

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

И.Н.Фетисов

# ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

*Методические указания к выполнению лабораторной работы Э -61*

*по курсу общей физики*

Москва 2011

## ВВЕДЕНИЕ

*Электромагнитное поле* – особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между движущимися электрически заряженными частицами. Электромагнитное поле имеет две переменные составляющие – электрическое поле и магнитное поле, взаимно превращающиеся друг в друга. Полное описание электрических и магнитных полей в их взаимосвязи дают уравнения Максвелла [1-3].

Электрическое и магнитное поля существуют отдельно в виде постоянных полей. Источниками стационарного магнитного поля являются намагниченные тела, проводники с током и движущиеся электрически заряженные частицы. Природа этих источников едина - магнитное поле возникает в результате движения заряженных микрочастиц (электронов, протонов, ионов), а также благодаря наличию собственного (т. н. *спинового*) магнитного момента у элементарных частиц.

*Цель работы* - ознакомление с магнитным полем и электромагнитной индукцией; в экспериментальной части – изучение энергии магнитного поля катушки индуктивности калориметрическим методом.

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 1. Силовое действие электромагнитного поля

Основными характеристиками электрического и магнитного полей служат *напряженность* электрического поля  $\mathbf{E}$  и *магнитная индукция*  $\mathbf{B}$ , которые определяются через силы, действующие на точечный положительный электрический заряд  $q$ , находящийся в данной точке поля:

$$\begin{aligned}\vec{F}_э &= q\vec{E}; \\ \vec{F}_M &= q[\vec{v}, \vec{B}].\end{aligned}\quad (1)$$

В отличие от электрического поля, в магнитном поле сила действует только на движущийся заряд ( $\mathbf{v}$  - скорость частицы). (Примечание: в работе векторы набраны полужирным кеглем или отмечены стрелкой.) Модуль магнитной силы равен

$$F_M = qvB \cdot \sin\alpha,$$

где  $\alpha$  - угол между векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . Вектор  $\vec{F}_M$  перпендикулярен плоскости, образованной векторами  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ , а направление силы для положительного заряда задается правилом правого винта или левой руки (рис.1); для отрицательного заряда направление силы - противоположное.

Единица магнитной индукции - *тесла* (Тл). В поле с индукцией 1 Тл на частицу с зарядом 1 Кл и скоростью 1 м/с действует максимальная (при  $\sin\alpha = 1$ ) сила 1 Н.

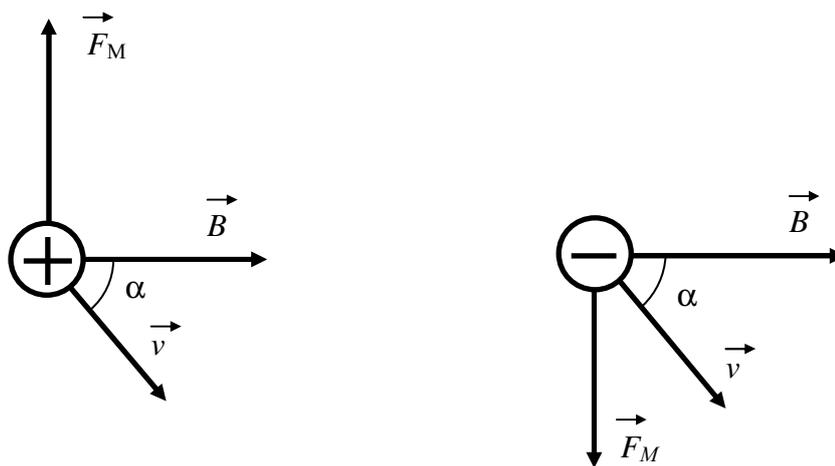


Рис.1. Направление силы при движении заряда в магнитном поле

Таким образом, напряженность электрического поля равна

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q},$$

а модуль магнитной индукции

$$B = F / (qv \cdot \sin\alpha).$$

В электромагнитных полях движущаяся заряженная частица подвергается воздействию двух сил, одна из которых обусловлена электрическим, а вторая - магнитным полем. Результирующая сила (*сила Лоренца*) равна их сумме

$$\vec{F} = q(\vec{E} + [\vec{v}, \vec{B}]).$$

Магнитные поля изображают *линиями магнитной индукции*, касательные к которым совпадают с направлением вектора  $\vec{B}$  в данной точке поля. Линии магнитной индукции - *непрерывные, замкнутые*. Векторные поля, обладающие замкнутыми линиями, называются *вихревыми полями*. На рис. 2 показаны линии поля прямого тока, они представляют собой систему охватывающих провод концентрических окружностей.

