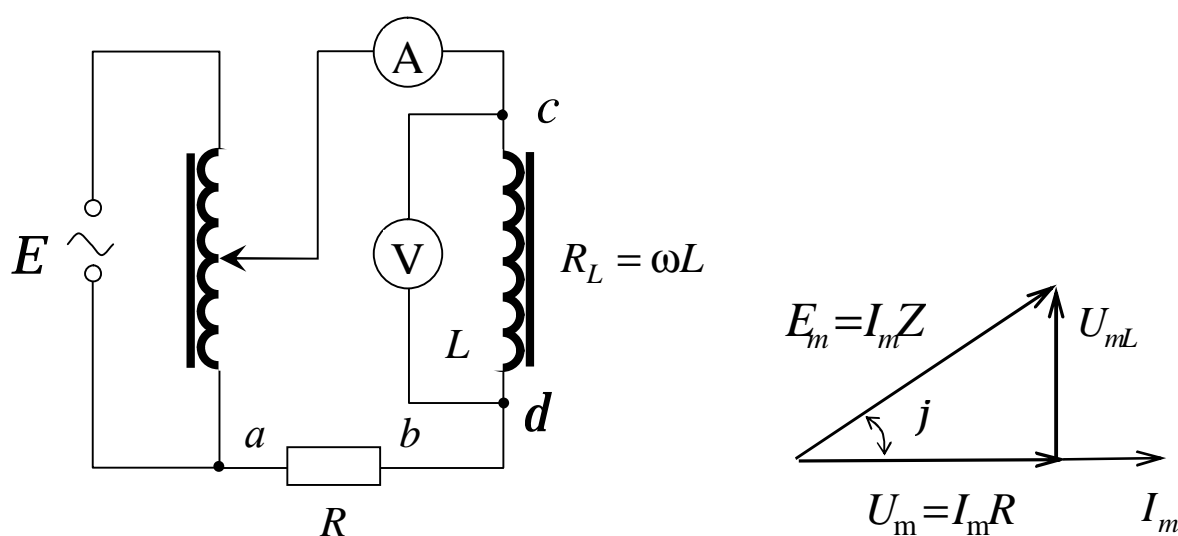


Рис.1

$$E_1 = -L \frac{dI}{dt} \quad (4a)$$

Индуктивность можно определить различными методами. Рассмотрим определение индуктивности с помощью переменного тока.

Пусть в цепь переменного тока последовательно включены омическое  $R$  и индуктивное  $R_L$  сопротивления (рис.1). Сопротивление, величина которого зависит от размеров проводника и не зависит от частоты тока, протекающего по этому проводнику, называется омическим. Оно имеет одинаковое значение, как для постоянного, так и для переменного тока.

Сопротивление, величина которого зависит от индуктивности проводника и частоты переменного тока, протекающего по этому проводнику, называется индуктивным. Оно определяется по формуле

$$R_L = \omega L = 2 \pi \nu L,$$

где  $\omega = 2 \pi \nu$ ,  $\nu = 50$  Гц - частота переменного тока.

Э.д.с. генератора, подключенного к контуру, изменяется по закону

$$E = E_m \sin \omega t,$$

где  $E$  - мгновенное значение э.д.с.;

$E_m$  - амплитудное (максимальное) значение э.д.с.

В цепи, обладающей только омическим сопротивлением, ток изменяется по закону  $I = I_m \sin \omega t$ , где  $I$  и  $I_m$  - соответственно мгновенное и амплитудное значение силы тока.

В цепи, обладающей омическим сопротивлением и индуктивностью, возникает ток  $I = I_m \sin (\omega t - \varphi)$ , отстающий по фазе от э.д.с. на угол  $\varphi$ , называемый сдвигом фаз между током и напряжением.

Для каждого момента времени к замкнутой цепи можно применить второй закон Кирхгофа: сумма падений напряжений на участках контура равна сумме э.д.с., имеющихся в данном контуре:

$$I R = E + E_L;$$

$$I R = E_m \sin \omega t - L \frac{dI}{dt}.$$

Подставив вместо  $I = I_m \sin (\omega t - \varphi)$  и производной

$$\frac{dI}{dt} = \omega I_m \cos(\omega t - \varphi) \text{ их значения}$$

$$I_m R \sin(\omega t - \varphi) = E_m \sin \omega t - L I_m \omega \cos(\omega t - \varphi)$$

и заменив  $\cos(\omega t - \varphi) = \sin[(\omega t - \varphi) + \frac{\pi}{2}]$ ,

получим

$$I_m R \sin(\omega t - \varphi) = E_m \sin \omega t - I_m \omega L \sin[(\omega t - \varphi) + \frac{\pi}{2}]$$

или

$$E_m \sin \omega t = I_m R \sin(\omega t - \varphi) + I_m \omega L \sin[(\omega t - \varphi) + \frac{\pi}{2}] \quad (5)$$

Стоящие справа члены равенства (5) представляют собой сумму двух гармонических колебаний одного периода с разностью фаз  $\frac{\pi}{2}$ . Амплитуды этих колебаний

$$I_m R = U_m \text{ и } I_m \omega L = U_{mL}.$$

Геометрическая сумма амплитуд дает вектор амплитуды э.д.с. ( $E_m$ ).

Для получения результирующего значения  $E_m$  воспользуемся векторной диаграммой напряжений (рис.1).

Амплитудное значение падения напряжения на омическом сопротивлении (участок  $ab$ ) на диаграмме изображается вектором

$$U_m = I_m R,$$

направленным вдоль оси тока, а амплитудное значение напряжения на индуктивном сопротивлении (участок cd) - вектором  $U_{mL} = I_m R_L = I_m \omega L$ , сдвинутом по фазе на  $\frac{\pi}{2}$ .

По численному значению  $U_{mL}$  равняется э.д.с. индукции  $E_L$ , но обратно по направлению.

Из прямоугольного треугольника определим результирующий вектор  $E_m$ :

$$E_m^2 = I_m^2 R^2 + I_m^2 L^2 \omega^2,$$

откуда амплитудное значение силы тока

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

Найденная зависимость является законом Ома для цепи переменного тока.

Так как приборы измеряют обычно эффективное значение тока и напряжения, используя соотношения  $U_{\text{эф}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$  и  $I_{\text{эф}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ , закон Ома для участка цепи переменного тока, содержащей омическое и индуктивное сопротивления, формула (6) принимает вид

$$I_{\text{эф}} = \frac{U_{\text{эф}}}{\sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}} = \frac{U_{\text{эф}}}{Z}, \quad (7)$$

$$\text{где } Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}.$$

Угол  $\varphi$ , образованный результирующим вектором  $E_m$  и осью токов, дает сдвиг фаз между э.д.с. и током:

$$\text{tg } \varphi = \frac{U_{mL}}{U_m} = \frac{\omega L}{R}. \quad (8)$$

Из зависимости (8) следует, что чем больше индуктивное сопротивление, тем больше сдвиг фаз  $\varphi$  и тем меньше мощность переменного тока:

$$P = I_{\text{эф}} U_{\text{эф}} \cos \varphi \quad (9)$$

В данной работе определяется индуктивность катушки, для чего из уравнения (7) находят сопротивление  $Z$ :

$$Z = \frac{U_{\text{эф}}}{I_{\text{эф}}}. \quad (10)$$

определив индуктивное сопротивление

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

вычисляют индуктивность катушки:

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z^2 - R^2}. \quad (11)$$

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. При помощи моста постоянного тока измеряют омическое сопротивление соленоида  $R$ . (Смотри инструкцию по измерению сопротивления мостом постоянного тока).

2. Для определения полного сопротивления  $Z$  собирают электрическую цепь по схеме (рис.2) и снимают три раза отсчеты по амперметру и вольтметру при трех разных положениях ползунка на латре (не допускать силу тока более 2А). По формуле (10) находят три значения  $Z$  а затем по формуле (11) – индуктивность соленоида  $L$  без сердечника.

3. В соленоид вставляют железный сердечник и повторяют измерения, указанные в п. 2. Результаты измерений записывают в таблицу.

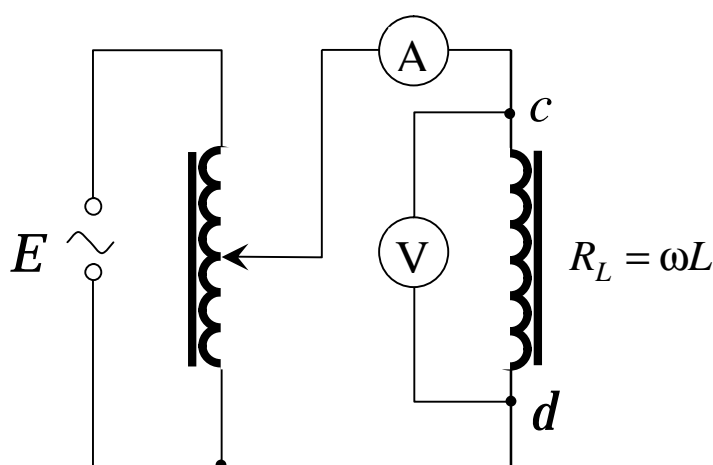


Рис. 2

Таблица

	№ измерений	$R, \text{Ом}$	$I_{\text{эф}}, \text{А}$	$U_{\text{эф}}, \text{В}$	$Z = U_{\text{эф}} / I_{\text{эф}}, \text{Ом}$	$Z_{\text{ср}}, \text{Ом}$	$L, \text{Гн}$	$\cos \varphi = R / Z$	$\varphi, \text{рад}$	$P = IU \cos \varphi, \text{Вт}$
Без сердечника										
С жел. Сердечн.										

### Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Ленца для определения направления индукционного тока. Поясните этот закон примерами.
2. Какими способами можно изменить э.д.с. индукции?
3. Что такое самоиндукция? Как она возникает?
4. Какие факторы влияют на величину индуктивности контура?
5. По какому закону происходит изменение тока и э.д.с. в соленоиде?
6. Что такое омическое, индуктивное сопротивление?
7. Построить векторную диаграмму напряжений для цепи, содержащей омическое и индуктивное сопротивление.
8. Запишите закон Ома для цепи переменного тока. В чем его отличие от закона Ома для цепи постоянного тока?
9. Что такое сдвиг фаз между э.д.с. и током? Как он определяется?
10. Что нужно знать для определения мощности переменного тока?

### Лабораторная работа Э -12

#### ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**Цель работы:** изучить законы Ома для переменного тока.

**Принадлежности:** источник переменного тока на 220 В; латр; ключ; амперметр на 1-2 А; вольтметр на 300 В; сопротивление на 200 Ом, катушка индуктивности; 2 конденсатора; омметр.

**Теоретическое обоснование.** Электрические колебания, возникающие под действием периодически изменяющейся электродвижущей силы, называются вынужденными. Примером таких колебаний является переменный ток, возникающий в замкнутом контуре под действием переменной э. д. с. Закон Ома был установлен для постоянного тока, однако он остается справедливым и для мгновенных значений изменяющихся тока и напряжения, если только их изменения происходят не слишком быстро. Токи, удовлетворяющие такому условию, называются квазистационарными.

Переменный ток называется квазистационарным, если с достаточной степенью точности можно принять, что магнитное поле этого тока в каждый момент времени имеет те же значения, которые оно имеет в случае постоянного тока той же величины. В дальнейшем мы будем пользоваться только квазистационарными токами.

Процессы, протекающие в цепях переменного тока, несколько отличаются от процессов, наблюдаемых в цепях постоянного тока.



**Цепь, содержащая только омическое сопротивление.** Если в цепи (рис. 1) действует переменная э. д. с.  $E = E_m \sin \omega t$  то на основании закона Ома  $I = \frac{E_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t$ . Фаза э. д. с. и тока -  $\omega t$  одинакова, т. е. напряжение и ток одновременно достигают максимальных значений и одновременно обращаются в нуль.

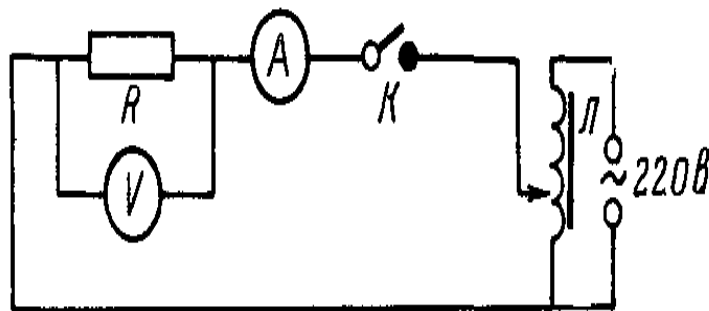


Рис. 1

**Цепь, содержащая емкостное сопротивление.** Пусть в цепь переменного тока с э. д. с.  $E = E_m \sin \omega t$  включен конденсатор емкостью  $C$  (рис. 2). Заряд на обкладках конденсатора будет

$$q = C(U_2 - U_1)$$

Разность потенциалов конденсатора при отсутствии омического сопротивления равна э. д. с., т. е.

$$U_2 - U_1 = E$$

Тогда

$$q = CE = CE_m \sin \omega t.$$

Ток найдем как

$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(CE_m \sin \omega t) = \omega CE_m \cos \omega t = \omega CE_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

Пусть

$$I_m = \omega CE_m$$

или

$$I_m = \frac{E_m}{\frac{1}{\omega C}},$$

где  $\frac{1}{\omega C} = X_C$  — емкостное сопротивление.