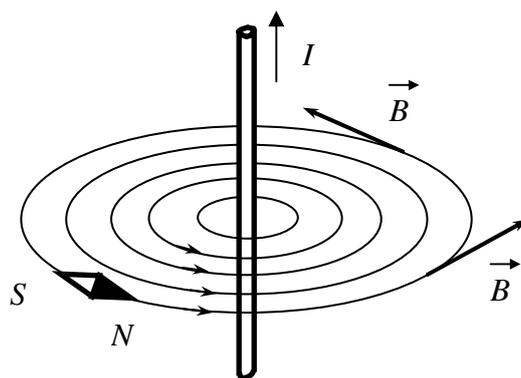


Рис.2. Линии магнитной индукции прямого тока

## 2. Магнитное поле, создаваемое электрическими токами

Электрический ток создает магнитное поле, методика расчета которого опирается на экспериментально установленные закон Био-Савара и принцип суперпозиции магнитных полей.

Рассмотрим случай тонкого произвольного проводника в вакууме, по которому протекает ток силой  $I$ . Разобьем провод на малые элементы длины  $dl$ , направление которых совпадает с направлением тока ( $I dl$  называют элементом тока). В точке  $P$ , положение которой относительно элемента тока определяется радиусом-вектором  $r$  (рис.3), магнитная индукция  $d\mathbf{B}$  от элемента тока равна (закон Био-Савара в векторной и скалярной формах):

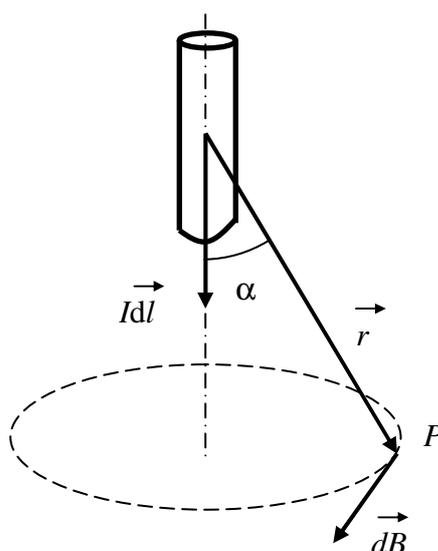


Рис.3. К расчету магнитной индукции элемента тока

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

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

Здесь  $\mu_0$  - магнитная постоянная, равная  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м (генри на метр),  $\alpha$  - угол между векторами  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$ .

Согласно *принципу суперпозиции* магнитных полей, полная магнитная индукция  $\mathbf{B}$  в данной точке поля равна векторной сумме полей  $d\mathbf{B}_i$  от всех элементов тока:

$$\mathbf{B} = \Sigma d\mathbf{B}_i.$$

По данной схеме расчета получены следующие выражения для поля в вакууме, создаваемого током  $I$  в тонких проводниках:

а) на расстоянии  $r$  от бесконечно длинного прямого проводника

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r};$$

б) в центре кругового тока радиусом  $r$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r};$$

в) внутри длинного соленоида (катушки), в котором на единицу длины приходится  $n$  витков,

$$B = \mu_0 I \cdot n$$

### 3. Электромагнитная индукция и самоиндукция

*Электромагнитная индукция* – явление возникновения электрического поля, электрического тока при изменении во времени магнитного поля или при движении проводника в магнитном поле.

Опытами М.Фарадея (1831 г.) было показано, что причиной появления в контуре индукционного тока является изменение магнитного потока через площадь, ограниченную контуром.

Рассмотрим плоскую площадку  $S$ , находящуюся в однородном поле индукции  $B$  (рис.4). *Магнитным потоком*, или потоком вектора магнитной индукции через площадку  $S$  называют величину

$$\Phi = BS \cos \alpha = B_n S.$$

Здесь  $B_n = B \cos \alpha$  - проекция вектора  $\mathbf{B}$  на нормаль  $\mathbf{n}$ . Магнитный поток - скаляр. Единица магнитного потока - *вебер*: Вб = Тл·м<sup>2</sup>.

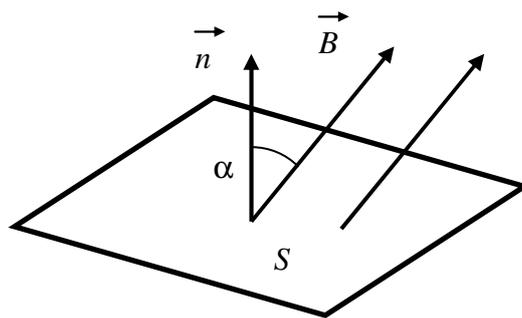


Рис.4. Определение потока векторной величины

Для наглядности поток можно считать пропорциональным полному числу линий магнитной индукции, проходящих через данную поверхность.