Сравнивая  $I = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$  с  $E = E_m \sin \omega t$ , видим, что ток опережает э.

д. с. по фазе на  $\frac{\pi}{2}$ .

Полученный результат имеет простой физический смысл. Напряжение на конденсаторе в любой момент времени определяется зарядом конденсатора в данный момент. Этот заряд был образован током, протекавшим в более ранней стадии колебаний, и поэтому колебания напряжения запаздывают относительно колебаний тока. Так, если в момент  $t = 0$  ток равен нулю, то на конденсаторе еще имеется отрицательный заряд, перенесенный током в предыдущий период времени, и напряжение не равно нулю. Для обращения в нуль этого заряда необходимо, чтобы некоторое время  $t_1$  проходил ток положительного направления. Когда же заряд конденсатора (а значит, и напряжение) станет равным нулю, ток уже не будет равен нулю.

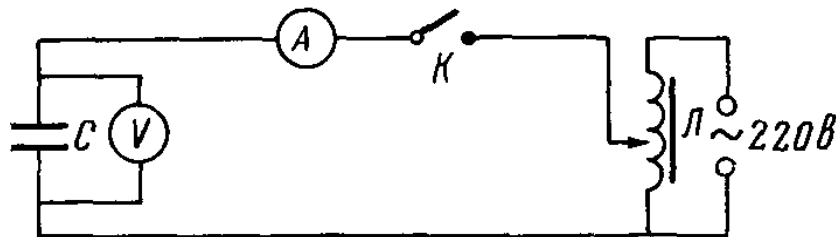


Рис. 2

**Цепь, содержащая омическое, индуктивное и емкостное сопротивления.** Соединим последовательно омическое, индуктивное и емкостное сопротивления (рис. 3). Пусть в такой цепи течет синусоидальный ток  $I = I_m \sin \omega t$

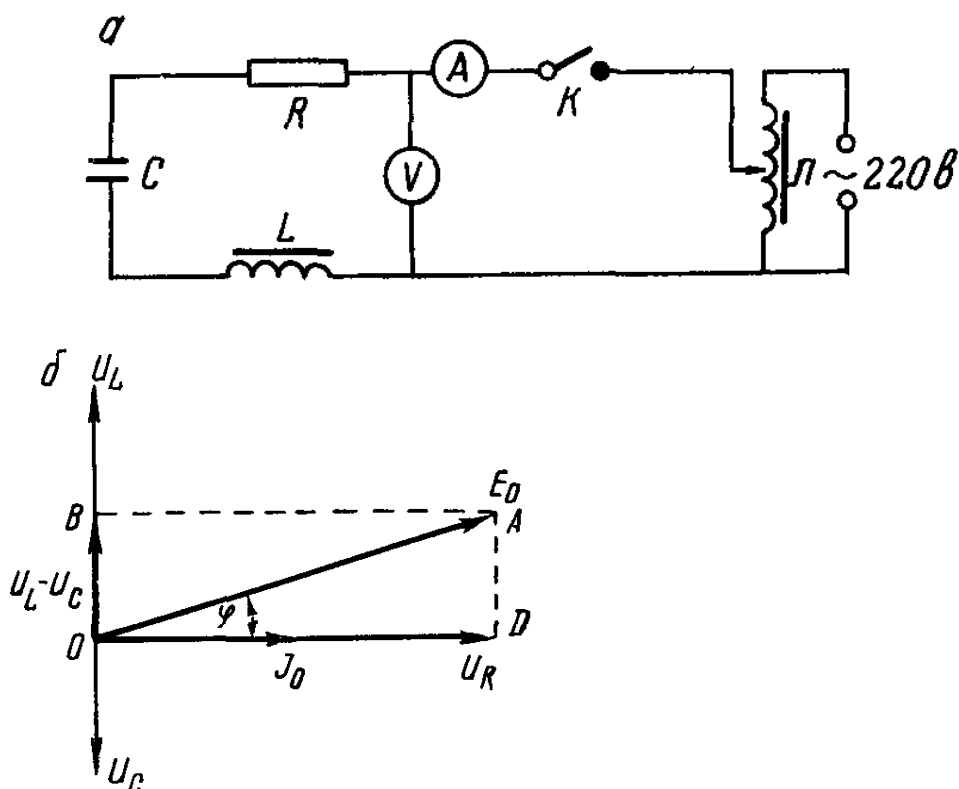


Рис. 3

На каждом из сопротивлений происходит падение напряжений  $U_R$ ,  $U_C$ ,  $U_L$ . Если ток постоянный, э. д. с. равна сумме падений напряжения на отдельных участках цепи. Если ток переменный, э. д. с. равна векторной сумме падений напряжения:

$$\overline{E_m} = \overline{U_R} + \overline{U_C} + \overline{U_L}.$$

Для определения э. д. с. построим векторную диаграмму (рис. 4). Так как при индуктивном сопротивлении э. д. с. опережает ток на  $\frac{\pi}{2}$ , а при емкостном э. д. с. отстает от тока на  $\frac{\pi}{2}$ , то векторы  $\overline{U_L}$  и  $\overline{U_C}$  будут направлены по одной прямой, но в противоположные стороны. Их можно сложить с учетом знака. Отрезок  $OB = U_L - U_C$  дает результирующий вектор. Из  $\triangle OAD$  можно найти вектор  $OA = E_0$ .

$$E_m = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{I_m^2 R^2 + (I_m X_L - I_m X_C)^2} = I_m \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}.$$

Отсюда

$$I_m = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} = \frac{E_m}{Z},$$

где  $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$  - полное сопротивление в цепи переменного тока. Из  $D O A D$  находим

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{I_0 X_L - I_0 X_C}{I_0 R} = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R},$$

где  $j$  - сдвиг фаз между током и напряжением.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

### **Упражнение 1. Определение омического сопротивления цепи**

Амперметр устанавливают на предел измерения 1,5 А, вольтметр - на 300 В. Собирают схему согласно рис. 1. При трех различных положениях ползунка на латре, соответствующих напряжению 100, 150, 200 В, снимают показания амперметра и вольтметра и заносят их в таблицу 1.

Таблица 1

№ п/п	$U_{\text{эф}}, \text{В}$	$I_{\text{эф}}, \text{А}$	$R, \text{Ом}$
1			
2			
3			

По формуле  $R = \frac{U_{\text{эф}}}{I_{\text{эф}}}$  определяют величину сопротивления.

Здесь  $U_{\text{эф}}$  и  $I_{\text{эф}}$  — эффективные значения напряжения и тока, регистрируемые электроизмерительными приборами в случае переменного тока.

Эффективным или действующим значением переменного тока называется такой постоянный ток, который мог бы произвести то же самое действие, что и переменный, в одинаковые промежутки времени.

$$I_{\text{эф}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U_{\text{эф}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}},$$

где  $I_m$ ,  $U_m$  — амплитудные значения тока и напряжения.

### **Упражнение 2. Определение емкостного сопротивления в цепи переменного тока и емкости конденсатора**

Заменить амперметр на миллиамперметр с пределом измерения 100 мА, предел измерения вольтметра - 300 В.

Собирают схему согласно рис. 2. При положении ползунка на латре, соответствующем 100 В, снимают показания амперметра и вольтметра и записывают их в таблицу 2.

Таблица 2

	$U_{эф}, В$	$I_{эф}, А$	$R_C, Ом$	$C, Ф$
1 конденсатор				
2 конденсатор				
Конденсаторы, соединенные последовательно				
Конденсаторы, соединенные параллельно				

По формуле  $R_C = \frac{U_{эф}}{I_{эф}}$  определяют емкостное сопротивление  $R_C = \frac{1}{\omega C}$ . Из этой формулы определяют емкость конденсатора:

$$C = \frac{1}{\omega R_C}.$$

Измерения производят сначала для одного конденсатора, потом для другого, затем соединяют их последовательно и параллельно.

### **Упражнение 3. Определение полного сопротивления цепи переменного тока**

Собирают схему согласно рис. 3. Миллиамперметр устанавливают на предел измерения 100 мА, вольтметр — на 300 В. Измеряют эффективные значения тока и напряжения при трех положениях движка на латре, соответствующих 100, 150 и 200 В, и записывают результаты в таблицу 3.

Таблица 3

№ п/п	$U_{эф}, В$	$I_{эф}, А$	$R_{эф}, Ом$	$Z, Ом$
1				
2				
3				

По формуле  $R_{эф} = \frac{U_{эф}}{I_{эф}}$  определяют полное сопротивление цепи. Это же сопротивление вычисляют, используя ранее найденные значения  $L$ ,  $C$  и  $R$ , по формуле (значение  $L$  берется из работы Э 11.)

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

Полученные результаты сравнивают.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение переменного тока.
2. Что такое период, круговая частота переменного тока?
3. Дайте определение эффективного напряжения (тока).
4. Получите закон Ома для цепи переменного тока, содержащей индуктивность.
5. Получите закон Ома для цепи переменного тока, содержащей емкость.
6. Как вычисляется общее сопротивление в цепи переменного тока?

## Лабораторная работа Э -13

### ИЗУЧЕНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

**Цель работы:** изучить устройство трансформатора и основные режимы его работы

**Приборы и принадлежности:** трансформатор, потенциометр, амперметры, вольтметры, ключи.

**Теоретическое обоснование.** Вокруг проводников с током образуется замкнутое магнитное поле, основными характеристиками которого является магнитная индукция  $\vec{B}$ , характеризующая интенсивность магнитного поля, и поток вектора магнитной индукции  $\Phi$ , проходящий через поверхность  $dS$  с единичной нормалью  $\vec{n}$ .

$$\Phi = \int_s \vec{B} d\vec{S} = \int_s B_n dS.$$

Если вектор  $\vec{B}$  в любой точке поля перпендикулярен поверхности, то  $B_n = B$  и для однородного магнитного поля

$$\Phi = B S = m \mu_0 H S, \quad (1)$$

где  $m$  - магнитная проницаемость среды;

$m_0$  - магнитная постоянная,  $m_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{M}$ ;

$H$  - напряженность магнитного поля.

Напряженность магнитного поля при наличии симметрии токов позволяет находить теорема о циркуляции  $\dot{H}$  (в электротехнике принято называть законом полного тока)

$$\oint_l \dot{H} d\vec{l} = \sum_{i=1}^n I_n, \quad (2)$$

т.е. циркуляция вектора напряженности магнитного поля по замкнутому контуру численно равна алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром.

С помощью вектора магнитной индукции  $\dot{B}$  и магнитного потока  $\Phi$  рассчитываются магнитные цепи, содержащие тело или группу ферромагнитных тел с различными сечениями и магнитными проницаемостями.

Примером магнитной цепи, состоящей из магнитопровода кольцеобразной формы, может служить схема, показанная на рис.1.

Для создания магнитного поля, а следовательно, и магнитного потока служит электрический ток  $I$ , протекающий по обмотке сердечника, содержащей  $n$  витков.

Применяя к токам однородной цепи теорему о циркуляции (2), беря за контур интегрирования среднюю магнитную линию  $l_{cp}$ , получим

$$\int \dot{H} d\vec{l} = H \int dl = H l = I n, \quad (3)$$

где произведение  $In$  (ампервитки) носит название магнитосодержащей силы  $E_m$ .

Тогда формула (1) с учетом (3) примет вид

$$\Phi = \frac{In}{\frac{l}{\mu\mu_0 S}} = \frac{E_m}{R_m}, \quad (4)$$

где  $R_m$  - магнитное сопротивление. Формула (4) формально сходна с законом Ома для замкнутой неразветвленной цепи.

Пусть на общий сердечник намотаны две катушки (рис.2) и через обмотку с  $n_1$  витками проходит ток  $I_1$ , изменяющийся со временем по закону  $I = I_m \sin wt$  и создающий магнитный поток  $\Phi$ . Тогда через вторичную обмотку с  $n_2$  витками, проходит магнитный поток (с учетом 4)

$$\Phi_{2,1} = n_2 \Phi = \frac{I n_1 n_2 \mu\mu_0 S}{l}.$$

Вследствие гистерезиса в магнитопроводе магнитный поток отстает по фазе от намагничивающего тока

$$\Phi = \Phi_m \sin(wt - a)$$

и состоит из рабочего потока  $\Phi_K$ , замыкающегося через сердечник с обеими обмотками, и потока рассеяния  $\Phi_S$ , сцепленного с первичной обмоткой и совпадающего по фазе с током (обычно  $\Phi_S$  составляет при холостом ходе транс-

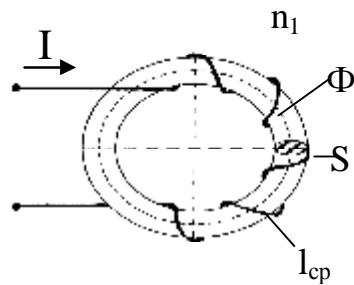


Рис. 1

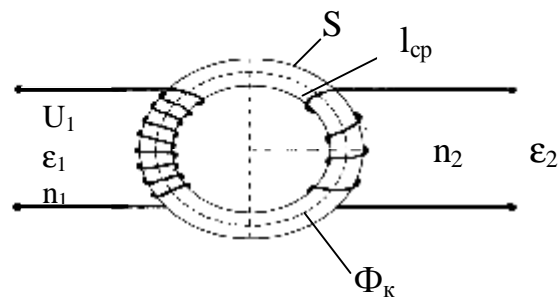


Рис. 2

форматора 0,25 % от рабочего потока  $\Phi_K$ ).

Так как  $\Phi_K$  пронизывает одновременно первичную и вторичную обмотки, то в первичной обмотке возбуждается э.д.с. самоиндукции  $E_1$ , а во вторичной - э.д.с. взаимной индукции  $E_2$ .

Мгновенное значение э.д.с. самоиндукции

$$E_1 = -n_1 \frac{d\Phi_K}{dt} = -\Phi_m n_1 \omega \cos(\omega t - a) = n_1 \Phi_m \omega \sin(\omega t - a - \frac{\pi}{2}).$$

Из этой формулы видно, что э.д.с. самоиндукции отстает от магнитного потока на  $90^\circ$  и имеет амплитудное значение

$$E_m = \Phi_m n \omega.$$

где  $\omega$  - угловая частота, связанная с линейной частотой  $\nu$  соотношением  $\omega = 2\pi\nu$  (для технического переменного тока  $\nu = 50$  Гц).

Действующее или эффективное значение э.д.с. самоиндукции

$$E_{эфф} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{\Phi_m n_1 \omega}{\sqrt{2}} = 4,44 n_1 \Phi_1 \nu \quad (5)$$

Э.д.с. самоиндукции  $E_1$  по правилу Ленца направлена против подведенного к первичной обмотке напряжения  $U_1$ . Тогда по закону Ома ток  $I_1$  в этой цепи будет определяться внешней э.д.с.  $E_m$  и э.д.с. самоиндукции  $E_1$ :

$$I_1 R_1 = E_m + E_1 = E_m - n_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

где  $I_1 R_1$  - падение напряжения на первичной обмотке:

$R_1$  - сопротивление первичной обмотки.

Так как падение напряжения  $I_1 R_1$  на активном сопротивлении первичной обмотки всегда ничтожно мало (при разомкнутой вторичной обмотке), тогда



$$U_1 @ -E_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt} . \quad (6)$$

т.е. э.д.с. самоиндукции первичной обмотки  $E_1$  уравнивается подведенным напряжением  $U_1$ .

Аналогично э.д.с. взаимной индукции  $E_2$ , возникающая во вторичной обмотке, выразится такой же формулой, так как возбуждается одним и тем же потоком:

$$E_2 @ n_2 \frac{d\Phi}{dt} . \quad (7)$$

Из сравнения (6) и (7) видно, что э.д.с. во вторичной обмотке и приложенное к первичной напряжение всегда противоположны по фазе. Подобные две катушки, насаженные на общий сердечник, образуют трансформатор.

Трансформатор – электромагнитная установка, служащая для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения при неизменной частоте тока.

Трансформаторы называются однофазными или трехфазными в зависимости от того, для преобразования какого тока они предназначены. В основе работы трансформатора лежит принцип взаимной индукции. Он может работать в трех основных режимах – в режиме холостого тока, под нагрузкой и в режиме короткого замыкания, когда вторичная обмотка замыкается накоротко.

Холостым ходом называется такой режим, при котором вторичная обмотка не замкнута ( $I_2 = 0$ ), тогда напряжение, подведенное к первичной обмотке  $U_1$ , уравнивает э.д.с. самоиндукции  $E_1$ , обусловленную потоком рассеивания  $\Phi_s$ , а также падением напряжения  $I_1 R_1$  в первичной обмотке, т.е.

$$U_1 = -E_1 - E_s + I_1 R_1.$$

Так как  $E_s$  и  $I_1 R_1$  малы по сравнению с  $E_1$ , то

$$U_1 @ E_1.$$

Напряжение на вторичной обмотке при холостом ходе равно э.д.с. индукции, и поэтому его измерение дает возможность вычислить коэффициент трансформации с учетом абсолютных значений формул (6, 7):

$$k = \frac{n_1}{n_2} = \frac{E_2}{E_1} @ \frac{U_2}{U_1} \quad (8)$$

При  $\frac{n_2}{n_1} > 1$  имеем повышающий трансформатор, увеличивающий напряжение и понижающий величину тока.

Работа трансформатора под нагрузкой характеризуется тем, что во вторичной обмотке через нагрузку течет ток  $I_2$ , создающий магнитный поток вторичной обмотки, направленный на встречу магнитного потока первичной обмотки.

В связи с этим размагничивается сердечник и уменьшается индуктивное сопротивление первичной обмотки, что приводит (при  $U = \text{const}$ ) к увеличению тока  $I_1$  и восстановлению магнитного потока до первоначальной величины.

При изменении нагрузки, т.е. тока  $I_2$ , автоматически будет изменяться ток  $I_1$ , причем так, что

$$I_1 n_1 = I_2 n_2,$$

или с учетом формулы (8)

$$\frac{I_1}{I_2} @ \frac{U_2}{U_1} @ \frac{E_2}{E_1} = k, \quad (9)$$

т.е. токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны напряжению в них.

Пренебрегая потерями и применяя закон сохранения энергии, можно написать, что мощности тока в обмотках практически одинаковы:

$$E_1 I_1 @ E_2 I_2$$

Тогда коэффициент полезного действия трансформатора определяется как коэффициент полезной мощности ко всей подведенной:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Так как неизвестен  $\cos \varphi_1$  в первичной обмотке, то мощность  $P_1$  необходимо измерять ваттметром. Мощность, используемая во вторичной цепи на активном сопротивлении, может с большей степенью точности определяться по показаниям амперметра и вольтметра. Принимая  $\cos \varphi_2 = 1$ ,

$$\eta = \frac{I_2 U_2}{P_1}.$$

При отсутствии в первичной цепи индуктивности и емкости

$$\eta = \frac{I_2 U_2}{I_1 U_1}. \quad (10)$$

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

### Упражнение 1. Определение магнитного потока и индукции в магнитопроводе

Измерьте сечение магнитопровода  $S$ . Соберите схему, изображенную на рис.3, подключив провода на зажимы 220 В

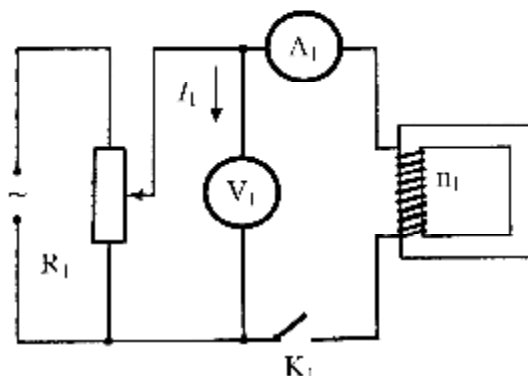


Рис. 3

первичной обмотки ( $n_1 = 1060$ ) трансформатора. При замкнутой цепи установите латром напряжение 100-200 В. Полученные данные занесите в табл.1.

Таблица 1

$n_1$	$S, \text{ м}^2$	$I_1, \text{ А}$	$U_1, \text{ В}$	$\Phi, \text{ Вб}$	$B, \text{ Гн}$

По формуле (5)

$$E_{\text{эфф}} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} = \frac{E_0 n_1 w}{\sqrt{2}} = 4,44 n_1 \Phi_1 \nu \quad (5)$$

определите значение магнитного потока, а по найденному значению магнитного потока вычислите индукцию в магнитопроводе (с учетом потерь) по формуле (1).  $\Phi = B S = m \ m_0 H S$ ,

### Упражнение 2. Определение коэффициента трансформации

Соберите цепь по схеме рис.4. Для этого подсоедините провода к зажимам на 220 В первичной и 12 В вторичной обмотки ( $n_1 = 1060, n_2 = 74$ ).

Изменяя латром напряжение на первичной обмотке  $U_1$  от 50 до 200 В,

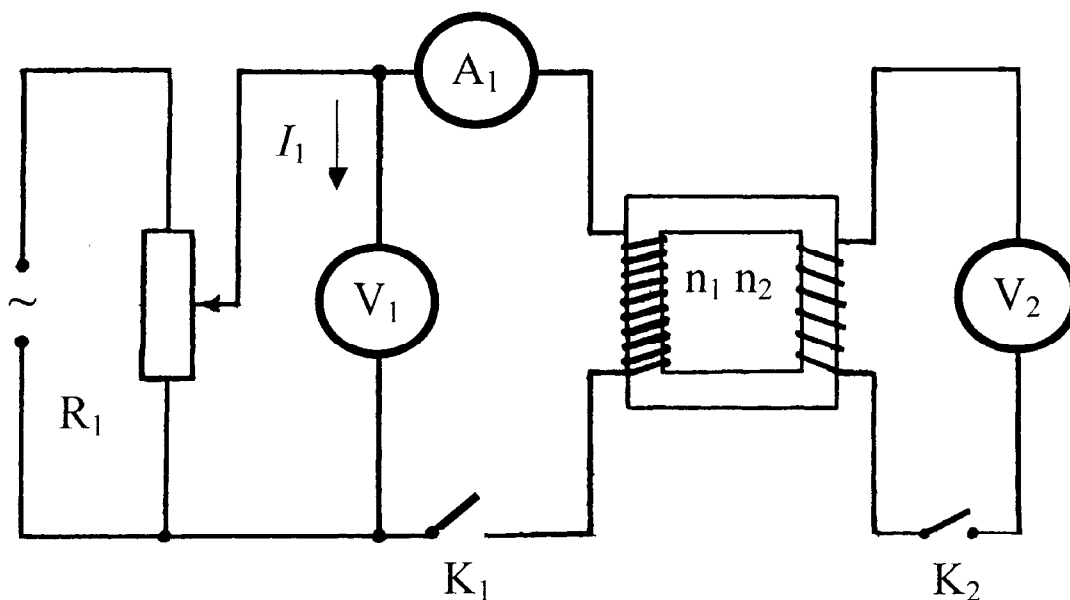


Рис. 4

Таблица 2

№ п.п.	$n_1$	$n_2$	$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$U_2, \text{В}$	$k$

### Упражнение 3. Зависимость первичного тока от нагрузки

Соберите цепь по схеме рис.5 (во вторичной обмотке провода подключите к крайним зажимам). Поставьте движок реостата  $R$  в положение, при котором в цепь введено его полное сопротивление. Замкните ключи  $K_1$  и  $K_2$ . Установите латром напряжение 80-100 В. Снимите показания приборов. Изменяя перемещением ползунка реостата силу тока в катушке, сделайте не менее 5 отсчетов и занесите их в таблицу.

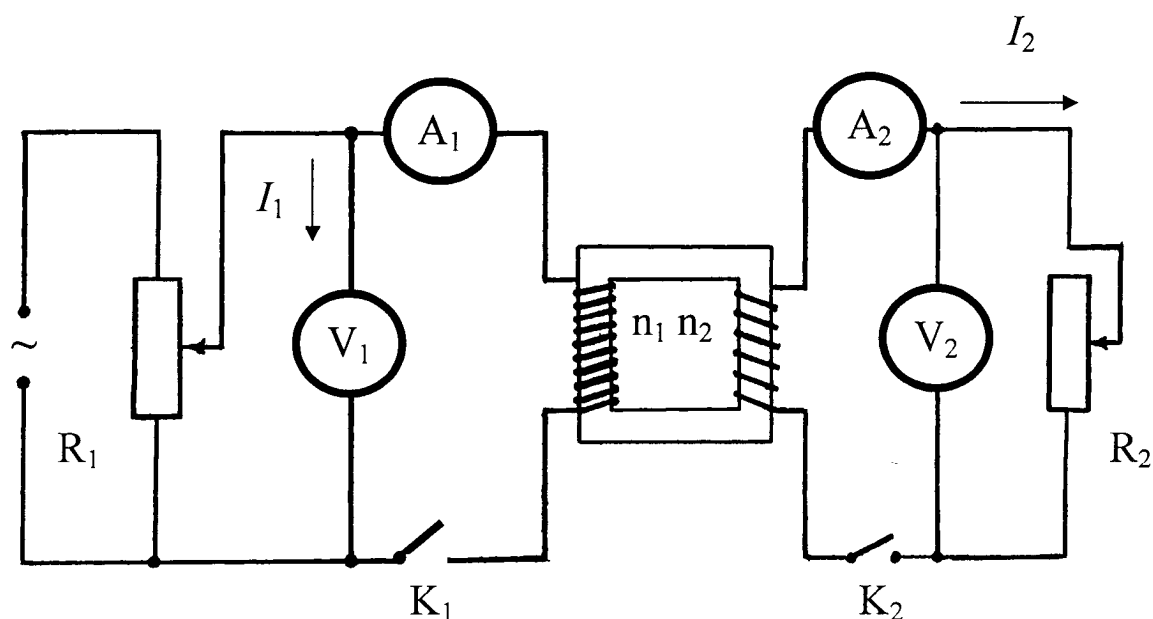


Рис. 5

Таблица 3

№ п.п.	$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$	$P_1, \text{Вт}$	$P_2, \text{Вт}$	$\eta$

По полученным данным постройте график  $I_1 = f(I_2)$ , а по формуле (10) определите  $\eta$ .