Если магнитное поле неоднородно, а рассматриваемая поверхность не является плоской, то ее можно разбить на бесконечно малые элементы  $dS$ . Магнитный поток через элемент поверхности есть  $d\Phi = B_n dS$ , а полный магнитный поток через всю поверхность

$$\Phi = \int B_n dS .$$

*Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея).* Возникновение индукционного тока в контуре показывает, что при электромагнитной индукции в проводнике появляется ЭДС  $\varepsilon_i$ , а ток является вторичным явлением. Опытами Фарадея установлено, что ЭДС индукции в контуре пропорциональна скорости изменения магнитного потока через площадь, ограниченную контуром:

$$\varepsilon_i = - d\Phi/dt.$$

Если контур состоит из  $N$  последовательно соединенных витков (сложный контур), то ЭДС будет равна сумме индуцируемых в каждом из витков в отдельности ЭДС:

$$\varepsilon_i = - \Sigma d\Phi/dt = - d(\Sigma\Phi)/dt = - d\Psi/dt. \quad (2)$$

Величину  $\Psi = \Sigma\Phi$  называют *полным магнитным потоком*, или *потокосцеплением*. Если поток  $\Phi$ , пронизывающий каждый из полного числа  $N$  витков, одинаков, то

$$\Psi = N \cdot \Phi.$$

*Сторонние силы и ЭДС.* Для поддержания тока в замкнутой цепи необходим источник тока. В источнике имеются силы, перемещающие заряды против сил электростатического поля. Такие силы называются *сторонними*. Перемещая заряд  $q$ , сторонние силы совершают работу  $A_{\text{стор}}$ . Отношение

$$\varepsilon = A_{\text{стор}}/q$$

называют *электродвижущей силой*, ЭДС источника тока. Единица ЭДС – *вольт*,  $1\text{В} = \text{Дж/Кл}$ .

Известно несколько различных сторонних сил. В явлении электромагнитной индукции различают два типа сторонних сил.

Один из них состоит в наведении (в вакууме или в веществе) *вихревого электрического поля* переменным магнитным полем. Силовые линии вихревого электрического поля - замкнутые. В таком поле, в противоположность электростатическому полю, работа по перемещению заряда по замкнутой линии не равна нулю.

Другой эффект связан с движением проводников в стационарном магнитном поле. На электроны проводимости, которые движутся вместе с проводником, действует магнитная сила (1), приводящая к разделению зарядов противоположных знаков, к генерации электрических токов. Индуцируемые электрические поля при этом потенциальны.

*Самоиндукция.* Рассмотрим контур К, в котором ток от источника с ЭДС  $\epsilon_0$  создает магнитное поле (рис. 5). При отсутствии ферромагнетиков магнитная индукция в каждой точке пропорциональна силе тока (см. закон Био-Савара), поэтому и полный магнитный поток через контур пропорционален силе тока

$$\Psi = LI.$$

Коэффициент пропорциональности  $L$  называется *индуктивностью* контура. Индуктивность за-

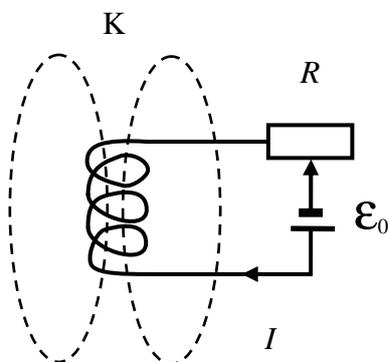


Рис.5. Схема для пояснения явления самоиндукции

висит от размеров контура и числа витков; она возрастает во много раз, если катушка расположена на замкнутом железном сердечнике. Единица индуктивности - *генри* ( $\text{Гн} = \text{Вб/А}$ ).

Если ток изменяется, например, при изменении сопротивления реостата  $R$  на рис. 5, то изменяется и поток. Тогда по закону электромагнитной индукции (2) в контуре возникает ЭДС *самоиндукции*, равная

$$\epsilon_{is} = - d\Psi / dt = - L dI/dt. \quad (3)$$

В контуре с индуктивностью 1 Гн ЭДС самоиндукции равна 1 В при изменении силы тока со скоростью 1 А/с.

Таким образом, при изменении тока возникает ЭДС самоиндукции  $\mathcal{E}_i$ , включенная последовательно с источником тока. ЭДС самоиндукции, в свою очередь, влияет на ток.

Направление индукционных токов находят по *правилу Ленца*: токи всегда направлены так, чтобы препятствовать причине, вызывающей эти токи. Это правило является следствием закона сохранения энергии [1-3]. Приведем примеры использования правила Ленца.