### Контрольные вопросы

1. Что называется магнитным потоком, напряженностью магнитного поля?
2. Запишите и сформулируйте закон полного тока.
3. В чем состоит явление электромагнитной индукции, самоиндукции?
4. Сформулируйте законы Фарадея и Ленца для электромагнитной индукции. Проиллюстрируйте их примерами.
5. Какое явление положено в основу работы трансформатора.
6. Объясните устройство трансформатора.
7. В каких основных режимах работает трансформатор?
8. Что такое коэффициент трансформации  $k$  и к.п.д. трансформатора?

### Лабораторная работа Э -14

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОПАРЫ И ТЕРМОКРЕСТА

**Цель работы:** изучение термоэлектрических явлений, основных параметров термопары и термокреста.

**Принадлежности:** термопара, термокрест, милливольтметр М-1109, термометр, электроплитка, понижающий трансформатор, реостат на 30 Ом, амперметр на 5 А, ключи, провода.

**Теоретическое обоснование.** Процессы, при которых происходит превращение тепловой формы движения материи в электрическую, называются термоэлектрическими.

Эти процессы чрезвычайно разнообразны. В 1756 г. Эпинус открыл явление пирозлектричества — электризации кристаллов при нагревании. В 1823 г. Зеебек установил, что тепловая энергия может непосредственно превращаться в энергию электрического тока. Это превращение происходит при контакте двух разнородных металлов.

При соприкосновении двух разнородных металлических проводников некоторые электроны могут переходить из одного металла в другой вследствие теплового движения. Проводник, в котором образуется избыток отрицательных зарядов, заряжается отрицательно. Если же в проводнике получится недостаток электронов, то он заряжается положительно. Возникающая контактная разность потенциалов называется внутренней.

Если составить замкнутую цепь из разнородных металлов, имеющих одинаковую температуру, то суммарная контактная разность потенциалов равна нулю и не вызывает тока в цепи. Однако если в местах соединений металлов будет различная температура  $t_1$  и  $t_2$ , то в цепи возникает электродвижущая сила,

называемая термоэлектрической. Такое соединение двух разнородных проводников называется термопарой.

Контактная разность потенциалов обусловлена двумя причинами:

- 1) различием работы выхода электронов из металлов  $A$  и  $B$ ;
- 2) различием в числе свободных электронов  $n_A$  и  $n_B$ , приходящихся на единицу объема в различных металлах.

Теоретическое рассмотрение явления термоэлектричества в классической физике приводит к следующему выражению для э. д. с. термопары:

$$E = C(t_2 - t_1), \quad (1)$$

где  $C$  — постоянная термопары.

$$C = \frac{k}{e} \ln \frac{n_A}{n_B},$$

где  $k$  постоянная Больцмана;  $e$  - заряд электрона;  $n_A$  и  $n_B$  — число свободных электронов, приходящихся на единицу объема соответствующих металлов.

Таким образом, э. д. с. термопары пропорциональна разности температур ее спаев.

Термопары могут изготавливаться из различных материалов. Они находят широкое применение для измерения и контроля температур в широких пределах. Они могут применяться также как преобразователи энергии теплового движения в электрическую.

В практике часто при использовании термопары нужно знать ее э. д. с. Для вычисления  $E$  теоретическая формула (1) практически неприменима. Пользуются другими методами.

Спаи термопары поддерживаются при различных температурах  $t_1$  и  $t_2$ . В цепь термопары включают гальванометр и магазин сопротивлений. При включении сопротивления  $R_1$  ток

$$I_1 = \frac{E}{R_0 + R_1} = k_i n_1, \quad (2)$$

где  $R_0$  — сопротивление гальванометра, термопары и подводящих проводов;  $k_i$  — цена деления гальванометра;  $n_1$  — число делений гальванометра, на которое отклонилась стрелка.

Если, не изменяя температуры спаев, включить сопротивление  $R_2$ , то ток в цепи

$$I_2 = \frac{E}{R_0 + R_2} = k_i n_2, \quad (3)$$

Исключая из уравнений (2), (3)  $R_0$ , найдем

$$E = k_i \frac{n_1 n_2}{n_1 - n_2} (R_2 - R_1). \quad (4)$$

Подставляя в (1)  $E$  из (4) и сделав преобразования, найдем

$$C = \frac{k_i}{t_2 - t_1} \frac{n_1 n_2}{n_1 - n_2} (R_2 - R_1). \quad (5)$$

где  $k_i$  — цена деления гальванометра;  $t_1$  и  $t_2$  — температура холодного и горячего спаев;  $n_1$  и  $n_2$  — число делений гальванометра, на которое отклонилась стрелка в первом и втором случаях;  $R_1$  и  $R_2$  — сопротивление магазина в первом и втором случаях.

**Описание установки.** Установка для изучения основных параметров термопары смонтирована на панели с кронштейном. Термопара изготовлена из двух проволок, концы которых сварены. Оба спая и термометры помещаются в изолирующие цилиндры с песком. Температура одного спая остается постоянной, равной температуре окружающего воздуха, а температура второго спая повышается при нагревании цилиндра на электроплитке. Одна проволока термопары разомкнута, и концы ее выведены к клеммам на панели. Возникновение э. д. с. термопары регистрируется гальванометром типа М 195.

Применяемый в работе термокрест имеет четыре клеммы. К двум из них с обозначением «~3А» подается переменный ток не более 3А, тогда между клеммами «+» и «—» возникает э. д. с., которая регистрируется гальванометром типа М 122.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

### Упражнение 1. Определение основных параметров термопары

Ознакомившись с приборами, устанавливают предел измерения милливольтметра 15 мВ.

По схеме (рис. 1) собирают цепь. На магазине сопротивлений, подключенном к клеммам «0» и «9999 Ом», набирают сопротивление 20 Ом. По термометру не подогреваемого спая определяют начальную температуру спаев  $t_1$  (второй термометр не вынимают из оправы).

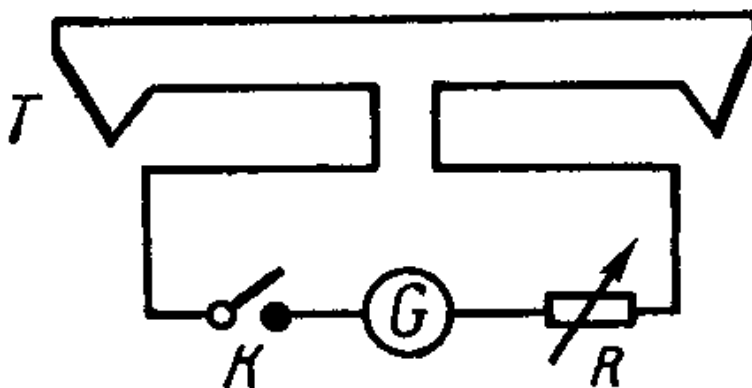


Рис. 1.

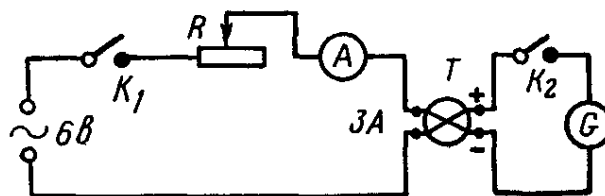


Рис. 2.

Включают электроплитку и ожидают, пока температура подогреваемого спая станет равной  $30^{\circ}\text{C}$ . Непрерывно наблюдая за термометром, отмечают показания вольтметра через каждые  $5^{\circ}\text{C}$  до температуры спая  $t_2 = 100^{\circ}\text{C}$ .

Данные измерений заносят в таблицу и строят график зависимости  $E = f(Dt)$ , откладывая по оси абсцисс разность температур между спаями термопары -  $Dt$ , а по оси ординат -  $E$  - э.д.с. термопары (показания милливольтметра).

По формуле (4) вычисляют э.д.с. термопары. Зная термоэлектродвижущую силу  $E$  и разность температур  $t_2 - t_1$  вычисляют постоянную термопары  $S$  по формуле (5). Все вычисления производят в системе СИ.

### **Упражнение 2. Зависимость термотока от основного тока, идущего по термокресту**

По схеме (рис. 2) собирают цепь, соединяя клеммы «+» и «-» термокреста с милливольтметром М1109. К клеммам «~3А» от понижающего трансформатора подают напряжение 6 В, включая в цепь реостат на 30 Ом, амперметр на 5А и ключ.

Замыкают цепь переменного тока ключом  $K_1$ . С помощью реостата доводят ток до 1 А. Затем замыкают цепь постоянного тока ключом  $K_2$  и через минуту записывают показания гальванометра.

Аналогичные показания гальванометра снимают для токов через интервал 0,2 А. Строят график зависимости  $E = f(I)$ , откладывая по оси абсцисс показания амперметра, а по оси ординат - значения термо э.д.с. (показания милливольтметра).

### **Контрольные вопросы**

1. Какие явления называются термоэлектрическими?
2. От чего зависит термоэлектродвижущая сила термопары?
3. Где находят применение термопары?
4. Какой физический смысл имеет постоянная термопары?
5. Расскажите о назначении термокреста.
6. Чем отличается термокрест от термопары?

### **Лабораторная работа Э 15**



## ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

**Цель работы:** изучить магнитные свойства различных веществ и экспериментально наблюдать явление гистерезиса.

**Приборы и принадлежности:** осциллограф, два тороидальных ферромагнитных образца (находятся внутри прибора), соединительные провода.

**Теоретическое обоснование.** Всякое вещество, находясь в магнитном поле, приобретает магнитные свойства (намагничивается) и называется магнетиком. Магнитное поле неразрывно связано с электрическим током. Естественно было предположить, что и магнитные свойства веществ обусловлены наличием в атомах и молекулах веществ электрических токов. Такую гипотезу впервые высказал Ампер в 1820 г. Токи, циркулирующие в атомах и молекулах, он назвал молекулярными. Ориентируясь в магнитном поле, эти токи приводят к намагничиванию вещества.

Известно, что атом - сложная система, состоящая из положительно заряженного ядра и электронов, движущихся вокруг него по круговой орбите. Это движение электрона эквивалентно круговому витку с током. Индукция поля, создаваемого контуром с током, пропорциональна величине  $p_m$ , называемой магнитным моментом.

Магнитный момент  $p_m = IS$ ,  
где  $I$  - сила тока;  $S$  - площадь, обтекаемая этим током.

Магнитный момент - вектор, направление которого связано с направлением тока правилом правого винта.

Магнитный момент электрона, обусловленный движением его по орбите, получил название орбитального (рис.1).

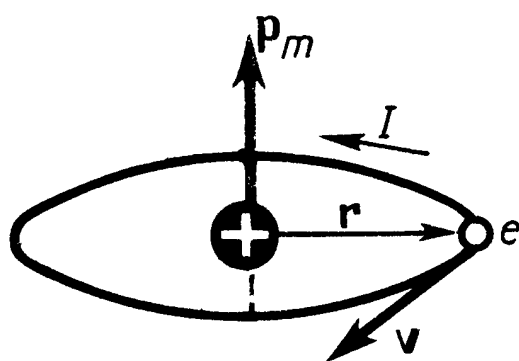


Рис. 1

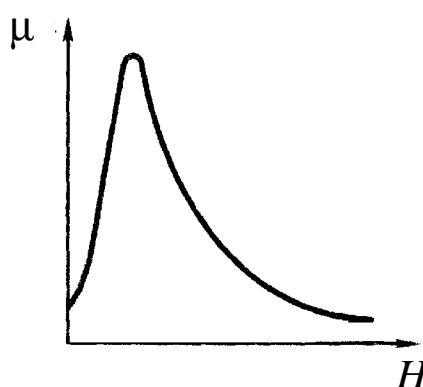


Рис. 2

Кроме того, оказалось, что электрон можно уподобить волчку, вращающемуся вокруг своей оси. Это вращение обуславливает наличие у электрона собственного магнитного момента, называемого спиновым. Обладают магнит-

ным моментом и ядра. Однако магнитный момент ядра по сравнению с магнитным моментом электронов атомов незначителен. Поэтому полный магнитный момент атома складывается из орбитальных и спиновых моментов входящих в его состав электронов.

В намагниченном состоянии магнетик сам создает некоторое добавочное поле  $\vec{B}_{\text{доб}}$ , так что в присутствии его индукция суммарного поля

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_{\text{доб}} \quad (1)$$

Здесь  $\vec{B}_0$  - индукция внешнего магнитного поля, в которое помещен магнетик.

Степень намагничивания магнетика характеризуют величиной, называемой вектором намагничивания или просто намагничением. Намагничение  $\vec{J}$  численно равно суммарному магнитному моменту атомов (молекул), содержащихся в единице объема магнетика:

$$\vec{J} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{p}_{m,i}}{\Delta V},$$

где  $\sum_{i=1}^n \vec{p}_{m,i}$  - суммарный магнитный момент атомов магнетика, содержащихся в объеме  $\Delta V$ .

Кроме вектора магнитной индукции, для характеристики поля вводится вектор напряженности  $\vec{H}$  магнитного поля. Для вакуума  $\vec{B}_0$  и  $\vec{H}$  связаны между собой соотношением

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}, \quad (2)$$

где  $\mu_0$  - магнитная постоянная, равная  $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ . Намагничение магнетика зависит от напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ :

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

Коэффициент пропорциональности  $\chi$  (хи) называется магнитной восприимчивостью.

Напряженность  $\vec{H}$  поля в магнетике в общем случае не равна напряженности внешнего поля, в которое помещен магнетик. Лишь в случае, когда магнетик заполняет все пространство, где имеется поле, или магнетик имеет такую форму, что линии намагничивающего поля не пересекают поверхности магнетика, напряженность магнитного поля в магнетике равна напряженности внешнего магнитного поля.

Индукция поля, вызванного намагничиванием магнетика, пропорциональна вектору намагничивания:

$$\vec{B}_{\text{доб}} = \mu_0 \vec{J}.$$

Подставляя это выражение в (1), имеем

$$\vec{B} = B_0 + \mu_0 \vec{J}. \quad (4)$$

Учитывая соотношения (2) и (3), можно записать:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \chi \vec{J} = \vec{B}_0 + \chi \vec{B}_0 = (1 + \chi) \vec{B}_0.$$

Последнее выражение запишем в виде  $\vec{B} = \mu \vec{B}_0$ , где  $\mu = 1 + \chi$  - магнитная проницаемость магнетика.

Таким образом,  $\mu$  показывает, во сколько раз изменяется индукция магнитного поля в магнетике по сравнению с индукцией магнитного поля в вакууме.

В зависимости от величины магнитной проницаемости все вещества разделяются на три группы: диа-, пара- и ферромагнетики.

К диамагнетикам относятся вещества, для которых  $\mu$  незначительно меньше единицы, так что в диамагнетике индукция суммарного поля меньше индукции внешнего магнитного поля. Следовательно, индукция добавочного поля в диамагнетике направлена противоположно внешнему полю, в котором он находится.

Намагничивание диамагнетика в направлении, противоположном внешнему магнитному полю, объясняется отсутствием у его атомов магнитных моментов благодаря тому, что орбитальные, спиновые и ядерные магнитные моменты взаимно скомпенсированы. Во внешнем магнитном поле электроны атома приобретают движение, дополнительно к орбитальному, вокруг направления внешнего магнитного поля. Эквивалентный дополнительному движению электрона круговой ток создает наведенный магнитный момент. Так как этот ток наведен внешним полем, то согласно правилу Ленца его собственное магнитное поле (магнитный момент) направлено противоположно внешнему полю.

Для парамагнетиков  $\mu = \frac{B}{B_0}$  - незначительно больше единицы. Индукция

суммарного поля  $\vec{B}$  в парамагнетике больше индукции внешнего магнитного поля  $\vec{B}_0$ . Следовательно, добавочная индукция, вызванная намагничиванием парамагнетика, направлена в сторону внешнего магнитного поля.

У парамагнетика суммарный магнитный момент атома отличен от нуля. Поэтому атомы парамагнетика уже в отсутствие магнитного поля являются своеобразными элементарными магнетиками. Так как ориентированы эти магнетики хаотично, то в целом парамагнетик не обнаруживает магнитных свойств. Внешнее магнитное поле стремится ориентировать магнитные моменты атомов вдоль вектора магнитной индукции, тепловое движение мешает этой ориентации. В результате установится динамическое равновесие, при котором в парамагнетике окажется больше атомарных магнетиков, направленных по полю, чем против поля. Кроме ориентации магнитных моментов внешнее поле вызывает у атомов парамагнетика, как и у атомов диамагнетика, появление индуцированного магнитного момента, на-

правленного против внешнего поля. Однако диамагнитный эффект перекрывается более сильным эффектом ориентации магнитных моментов по направлению внешнего магнитного поля.

Для ферромагнетиков значение  $m$  много больше единицы и достигает нескольких тысяч. Кроме того, в отличие от диамагнетиков, для которых  $\mu$  постоянно, магнитная проницаемость ферромагнетиков является функцией напряженности магнитного поля (рис.2). К ферромагнетикам относится железо, никель, кобальт, гадолиний, их соединения и сплавы, а также сплавы марганца и хрома.

Детальное изучение свойств ферромагнетиков показало, что в последних имеются отдельные макроскопические области (домены) размером  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  см, в пределах которых магнитные моменты всех атомов ориентированы строго одинаково. Внутри каждого из доменов ферромагнетик намагничен до насыщения. Для различных доменов направление магнитных моментов разное, вследствие чего суммарный момент в отсутствие внешнего поля равен нулю.

Ответственными за магнитные свойства ферромагнетиков являются спинные магнитные моменты электронов. При определенных условиях в кристаллах могут возникать силы, выстраивающие собственные магнитные моменты электронов параллельно друг другу, и в них возникают домены.

При внесении ферромагнетика в магнитное поле происходит ориентация магнитных моментов не отдельных атомов и молекул, как в парамагнетике, а целых доменов, поэтому уже в небольших полях намагничение достигает больших значений (рис.3).

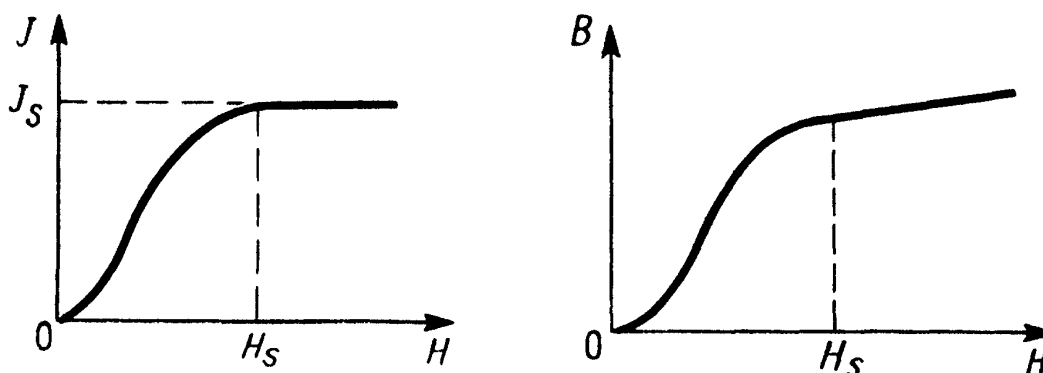


Рис. 3

При достаточно большой напряженности поля все домены ориентируются по полю и вектор намагничения, достигает насыщения.

Особенности магнитных свойств ферромагнетиков экспериментально были установлены русским ученым А.Г. Столетовым в 1872 г.

На рис.3 показана зависимость  $\vec{B}$  от  $\vec{H}$  для предварительно размагниченного ферромагнитного образца. Согласно (2) и (4),  $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J})$ . Так как  $\vec{J}$  резко растет с увеличением  $\vec{H}$ , индукция  $\vec{B}$  также быстро увеличивается.

По достижении напряженности магнитного поля, соответствующей точке А, намагничивание достигает насыщения, и магнитная индукция начнет незначительно изменяться с изменением  $\vec{H}$ .

Кривая  $OA$  называется основной кривой намагничивания. Если, начиная с точки А, уменьшать напряженность намагничивающего поля  $\vec{H}$ , то начнет уменьшаться и индукция  $\vec{B}$ , но не по кривой  $OA$ , а по кривой  $AB_{ост}$  (рис.4). Происходит отставание (запаздывание) изменения индукции магнитного поля в ферромагнетике от изменений напряженности намагничивающего поля. Это явление называется гистерезисом.

Вследствие гистерезиса ферромагнетик не размагничивается полностью

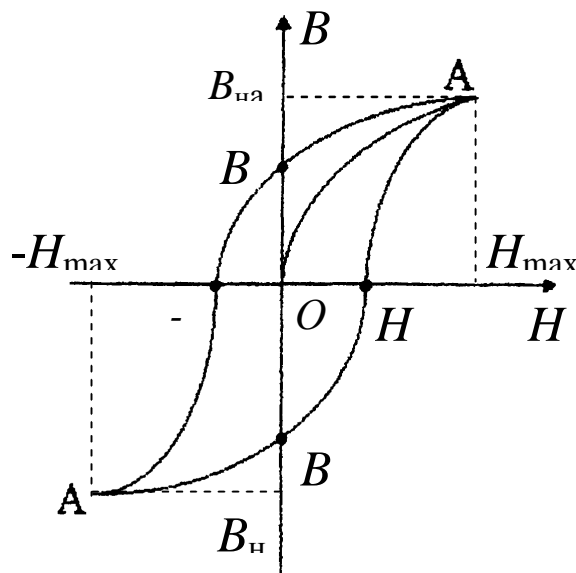


Рис. 4

при уменьшении  $\vec{H}$  до нуля. Величина индукции  $\vec{B}_{ост}$ , соответствующая  $\vec{H} = 0$ , называется остаточной индукцией. Полное размагничивание ферромагнетика наступит, если изменить направление напряженности магнитного поля и увеличить ее от нуля до значения  $\vec{H} = -\vec{H}_к$ .

Значение напряженности  $\vec{H}_к$ , необходимой для снятия остаточной индукции, называется задерживающей или коэрцитивной силой.

Дальнейшее увеличение  $\vec{H}$  в обратном направлении вызовет индукцию обратного направления и при  $\vec{H} = -\vec{H}_{макс}$  индукция в ферромагнетике достигнет насыщения ( $\vec{B} = -\vec{B}_{нас}$ ). Уменьшение напряженности магнитного поля, начиная с точки  $A^1$  от  $\vec{H} = -\vec{H}_{макс}$  до  $\vec{B}_{ост}$   $\vec{H} = 0$  вызовет уменьшение индукции от  $\vec{B} = -\vec{B}_{макс}$  до  $\vec{B} = -\vec{B}_{ост}$ . Точка  $\vec{B}_{ост}$  характеризует отрицательную остаточную

индукцию. Чтобы вновь размагнитить ферромагнетик, необходимо изменить направление намагничивающего поля и увеличить его от  $\vec{H} = 0$  до  $\vec{H} = \vec{H}_k$ . При дальнейшем увеличении  $\vec{H}$  кривая изменения индукции пойдет от точки  $\vec{H}_k$  вверх до точки А. Этот круговой процесс называется гистерезисным циклом, а замкнутая кривая, изображающего его - петлей гистерезиса.

Если напряженность поля не доводить до  $H_{\text{макс}}$  (насыщение образца не будет), а затем уменьшать  $\vec{H}$ , то, действуя по способу, описанному выше, можно получить семейство петель гистерезиса. Верхняя точка каждой из петель гистерезиса находится на основной кривой намагничивания.

В настоящей работе изучаются с помощью осциллографа гистерезисные петли образцов, изготовленных из различных материалов.

Ферромагнитный образец в виде тора имеет две обмотки: первичную и вторичную. Первичная с числом витков  $N_1$  питается переменным током от лат-

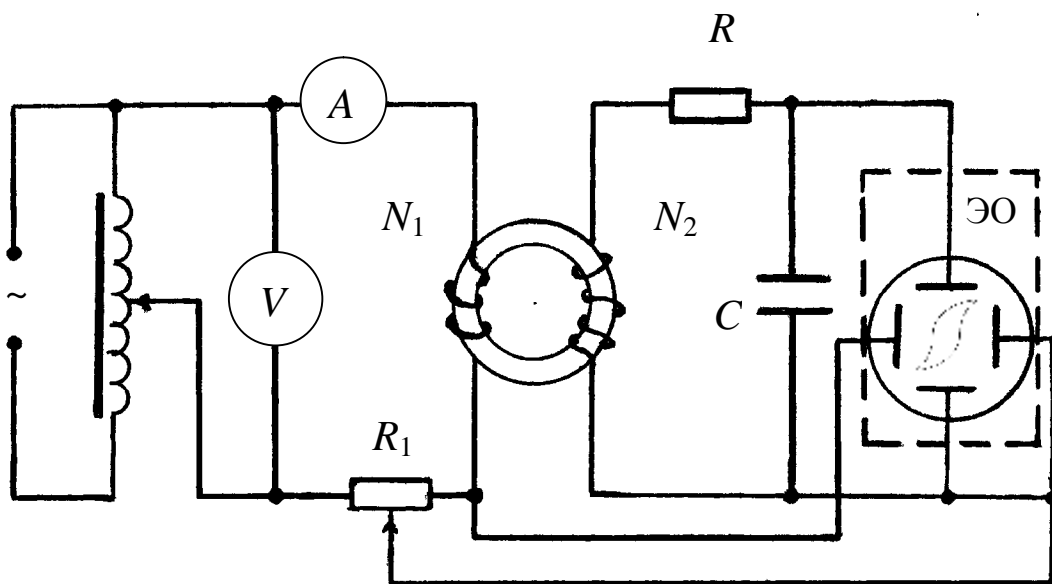


Рис. 5

ра через сопротивление  $R_1$  (рис.5).