Пусть в магнитном поле находится неподвижный жесткий контур. При изменении магнитного потока порожденное индуцированным током дополнительное магнитное поле противодействует этому изменению: например, если поток возрастает, то индукционный ток замедляет (задерживает) этот рост.

Знак «минус» в формулах (2,3) пишется в соответствии с правилом Ленца, что поясним следующим примером. Пусть неподвижный контур находится в возрастающем магнитном поле (рис.6). Определим направление индукционного тока. Выберем положительное направление

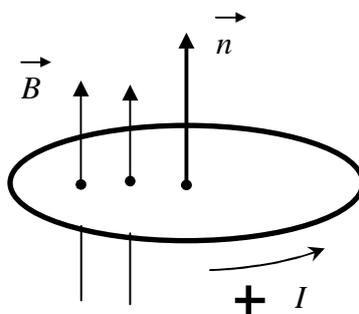


Рис.6. Правило Ленца

нормали  $n$  к контуру так, чтобы оно совпадало с направлением магнитной индукции. Тогда поток сквозь контур будет положительным. Положительное направление тока определяется выбором направления нормали и правилом правого винта; оно показано стрелкой. Если теперь магнитное поле увеличивается, т.е.  $d\Phi/dt > 0$ , то, согласно (2),  $\mathcal{E}_i < 0$ , а, следовательно, и  $I < 0$ . Это означает, что направление индукционного тока противоположно выбранному нами положительному направлению.

В явлении самоиндукции, в соответствии с правилом Ленца, происходит следующее. Если ток возрастает, то «полярность» ЭДС самоиндукции такова, чтобы препятствовать этому росту. При уменьшении тока, наоборот, ЭДС самоиндукции поддерживает ток, замедляя его убыль.

#### 4. Энергия магнитного поля

Электромагнитное поле обладает энергией, которая содержится как в электрическом, так и в магнитном поле.

Рассмотрим энергию стационарного магнитного поля, создаваемого током в контуре, не имеющим ферромагнетика. Найдем связь энергии поля с током.

Пусть к источнику тока с ЭДС  $\mathcal{E}$  подключают катушку индуктивности  $L$ . Для простоты вывода предположим, что источник и катушка не имеют сопротивления. При замыкании цепи ток возрастает, при этом выполняется соотношение (знак «минус» опущен)

$$\mathcal{E} = L \, dI/dt.$$

Интегрированием этого выражение получаем, что ток возрастает пропорционально времени

$$I = (\mathcal{E}/L)t.$$

При этом сторонние силы источника совершают работу. Элементарная работа по перемещению заряда  $dq$  равна произведению ЭДС на заряд

$$dA_{\text{стор}} = \mathcal{E}dq = \mathcal{E}Idt = LI \, dI.$$

Интегрируя выражение, найдем полную работу сторонних сил по достижении тока  $I$

$$A_{\text{стор}} = LI^2/2.$$

При этом вся работа сторонних сил пошла на создание магнитного поля, энергия которого равна работе сторонних сил:

$$W_M = LI^2/2. \quad (4)$$

Таким образом, энергия стационарного магнитного поля контура с током пропорциональна индуктивности и квадрату силы тока.

Энергию имеет само магнитное поле и ее можно выразить через характеристику поля – магнитную индукцию  $B$ . Расчеты показывают, что в вакууме энергия магнитного поля в единице объема, т.е. объемная плотность энергии  $w_M$ , Дж/м<sup>3</sup>, равна

$$w_M = B^2/(2 \mu_0).$$

## 5. Исчезновение и установление тока катушки

Пусть к источнику тока с ЭДС  $\mathcal{E}$  и малым сопротивлением подключают катушку индуктивностью  $L$  и сопротивлением  $r$  (рис. 7). Параллельно катушке включено сопротивление  $R$ . Если замкнуть ключи  $K$ , в катушке установится ток

$$I_0 = \mathcal{E} / r,$$

показанный штриховой линией. Быстро разорвем цепь ключами  $K$ . (Для большей наглядности показаны два ключа, но то же самое будет происходить и при разрыве цепи в одном месте.)