Напряженность магнитного поля, создаваемая током, текущим по первичной обмотке,

$$H = \frac{N_1}{l} I_1, \quad (5)$$

где  $l$  - средняя длина тороида,  $I_1$  - сила тока в обмотке.

Напряженность поля в образце будет равна напряженности поля, создаваемого намагничивающей обмоткой, поскольку магнитное поле тороида одно-

родно и силовые линии магнитного поля не пересекают поверхность тороидального образца.

Падение напряжения  $U_{R1}$  на сопротивлении  $R_1$

$$U_{R1} = I_1 R_1 \quad (6)$$

Подставляя значение  $I_1$  из (5) в (6), получим

$$U_{R1} = \frac{l R_1}{N_1} H$$

или  $U_{R1} \sim H$ .

Напряжение  $U_{R1}$  пропорционально напряженности магнитного поля, в котором находится ферромагнитный образец. Если подать это напряжение на горизонтально отклоняющую систему осциллографа, то отклонение луча на экране осциллографа будет пропорционально напряженности магнитного поля.

Во вторичной обмотке с числом витков  $N_2$  возникает э.д.с. индукции

$$E = -N_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

где  $\Phi$  магнитный поток через сечение  $S$  сердечника.

Так как магнитный поток

$$\Phi = B S,$$

где  $B$  - индукция магнитного поля в сердечнике, то

$$E = -N_2 \frac{d(BS)}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt}. \quad (7)$$

Для вторичной цепи по закону Ома можно записать

$$E = U_c + I_2 R.$$

Емкость  $C$  и сопротивление  $R$  подобраны так, что емкостное сопротивление конденсатора много меньше сопротивления  $R$ .

Поэтому напряжением на конденсаторе можно пренебречь по сравнению с напряжением  $I_2 R$  и записать

$$I_2 = \frac{E}{R}$$

или с учетом (7)

$$I_2 = -\frac{N_2 S}{R} \frac{dB}{dt}. \quad (8)$$

$$\text{Напряжение на конденсаторе } U_c = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I_2 dt,$$

где  $q = \int I_2 dt$  - заряд на обкладках конденсатора.

Подставляя в это выражение значение силы тока из (8), имеем

$$U_c = -\frac{1}{C} \int \frac{N_2 S}{R} \frac{dB}{dt} dt = -\frac{N_2 S}{RC} B$$

или

$$U_c \propto B.$$



Напряжение на конденсаторе  $U_C$  пропорционально индукции магнитного поля в ферромагнетике. Оно подается на вертикально отклоняющую систему осциллографа и вызывает отклонение луча по оси ординат, пропорциональное  $B$ .

Переменный ток, протекающий в первичной обмотке, вызывает периодическое изменение как  $U_{RI} \sim H$ , так и  $U_C \sim B$ , и на экране осциллографа получается петля гистерезиса.

За один период синусоидального изменения тока след электронного луча на экране опишет полную петлю гистерезиса, а за каждый последующий период повторит. Поэтому на экране будет видна неподвижная петля гистерезиса.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Подготовить осциллограф к работе, для этого:
  - 1.1. Ручки «Ось X», «Ось Y» и «Фокус» установить в среднее положение. Ручку «Яркость» - в крайнее правое положение.
  - 1.2. Включить канал «X» осциллографа, для этого на боковой панели с правой стороны переключатель «Развертка» поставить в нижнее положение.
  - 1.3. Установить ручку  $V/\text{дел.}$  в положение 0.1В.
  - 1.4. Подключить осциллограф к сети переменного тока, с помощью сетевого шнура и тумблером «Питание» включить осциллограф.
  - 1.5. После прогрева осциллографа (в течение 5 минут) отрегулировать яркость светящейся точки на экране.
  - 1.6. С помощью ручек «Ось X» и «Ось Y» вывести точку в центр экрана и ручкой «Фокус» добиться четкого ее изображения.
2. Подготовить лабораторный стенд к работе, для этого:
  - 2.1. Установить регулятор напряжения 220В, находящийся в правом нижнем углу лицевой панели стенда в крайнее левое положение.
3. Собрать схему 1. Для этого:
  - 3.1. Переключатель SA1 на передней панели стенда установить в положение 1 (верхнее положение).
  - 3.2. Проводами соединить электронный осциллограф с лабораторным стендом следующим образом: канал Y осциллографа подключить к клеммам стенда «Y TV I», канал X осциллографа - к зажимам «X TV 1».
  - 3.3. Включить лабораторный стенд в сеть переменного тока 220В с помощью сетевого шнура
  - 3.4. Регулятор напряжения 220В, находящийся в правом нижнем углу лабораторного стенда, установить в крайнее правое положение.
  - 3.5. Ручкой  $RI$ , добиться оптимального изображения петли гистерезиса на экране осциллографа
  - 3.6. Поворачивая влево регулятор напряжения 220В (уменьшая напряжение  $U_{RI}$ ), уменьшая амплитуду колебаний  $B$ , получить на экране последователь-



но ряд различных по своей площади петель гистерезиса. Снять для каждой из них координаты вершин  $n_x$  и  $n_y$ .

4. Построить по полученным данным кривую зависимости  $B = f(H)$
5. Оставив ручки осциллографа в первоначальном положении, проделать аналогичные измерения для образца №2. Для этого:
  - 5.1. Регулятор напряжения 220В установить в крайнее левое положение.
  - 5.2. Переключатель  $SA1$ , находящийся на передней панели лабораторного стенда установить в положение 2 (нижнее положение).
  - 5.3. Аналогично пункту 3,2 подключить осциллограф к клеммам  $TV2$ ,
  - 5.4. Повторить пункт 3.4.
  - 5.5. Ручкой « $R1$ » добиться оптимального изображения петли гистерезиса на экране осциллографа.
  - 5.6. Повторить пункт 3.6. для схемы  $TV2$ .
  - 5.7. Повторить пункт 4 для схемы  $TV2$ .
6. Пользуясь полученными рисунками, сравнить коэрцитивную силу и остаточную индукцию образцов, вычислив отношение

$$\frac{H_{1k}}{H_{2k}}; \frac{B_{1ост}}{B_{2ост}}$$

### Контрольные вопросы

1. Что называется магнитным моментом?
2. Объясните, как происходит намагничивание вещества, помещенного в магнитное поле.
3. По какому признаку вещества делятся на диа- и парамагнетики?
4. Каковы основные свойства ферромагнетиков и чем они объясняются?
5. Какое явление называется гистерезисом?
6. Нарисуйте петлю гистерезиса и покажите на рисунке коэрцитивную силу и остаточную индукцию.

## ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Цель работы:** исследовать анизотропию диэлектрической проницаемости тканей, искусственных кож.

**Приборы и принадлежности:** измеритель емкости, накладной измерительный конденсатор (НИК), образцы материала.

**Теоретическое обоснование.** Большинство материалов текстильной и легкой промышленности относятся к анизотропным средам и обладают ортогональной анизотропией. В этих средах всегда может быть выбрана такая ортогональная система координат, в которой диэлектрические характеристики (диэлектрическая проницаемость, проводимость) будут выражаться тензором диагонального вида. Примерами таких сред являются различные волокнистые и слоистые структуры, ткани, искусственные пленки, покрытия, стеклопластики, бумага, шпон. В случае совпадения осей координат  $X, Y, Z$  с осями анизотропии диэлектрическая проницаемость среды выражается тензором

$$\epsilon_{ij} = \begin{vmatrix} \epsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zz} \end{vmatrix} \quad (1)$$

Константы тензора диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}$  являются характеристиками материала и несут сведения о его составе, структуре, влажности, т.е. входят в комплекс исходной информации для диагностики качества композиционных материалов, прогнозирования их деформационных и прочностных свойств в каждом из выбранных направлений.

Значения констант  $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{zz}$  могут быть определены экспериментально. Для этого из материала вырезается образец таким образом, чтобы его грани совпадали с осями анизотропии рис.1.

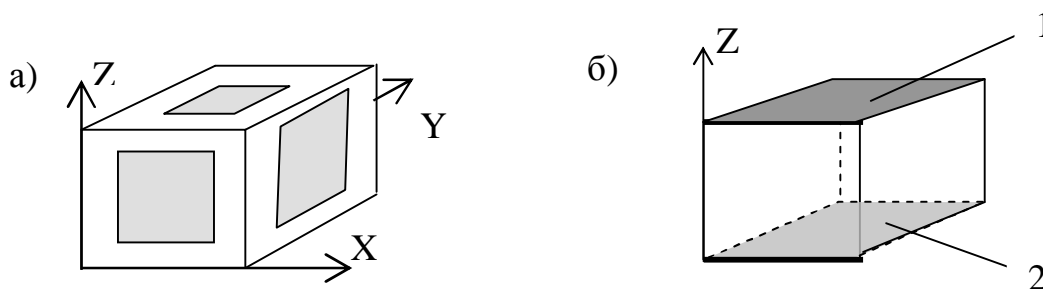


Рис.1 а) схема расположения образца при определении составляющих тензора диэлектрической проницаемости; б) расположение электродов плоского конденсатора при измерении константы тензора диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{zz}$ ; 1, 2 – пластины плоского конденсатора (электроды).

В этом случае линии напряженности поля плоского конденсатора идут вдоль оси ОУ и его емкость определяется значением константы  $e_{zz}$  :

$$C_1 = e_{zz} \cdot e_o \cdot \frac{S}{d}, \quad (2)$$

где  $e_o$  – электрическая постоянная;  $S$  – площадь пластин плоского конденсатора;  $d$  – толщина контролируемого образца.

В лабораторных условиях, когда влажность воздуха невелика и находится в норме, его диэлектрическая проницаемость может быть принята за единицу и выражение (2) для емкости плоского конденсатора в воздухе принимает вид

$$C_2 = e_o \cdot \frac{S}{d}. \quad (3)$$

Таким образом, отношение емкостей плоского конденсатора, заполненного и незаполненного контролируемым материалом, даст значение константы тензора диэлектрической проницаемости для данного структурного направления:

$$e_{zz} = \frac{C_1}{C_2}. \quad (4)$$

Данная методика позволяет определять константы тензора диэлектрической проницаемости лишь для объемных тел, когда можно вырезать образец в любых направлениях, и не применима для линейно-протяженных плоских образцов.

У линейно протяженных полотнообразных материалов нет доступа к двум ортогональным поверхностям, и это затрудняет определение констант диэлектрической проницаемости в плоскости ХОУ.

Для неразрушающего контроля диэлектрических свойств анизотропных

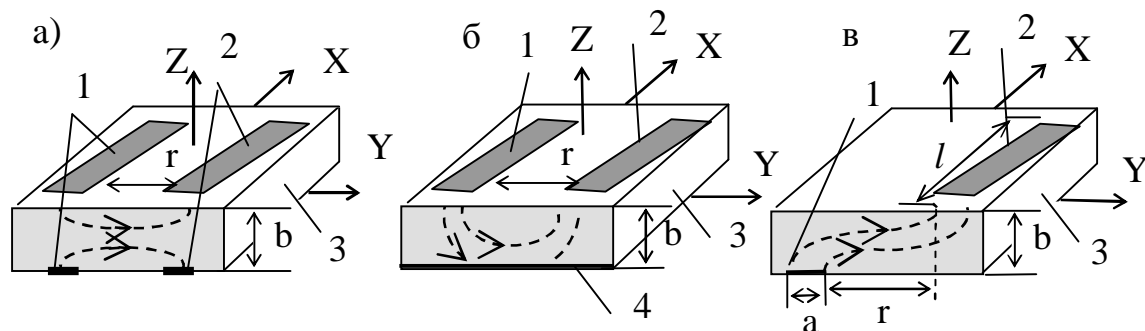


Рис.1. Секции ленточных электродов, заполненных контролируемым материалом.

а) схема ленточных зеркально-ссимметричных электродов;

б) схема ленточных электродов экранированных экраном;

в) схема ленточных электродов, проходного типа.

1 и 2 – потенциальные электроды; 3 – контролируемый материал; 4 – заземленный экран.

плоских полимерных материалов в этом случае используют ленточные измерительные конденсаторы накладного типа (НИК). Секции многосекционных систем чередующихся электродов изображены на (рис.1).

Данные системы электродов создают плоскопараллельные поля в плоскости XOY контролируемого материала и позволяют исследовать анизотропию диэлектрических свойств за счет поворота электродов относительно оси OZ.

В случае, когда линии напряженности электрического поля составляют угол  $\alpha$  с осями анизотропии контролируемого материала, рабочая емкость конденсатора, изображенного на рис.1а, имеет вид

$$C_a = \frac{e_0 \sqrt{e_x e_y} \cdot pl \sqrt{\frac{e_z}{e_x} \cos^2 a + \frac{e_z}{e_y} \sin^2 a}}{\ln 4 + \frac{pr_s}{b} \frac{e_z}{\sqrt{e_x e_y}} \sqrt{\frac{\frac{e_z}{e_x} \sin^2 a + \frac{e_z}{e_y} \cos^2 a}{\left(\frac{e_z}{e_x} - \frac{e_z}{e_y}\right)^2 \sin^2 a \cos^2 a + \frac{e_z^2}{e_x e_y}}}}; \quad (5)$$

Отношение рабочей емкости  $C_a$ , заполненного НИК, к рабочей емкости  $C_p$ , не заполненного НИК, равно значению константы тензора диэлектрической проницаемости для данного структурного направления. Для снятия диаграммы анизотропии необходимо просканировать область контроля простым

поворотом НИК относительно вертикальной оси Z. Функция зависимости отношения рабочих емкостей имеет вид

$$\frac{C_a}{C_p} = \frac{\left( \ln 4 + \frac{pr_s}{b} \right) \sqrt{e_x e_y} \sqrt{\frac{e_z}{e_x} \cos^2 a + \frac{e_z}{e_y} \sin^2 a}}{\ln 4 + \frac{pr_s}{b} \frac{e_z}{\sqrt{e_x e_y}} \sqrt{\frac{\frac{e_z}{e_x} \sin^2 a + \frac{e_z}{e_y} \cos^2 a}{\left( \frac{e_z}{e_x} - \frac{e_z}{e_y} \right)^2 \sin^2 a \cos^2 a + \frac{e_z^2}{e_x e_y}}}} \approx e_y \cdot \cos^2 a + e_x \cdot \sin^2 a \quad (6)$$

Выражение (6) описывает диаграмму анизотропии диэлектрической проницаемости в плоскости линейно протяжённого материала. За направление  $0^0$  принято направление основы материала, когда линии напряжённости электрического поля идут вдоль оси Y.

На рис.2 показаны теоретические и экспериментальные диаграммы анизотропии диэлектрической проницаемости для материалов барекс и винилискожа. Из диаграммы анизотропии видно, что материал винилискожа обладает ярко выраженной анизотропией диэлектрической проницаемости. Значение константы диэлектрической проницаемости вдоль оси OY  $e_y = 10,42$ , а вдоль оси OX  $e_x = 8,71$ . Для материала барекс анизотропия диэлектрических свойств выражена слабо. Значения констант  $e_y$  и  $e_x$  практически равны:  $e_y = 5,10$ ,  $e_x = 4,91$

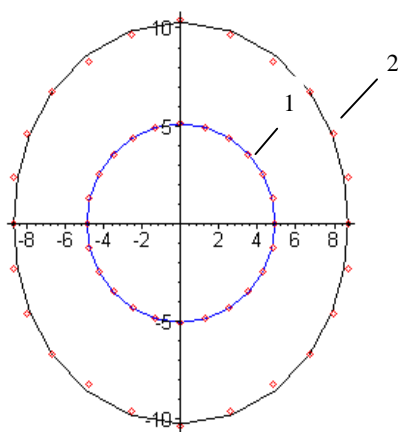


Рис. 2 Теоретические и экспериментальные диаграммы анизотропии диэлектрической проницаемости для материалов 1– барекс;

2 – винилискожа.

– теоретические значения, вычисленные по (6); экспериментальные значения.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Укажите на контролируемом образце направления диаграммы анизотропии. За направление  $0^\circ$  примите направление основы материала. Диаграмму постройте с промежутком в  $15^\circ$

2. Поместите контролируемый образец между электродами конденсатора таким образом, чтобы линии напряженности электрического поля составляли угол  $\alpha = 0^\circ$  с осями анизотропии контролируемого материала.

3. Проведите измерение емкости  $C_0$  для данного направления.

4. Приподняв электрод с помощью тубуса, сориентируйте образец таким образом, чтобы линии напряженности электрического поля составляли угол  $\alpha = 15^\circ$  с осями анизотропии контролируемого материала.

5. Проведите измерение емкости  $C_{15}$  для данного направления.

6. Проведите аналогичные измерения вплоть до угла в  $90^\circ$ , занося их в таблицу.

7. Убрав материал, верните электроды конденсатора на прежнее положение для того, чтобы провести измерение пустого конденсатора  $C$ .

8. После измерения  $C$  опустите электроды с помощью тубуса друг на друга и проведите измерения паразитной емкости  $C_n$ . Эта емкость обусловлена емкостью подложек конденсатора, соединительных проводов.

9. Для нахождения рабочих емкостей конденсатора в каждом случае необходимо вычесть паразитную емкость. Например, если для угла  $\alpha = 0^\circ$  значение измеренной емкости  $C_0 = 2,0$  пФ, а значение паразитной емкости  $C_n = 0,4$  пФ, то значение рабочей емкости  $C_{ap} = 2,0 - 0,4 = 1,6$  пФ. Значения найденных рабочих емкостей занесите в таблицу 1.

10. Вычислите рабочую емкость пустого конденсатора как  $C_l = C - C_n$

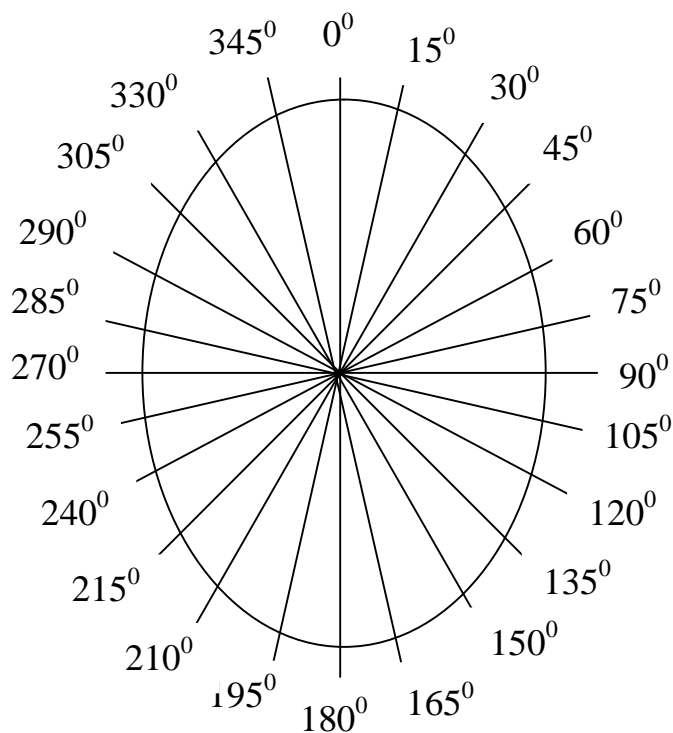
11. Проведите вычисление константы тензора диэлектрической проницаемости для данного структурного направления как  $e_a = \frac{C_{ap}}{C_l}$

Таблица 1

Экспериментальные данные

$\alpha$ , (град)	0	15	30	45	60	75	90
$C_a$ , (пФ)							
$C_a - C_n$ , (пФ)							
$e_a$							

12. Постройте диаграмму анизотропии диэлектрической проницаемости. Для этого отложите в каждом выбранном направлении отрезок, длина которого численно равна константе тензора диэлектрической проницаемости для данного структурного направления.



13. Проведите анализ диаграммы анизотропии диэлектрической проницаемости данного материала.

### ИЗУЧЕНИЕ ИНДУКЦИИ И ВЗАИМНОЙ ИНДУКЦИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

**Цель работы:** изучение явления взаимной индукции в электрической цепи.

**Приборы и принадлежности:** генератор низкочастотный, осциллограф, две катушки индуктивности  $L_1$ ,  $L_2$ , два вольтметра  $V$  и  $V_1$ .

**Теоретическое обоснование.** Реальные электрические цепи обладают сопротивлением  $R$ , емкостью  $C$  и индуктивностью  $L$ . Эти элементы вызывают переходные процессы при коммутации токов (при включении и выключении). Так наличие емкости приводит к тому, что напряжение в цепи не может изменяться скачком. Индуктивность приводит к невозможности скачкообразного изменения тока. Наличие в цепи  $R$ ,  $L$  и  $C$  элементов приводит в процессе переключений к затухающим колебаниям тока и напряжения.

#### Индуктивность и самоиндукция в электрической цепи

Ток в электрической цепи создает в пространстве магнитное поле, индукция которого  $\vec{B}$  зависит от геометрических факторов, магнитных свойств среды и пропорциональна току  $I$ . Следовательно, поток  $\Phi$  вектора  $\vec{B}$  через площадь, ограниченную токопроводящим контуром цепи, следует определить как

$$\Phi = B_n dS, \quad (1)$$

где  $B_n$  – проекция вектора  $\vec{B}$  на нормаль  $n$  к поверхности  $dS$ ,  $dS$  – площадь, ограниченная токопроводящим контуром цепи. Этот поток пропорционален току:

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

где  $L$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрии контура и магнитной проницаемости среды  $\mu$ .

Коэффициент  $L$  называют индуктивностью контура.

Малой индуктивностью обладают цепи, в которых участки с токами, текущими в противоположных направлениях, максимально сближены. Большой индуктивностью обладают катушки, имеющие много витков провода, намотанных на сердечник из ферромагнитного материала. Если длина катушки значительно больше ее диаметра, а витки плотно уложены друг к другу, то такую катушку называют *соленоидом*. Если катушка содержит  $N$  витков, то пренебрегая искажениями магнитного поля на концах катушки, для полного магнитного потока  $\Psi$  можно записать

$$\Psi = N\Phi, \quad (3)$$



где  $N$  — число витков соленоида,  $\Phi$  — магнитный поток через один виток. Величину  $\Psi$  называют потокоцеплением.

Индуктивность соленоида вычисляют по формуле

$$L = \mu \mu_0 \frac{N^2 S}{l}, \quad (4)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $\mu$  — магнитная проницаемость среды;  $S$  — площадь витка катушки;  $l$  — длина соленоида.

Если контур соленоида не деформируется и магнитная проницаемость среды не изменяется, то  $L = \text{const}$ , тогда э. д. с. самоиндукции

$$E_L = -L \frac{di}{dt}. \quad (5)$$

Из формулы следует, что индуктивность численно равна э.д.с. самоиндукции, возникающей в проводнике при изменении в нем тока на 1 А за 1 с (т. е. 1 Гн = 1 В с/А).

Э. д. с. самоиндукции зависит от значения  $L$  и пропорциональна скорости изменения силы тока. Знак минус в формуле обусловлен правилом Ленца. Это правило согласуется с физическим принципом Ле-Шателье и указывает на то, что индукционный ток, возникающий при прохождении тока в цепи, имеет такое направление, при котором он препятствует изменению основного тока в цепи. (*Ле-Шателье сформулировал общий физический принцип: воздействие на систему стимулирует в данной системе процессы, препятствующие этому воздействию*).

Действительно, если ток со временем возрастает, то  $\frac{di}{dt} > 0$  и  $E_L < 0$ , т. е.

ток самоиндукции направлен навстречу току, обусловленному внешним источником, и тормозит его возрастание. При убывании основного тока  $\frac{di}{dt} < 0$  и

$E_L > 0$ , т. е. индукционный ток имеет такое же направление, как и ток в контуре, и замедляет его убывание. Следовательно, контур, обладающий индуктивностью, имеет своеобразную электрическую инертность, проявляющуюся в том, что любое изменение тока в контуре тормозится, и тем больше, чем больше его индуктивность.

В электрических цепях постоянного тока э.д.с. самоиндукции наблюдают при замыкании и размыкании цепи. Токи, обусловленные самоиндукцией, называют *экстратоками*. После установления тока

$$\frac{di}{dt} = 0, \text{ и поэтому } E_L = 0.$$

### Взаимная индуктивность

Пусть контуры 1 и 2 (Рис. 1) расположены достаточно близко друг к другу. Между контурами существует магнитная связь, наличие которой проявляется в

том, что при всяком изменении тока в одном из контуров в другом контуре изменяется пронизывающий его магнитный поток и возникает э.д.с индукции. Это явление называют *взаимной индукцией*. Рассмотрим явление взаимной индукции более подробно.

Если в контуре 1 (Рис. 1) течет ток силой  $i_1$ , то магнитный поток, создаваемый этим током, пронизывает контур 2 (магнитное поле, создающее этот поток, изображено на рисунке 1 сплошными линиями).

$$\Phi = M_{21}I_1, \quad (6)$$

где  $M_{12}$  — коэффициент пропорциональности, учитывающий геометрию формы и положение контуров в пространстве. При изменении тока  $i_1$ , вследствие изменения магнитного потока  $\Phi_{21}$ , в контуре 2 индуцируется э.д.с.  $E_{i2}$

$$E_{i2} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -M_{21} \frac{di_1}{dt}, \quad (7)$$

где  $M_{21} = \text{const.}$

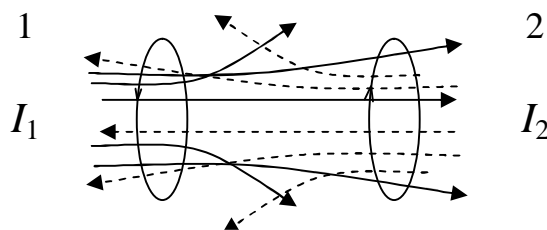


Рис. 1

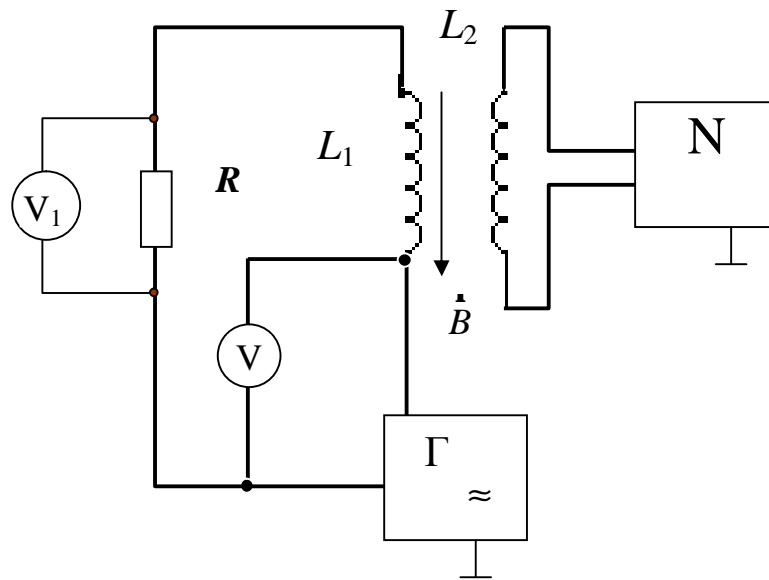
Аналогично, при протекании в контуре 2 тока  $I_2$  магнитный поток  $\Phi_{12}$  (его поле изображено на рисунке 1 пунктиром) пронизывает первый контур  $\Phi = M_{21}I_1$ .