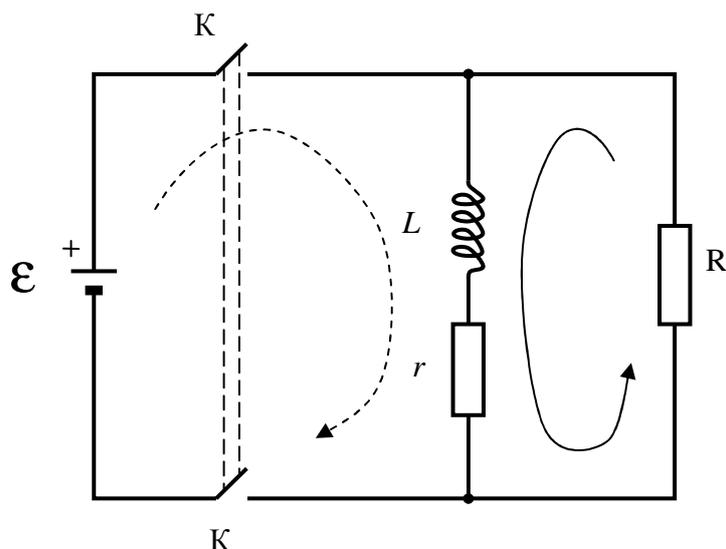


Рис.7. Возникновение ЭДС и тока самоиндукции

Обозначим через  $I$  мгновенную силу тока катушки в момент времени  $t$ . После отключения источника ток убывает и в катушке появляется ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_{is} = -L \, dI/dt.$$

Ток самоиндукции протекает по контуру, показанному сплошной линией. Для этого тока можно записать уравнение

$$(R+r) I = -L \, dI/dt.$$

Интегрируя уравнение с учетом начального условия – в момент времени  $t = 0$  ток катушки равен  $I_0$  – находим

$$I = I_0 \exp(-t/\tau),$$

где

$$\tau = L/(r + R). \quad (5)$$

Величина  $\tau$  называется *временем релаксации*. За время релаксации ток убывает в  $e \approx 2,71$  раза. Если индуктивность выразить в Генри, а сопротивление – в Омах, то время релаксации получим в секундах.

Если в катушке ток отсутствует и при этом замкнуть ключи К, то начнется процесс установления тока катушки индуктивности по закону

$$I = I_0 (1 - \exp(-t/\tau)),$$

где

$$\tau = L/r.$$

Таким образом, в контуре, содержащем индуктивность, изменения тока не могут происходить мгновенно. Следовательно, индуктивность обладает инерционным свойством. Это про-

исходит потому, что в катушке с током имеется магнитная энергия, которая не может изменяться бесконечно быстро.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Лабораторная установка включает в себя calorimeter, источник питания и несколько электрических схем. Для удобства все они пронумерованы. Время выполнения работы не менее двух часов.

### **Задание 1. Наблюдения явления самоиндукции и превращения магнитной энергии в теплоту**

*Ознакомиться с установкой*

Задание выполняют на установке (блок №3), схема которой показана на рис. 8. Установка содержит катушку на замкнутом железном сердечнике индуктивностью  $L \approx 0,3$  Гн и сопротивлением  $r = 12$  Ом. Параллельно катушке включены три лампы Л, которые служат индикатором тока самоиндукции и теплоты, полученной из энергии магнитного поля. Каждая лампа рассчитана на напряжение 24 В и ток 0,1 А; ее сопротивление в рабочем состоянии 240 Ом. С помощью переключателя П на три положения лампы подключают к индуктивности непосредственно (1) или через полупроводниковые диоды (2, 3). В положении переключателя 1 схема не

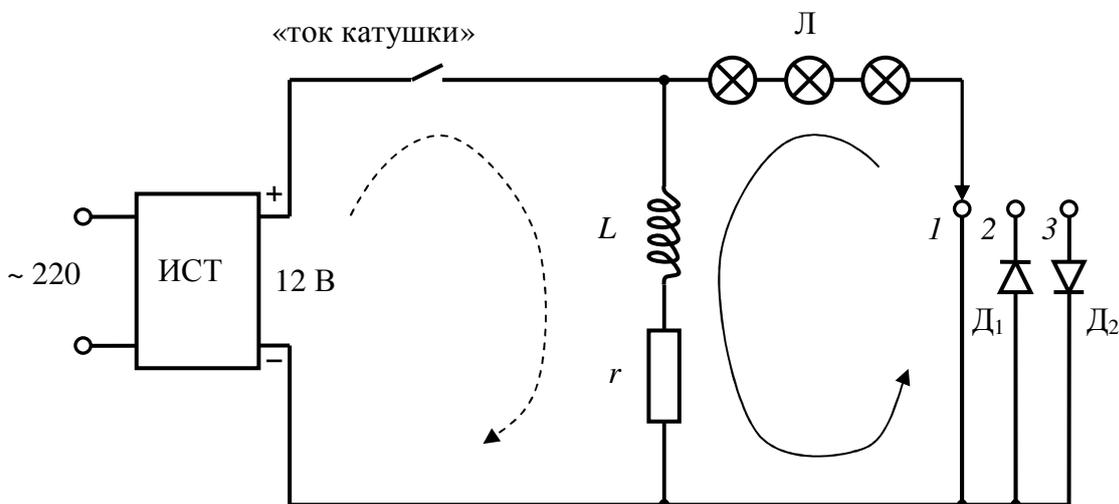


Рис.8. Демонстрация самоиндукции и магнитной энергии

отличается от схемы на рис. 7.