При изменении тока  $I_2$  в контуре индуцируется э.д.с.  $E_{i1}$ , равная скорости изменения магнитного потока  $\Phi_{12}$ , созданного током во втором контуре и пронизывающего первый.

$$E_{i1} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -M_{12} \frac{di_2}{dt} \quad (8)$$

Контур 1 и 2 называют связанными. Возникновение э.д.с. в одном из контуров при изменении тока в другом называют взаимной индукцией. Коэффициенты пропорциональности  $M_{21}$  и  $M_{12}$  называют взаимной индуктивностью. Установлено, что  $M_{21} = M_{12}$  (в отсутствие ферромагнетиков).

Взаимная индуктивность зависит от геометрической формы, размеров, взаимного расположения контуров и от магнитных свойств среды, окружающей контуры. Взаимная индуктивность измеряется в тех же единицах, что и индуктивность - Генри (Гн). Из формулы (7) следует, что взаимная индуктивность двух контуров численно равна э.д.с. индукции, возникающей в одном из этих



**Рис.2**

контуров, когда сила тока в другом контуре изменяется на единицу за единицу времени.

## ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

**Упражнение 1** Исследование зависимости э.д.с. индукции (взаимоиндукции) от частоты (скорости) изменения магнитного поля.

1. Собираем схему, приведенную на рис 2. В нее входят следующие приборы: генератор низкочастотный –  $\Gamma$ , осциллограф –  $N$ , две катушки индуктивностью  $L_1$  (неподвижная) и  $L_2$  (подвижная), вольтметры  $V$  и  $V_1$ , резистор  $R$ .
2. Подаем с генератора синусоидальный сигнал с частотой  $f=200$  Гц и напряжением  $U_{эфф} = \text{---} B$  (значение задает преподаватель). Катушки  $L_1$  и  $L_2$  ориентируем так, чтобы оси катушек были параллельны.
3. Значение э.д.с. взаимоиנדукции ( $e_{02}$ ) измеряем по электронному осциллографу.
4. Падение напряжения  $U_{эфф}$  на резисторе  $R$  измеряем по вольтметру  $V_1$

$$U_{01} = U_{эфф} \sqrt{2}.$$

5. Сила тока в цепи

$$I_{01} = \frac{U_{01}}{R_1}.$$

6. Определяем коэффициент взаимоиנדукции

$$M_{21} = \frac{e_{02}}{2\pi f I_{01}}.$$

7. Тогда потокосцепление

$$\Psi = M_{21} I_{01} = \frac{e_{02}}{2\pi f}.$$

8. Строим график зависимости э.д.с. взаимоиנדукции от частоты.

9. Изменяя частоту от 200 Гц до 2000 Гц с шагом  $\Delta f = 100$  Гц, выполняя вычисления (п.4.–п.7), полученные результаты сводим в таблицу 1.

Таблица 1

№ п/п	$f$ , Гц	$U_{01}$ , В	$I_{01}$ А	$\epsilon_{02}$ , В	$\psi$ , Вб	$M_{21}$ , Гн,	Прим.

**Упражнение 2.** Исследование зависимости ЭДС взаимной индукции от ориентации контура в магнитном поле.

1. Собираем схему, приведенную на рис 2. В нее входят следующие приборы: генератор низкочастотный - Г, осциллограф – Н, две катушки индуктивностью  $L_1$  (неподвижная) и  $L_2$  (подвижная), вольтметры  $V$  и  $V_1$ , резистор  $R$ .
2. Подаем с генератора синусоидальный сигнал с частотой  $f=2000$  Гц и напряжением  $U_{\text{эфф}}$  В (значение задает преподаватель). Катушки  $L_1$  и  $L_2$  ориентируем так, чтобы угол между осями был равен нулю.
3. Значение э.д.с. взаимной индукции ( $e_{02}$ ) измеряем по электронному осциллографу.
4. Изменяя угол  $\alpha$  между осями катушек (угол между индукцией магнитного поля  $B_1$  и нормалью к плоскости катушки  $L_2$ ) от 0 до  $180^\circ$  с интервалом  $\Delta\alpha=10^\circ$ , измеряем зависимость значения э.д.с. взаимной индукции ( $e_{02}$ ).
5. Полученные результаты сводим в таблицу 2.

$\alpha$	$0^\circ$	$10^\circ$	$20^\circ$	...	...	$180^\circ$
$e_{02}$						

6. Строим графическую зависимость  $e_{02} = f(\alpha)$ .
7. Сделать выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. В чем сущность явления самоиндукции, взаимной индукции?
2. От чего зависит индуктивность?
3. Записать формулу для определения индуктивности длинного соленоида?
4. Какое сопротивление переменному току оказывает индуктивность цепи?
5. Сформулировать правило Ленца?
6. Сформулируйте принцип Ле-Шателье?
7. Как взаимосвязаны магнитный поток и потокоцепление?
8. Объясните в каких случаях  $M_{21}=M_{12}$ ?
9. Как рассчитать индуктивность соленоида?

## Лабораторная работа Э 18

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ.

**Цель работы:** изучить зависимость сопротивления чистых металлов от температуры. Определить температурный коэффициент сопротивления.

**Приборы и принадлежности:** исследуемый металлический проводник, нагреватель, термометр, прибор для измерения сопротивления - омметр.

**Теоретическое обоснование.** Удельное сопротивление  $\rho$  металлов зависит от природы вещества и температуры  $t$ . Для чистых металлов  $\rho$  практически линейно возрастает с увеличением температуры выше  $0^\circ\text{C}$  в широком интервале температур

$$\begin{aligned}\rho &= \rho_0(1 + \alpha t); \\ R &= R_0(1 + \alpha t),\end{aligned}$$

где-  $\rho_0$  и  $R_0$  - соответственно удельное сопротивление и сопротивление проводника при  $0^\circ\text{C}$ ;  $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления.

Увеличение удельного сопротивления в металлах связано с увеличением интенсивности колебательного движения ионов кристаллической решетки, препятствующих направленному перемещению электронов под действием приложенного внешнего электрического поля.

Проведя два измерения сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  при температурах соответственно  $t_1$  и  $t_2$ , можно определить значение  $\alpha$

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

$$R_2 = R_0(1 + \alpha t_2) \quad (2)$$

Из уравнения (1) и (2) следует:

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1 t_2 - R_2 t_1} \quad (3)$$

### ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТЫ

1. Поместить исследуемый проводник в нагреватель.
2. Подсоединить омметр к исследуемому проводнику. Установить предел измерения сопротивления на омметре 100 Ом.
3. Включить нагреватель.
4. Произвести измерения сопротивления проводника через каждые  $5^\circ\text{C}$  нагрева в интервале изменения температуры  $25-90^\circ\text{C}$ .
5. Выключить нагреватель и повторить опыт при охлаждении проводника.
6. Данные измерений занести в таблицу.
7. Построить графики зависимости  $R=f(t)$  при нагреве проводника и охлаждении.
8. Для температур, ориентировочно указанных в таблице, по формуле (3) определить значения  $\alpha$  и  $\alpha_{\text{ср}}$ .

9. Сравнить полученное значение  $\alpha$  с табличными и определить материал проводника.

Таблица

	$t^{\circ}\text{C}$	25	30	.....	85	90	$\alpha_1$ (40,80°C)	$\alpha_2$ (50,90°C)	$\alpha_3$ (30,80°C)	$\alpha_{\text{ср}}$
нагрев	R									
охла- жде- ние	R									

### Контрольные вопросы

1. Чем объясняется высокая электропроводимость металлов?
2. Почему тепловое движение электронов не обуславливает появление электрического тока?
3. От чего зависит коэффициент электрического сопротивления?
4. Каков физический смысл  $\alpha$ ?
5. Принцип действия каких устройств основан на зависимости электрического сопротивления от температуры?
6. В чем заключается явление сверхпроводимости?
7. Как объяснить возможные несовпадения графиков  $R=f(t)$  при нагреве и охлаждении проводника?
8. Какова размерность  $\alpha$ ?
9. Пояснить ориентировочный выбор интервалов температур для расчета  $\alpha$ .

### Литература

1. Детлаф, А. А. Курс физики / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – Москва : Высш. школа, 1989. – 608 с.
2. Савельев, И. В. Курс общей физики / И. В. Савельев. Т. 2. – Москва : Наука, 1982. – 496 с.
3. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – Москва : Высш. школа, 1990. – 478 с.
4. Урозов, В. И. Практикум по электричеству и магнетизму / В. И. Урозов, М. М. Зубарева, В. С. Стрижнев. – Минск, 1969. – 114 с.
5. Урозов, В. И. Практикум по физике / В. И. Урозов, В. С. Стрижнев. – Минск, 1973. – 382 с.

## Основные физические величины

Таблица I  
Основные физические постоянные

Гравитационная постоянная	$G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Число Авогадро $N_A$	$N_A = 6,02205 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярный объем идеального газа при нормальных условиях	$V_0 = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль}$
Универсальная газовая постоянная $R$	$R = 8,3144 \text{ Дж} / (\text{моль} \cdot \text{К})$
Постоянная Больцмана	$k = 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / \text{К}$
Число Фарадея	$F = 9,6485 \cdot 10^4 \text{ Кл} / \text{моль}$
Постоянная Стефана-Больцмана	$\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$
Постоянная Планка $h$	$h = 6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Заряд электрона $e$	$e = 1,60219 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	$m_e = 9,1095 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = 5,4858 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.}$
Масса покоя протона	$m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,007276 \text{ а.е.м.}$
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1,67495 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,008665 \text{ а.е.м.}$
Скорость света в вакууме	$c = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ м} / \text{с}$

Таблица 2  
Диэлектрическая проницаемость диэлектриков

Воск	7,8	Парафин	2	Эбонит	2,6
Вода	81	Слюда	6	Парафинированная бумага	2
Керосин	2	Стекло	6		
Масло	5	Фарфор	6		

Таблица 3  
Удельное сопротивление проводников при 0° С,  
 $10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$

Алюминий	2,53	Нихром	100
Графит	3,9	Ртуть	94
Железо	8,7	Свинец	22
Медь	1,7	Сталь	10

Таблица 4  
Подвижности ионов в электролитах,  
 $10^{-8} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$

	6,4	$\text{Cl}^-$	6,8
$\text{H}^+$	32,6	$\text{NO}_3^-$	
$\text{K}^+$	6,7	$\text{Ag}^+$	5,6

Таблица 5  
Работа выхода электронов из металла,  
эВ

W	4,5	Ag	4,74
W+Cs	1,6	Li	2,4
W+Th	2,63	Na	2,3
Pt+Cs	1,40	K	2,0
Pt	5,3	Cs	1,9

### Греческий алфавит

Обозначения букв	Название букв	Обозначения букв	Название букв
A, a	альфа	N, n	ню
B, b	бета	X, x	кси
G, g	гамма	O, o	омикрон
D, d	дельта	P, p	пи
E, e	эпсилон	R, r	ро
Z, z	дзета	S, s	сигма
H, h	эта	T, t	тау
Q, q	тэта	U, u	ипсилон
J, j	йота	F, f	фи
K, k	каппа	C, c	хи
L, l	ламбда	Y, y	пси
M, m	ми	W, w	омега



## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа Э - 11	
Определение коэффициента самоиндукции	3
Лабораторная работа Э 12	
Изучение закона Ома для переменного тока	8
Лабораторная работа Э 13	
Изучение однофазного трансформатора	14
Лабораторная работа Э 14	
Определение основных параметров термопары и термокреста	21
Лабораторная работа Э 15	
Изучение явления гистерезиса ферромагнетиков	25
Лабораторная работа Э 16	
Исследование анизотропии диэлектрической проницаемости полимерных материалов	34
Лабораторная работа Э 17	
Изучение индукции и взаимной индукции в электрической цепи	40
Лабораторная работа Э 18	
Определение зависимости сопротивления металлов от температуры	45
Литература	46
Основные физические величины	47
Греческий алфавит	48
Содержание	49