Через катушку пропускают постоянный ток 1 А от источника постоянного тока напряжением 12. Сам источник работает от сети 220 В.

*Порядок выполнения задания*

1. Выключить тумблер «ТОК КАТУШКИ». Переключатель П установить в положение «1».

2. Сетевую вилку источника вставить в розетку, при этом должен загореться световой индикатор источника.

3. Включить тумблер «ТОК КАТУШКИ». Практически весь ток источника (1 А), показанный штрихами, протекает через катушку индуктивности, так как ее сопротивление много меньше сопротивления ламп. На три лампы, включенные последовательно, подается напряжение 12 В вместо номинальных 72 В, поэтому ток ламп мал и они светятся очень слабо.

4. Наблюдая за лампами, выключить тумблер «ТОК КАТУШКИ». При этом возникает световая вспышка. Она вызвана индукционным током, показанным сплошной линией со стрелкой. Повторить опыт несколько раз, включая и выключая ток катушки.

5. Обсудим результаты опыта. Характеристики установки приведены в табл. 1 (поместить таблицу в отчете). Сопротивление трех ламп равно  $R = 720$  Ом; будем считать, что оно не зависит от силы тока. Энергия магнитного поля при токе 1А равна  $W_M = LI^2/2 = 0,15$  Дж. Время релаксации (см. (5))  $\tau = L/R = 0,0004$  с. При выключении тока ЭДС самоиндукции по порядку величины равна

$$\mathcal{E}_{is} = L di/dt \approx LI/\tau \approx 700 \text{ В.}$$

Таблица 1

**Характеристики демонстрационной установки**

$L$	$I$	$W_M$	$\tau$	$\mathcal{E}_{is}$
0,3 Гн	1 А	0,15 Дж	0,0004 с	700 В

Можно привести следующие объяснения вспышкам ламп, причем все они взаимосвязаны.

а) После отключения источника через лампы протекает ток самоиндукции, который вначале равен току катушки, т.е. 1 А. Этот начальный ток больше нормального тока ламп в десять раз. Ток затухает со временем релаксации  $\tau = 0,0004$  с.

б) После отключения источника в цепи ламп на короткое время возникает ЭДС самоиндукции порядка 700 В, превосходящая в 10 раз нормальное напряжение для ламп.

в) Магнитная энергия катушки  $W_M = 0,15$  Дж превращается в теплоту в лампах за время порядка  $\tau = 0,0004$  с. Средняя мощность тока равна  $P = W_M/\tau = 0,15/0,0004 = 375$  Вт, что на два порядка больше номинальной мощности трех ламп. Лампы не перегорают лишь вследствие кратковременности действия тока.

6. Опыты с диодами проясняют направление индукционного тока. Диоды имеют малое сопротивление для тока в направлении, показанном острием на условном обозначении диода; в обратном направлении ток практически не протекает. Установить переключатель в положение 2. Включить ток катушки. При этом через катушку протекает ток 1 А. Диод не пропускает ток источника через лампы, поэтому они темные. При выключении тока катушки наблюдают вспышку света. Отсюда следует вывод: индукционный ток в катушке протекает в направлении, показанном сплошной линией, т. е. после отключения источника ток катушки протекает «по инерции» в том же направлении.

В этом опыте вспышки были слабее, чем в предыдущем опыте. Дать этому объяснения.

7. Установить переключатель в положение 3. Включить «ТОК КАТУШКИ». Диод  $D_2$  пропускает ток и лампы слабо светятся. Наблюдать за лампами при выключении тока. Сделать выводы.

8. Выключить установку из сети.

### Задание 2. Изучить методику измерения энергии магнитного поля калориметром

Магнитную энергию катушки с током измеряют калориметром – прибором для измерения количества теплоты, выделяющейся или поглощающейся в каком-либо физическом, химическом или биологическом процессе. Название прибора происходит от слова «калория» - единицы теплоты. Магнитная энергия превращается в теплоту, которую измеряют калориметром.

Установка (рис. 9) состоит из катушки индуктивности, калориметра и блока питания. Катушка, без железного сердечника, содержит много витков медного провода, ее индуктивность  $L$  составляет несколько генри, а сопротивление  $r = 351$  Ом.

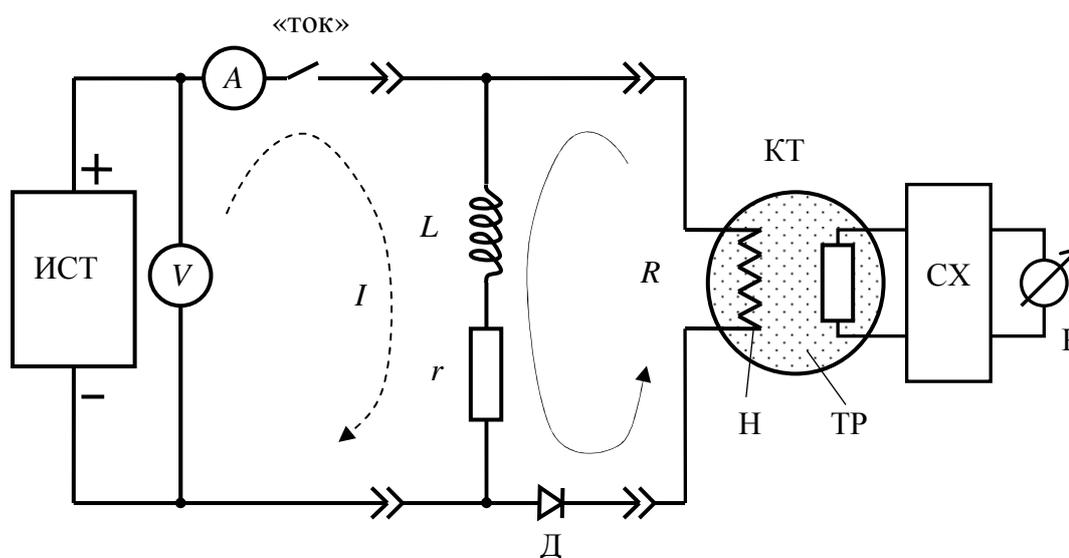


Рис.9. Измерение калориметром магнитной энергии катушки с током

Калориметр разработан на кафедре физики МГТУ им. Баумана [4] с использованием специальной лампы – терморезистора косвенного подогрева (рис. 10). В стеклянном баллоне Б

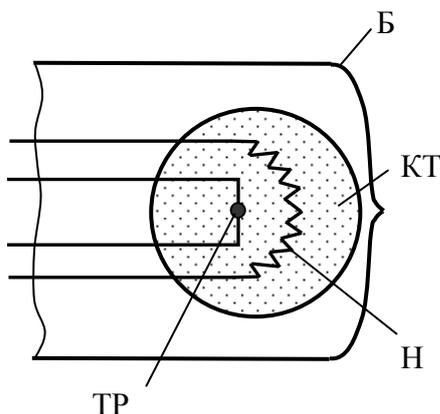


Рис. 10. Калориметрическая лампа: Б – стеклянный баллон; КТ – калориметрическое тело размером примерно 1 мм; Н – нагревательная спираль; ТР – терморезистор (термометр).

с разреженным газом находится калориметрическое тело КТ, содержащее нагреватель Н из нихромовой проволоки сопротивлением около 100 Ом и электрический термометр - терморезистор ТР. Терморезистор представляет собой крошечную бусинку из полупроводника с двумя металлическими выводами. Сопротивление терморезистора сильно зависит от температуры – при возрастании температуры на  $1^{\circ}\text{C}$  сопротивление уменьшается на несколько процентов, поэтому малые изменения температуры легко измерять терморезистором.

Калориметрическое тело КТ имеет малый размер ( $\sim 1$  мм), поэтому его теплоемкость мала. Вследствие этого калориметр является чувствительным прибором, а после измерения теплоты в нем быстро восстанавливается исходное состояние.

Вернемся к рис. 9. На нем кружком показано калориметрическое тело КТ с электрическим нагревателем Н и терморезистором ТР. Нагреватель через диод Д подключен к катушке индуктивности. Из сравнения с рис.8 в положении переключателя «2» видно, что обе схемы похожи, только вместо ламп используется нагревательная спираль калориметра. Теплота, которая выделялась в лампах, теперь выделяется в калориметре.

Рассмотрим работу установки. При замыкании тумблера «ТОК» через катушку протекает постоянный ток  $I$ , показанный штриховой линией. Диод Д не пропускает ток источника через нагреватель калориметра, поэтому перед измерением калориметр имеет комнатную температуру.

После выключения тумблера «ТОК» ток самоиндукции циркулирует по цепи, показанной сплошной линией. При этом диод не оказывает существенного сопротивления. Время релаксации тока  $\tau \approx 0,01$  с.

Магнитная энергия тока  $W_M$  превращается в теплоту в нагревателе калориметра ( $Q_{\text{кал}}$ ) сопротивлением  $R$  и в катушке индуктивности ( $Q_{\text{кат}}$ ) сопротивлением  $r$

$$W_M = Q_{\text{кал}} + Q_{\text{кат}}.$$

В согласии с законом Джоуля-Ленца, обе теплоты относятся как сопротивления:

$$Q_{\text{кал}} / Q_{\text{кат}} = R / r.$$

Из двух последних формул получаем

$$W_M = Q_{\text{кал}} (1 + r/R). \quad (6)$$

Выделившаяся в калориметре теплота  $Q_{\text{кал}}$  быстро нагревает калориметрическое тело и терморезистор. За это время теплота не успевает выйти из калориметра, она идет на повышение температуры тела. Теплота и приращение температуры связаны соотношением

$$Q_{\text{кал}} = C_T \Delta T,$$

где  $C_T$ , Дж/К – теплоемкость калориметра.

Терморезистор, специальная электрическая схема (СХ) и регистрирующий аналоговый прибор  $P$  образуют электрический термометр (см. рис. 9). Небольшое изменение сопротивления терморезистора при малом нагревании калориметра схема преобразует в электрическое напряжение, регистрируемое прибором  $P$  (о схеме подробнее см. в [5]). В результате выделения теплоты стрелка прибора  $P$  отклоняется на некоторое число делений  $n$ , которые связаны с теплотой соотношением

$$Q_{\text{кал}} = k n, \quad (7)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности. Таким образом, показание прибора калориметра  $n$  – есть *тепловая энергия калориметра в условных единицах*.

Подставляя (7) в (6), получим формулу для нахождения магнитной энергии по результатам измерения величины  $n$

$$W_M = Q_{\text{кал}} (1 + r/R) = k n (1 + r/R). \quad (8)$$

Коэффициент пропорциональности  $k$  определяют из опыта, называемого *градуировкой* калориметра. После градуировки теплота калориметра  $Q_{\text{кал}}$  становится известной в джоулях.

Для проверки формулы  $W_M = LI^2/2$  измеряют  $n$  при различной силе тока  $I$  катушки, по формуле (8) вычисляют энергию в джоулях и строят графическую зависимость  $W_M$  от  $I^2$ . Эта зависимость должна быть линейной. Из полученного графика находят также индуктивность  $L$  катушки по формуле (4).

*Порядок выполнения задания.*

1. Зарисовать в отчете схему на рис. 9.
2. Составить конспект методики измерения магнитной энергии.

### **Задание 3. Изучить зависимость энергии магнитного поля от силы тока**

*Порядок выполнения задания.*

1. Ознакомиться с калориметром (рис. 11). Рабочая калориметрическая лампа 1 расположена в камере с прозрачной крышкой. Рядом находится вторая такая же лампа, устройство

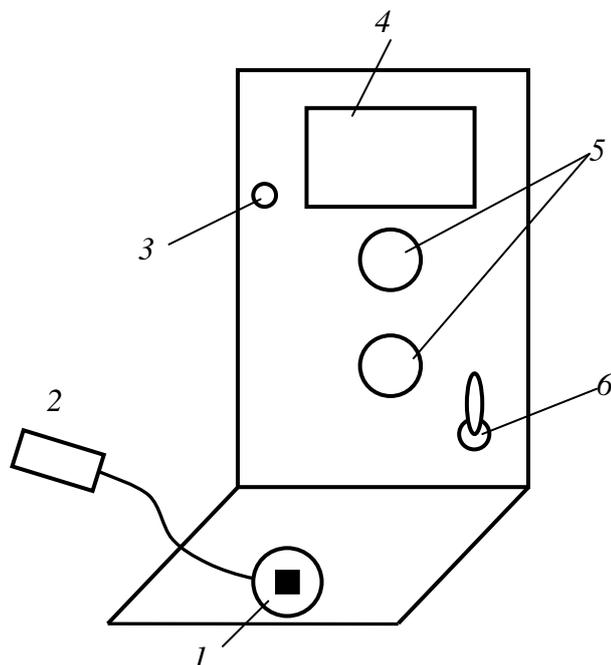


Рис. 11. Внешний вид калориметра:

1 – калориметрическая лампа; 2 – разъем для подключения нагревателя к схемам; 3 - 5 – установка нуля; 4 – показывающий прибор; 6 – сетевой выключатель

которой видно лучше. Нагреватель калориметра соединяют со схемами кабелем с разъемом 2. Ручками 5 выставляют показывающий прибор 4 на нуль перед каждым измерением. Тумблером 6 включают сетевое питание прибора.

2. Вставить сетевую вилку калориметра в розетку и включить тумблер «СЕТЬ», при этом должна загореться индикаторная лампа.

3. Установить нулевое показание стрелочного прибора калориметра ручками «УСТАНОВКА НУЛЯ» (грубо и точно). *Примечание.* Если такая регулировка не удастся, повернуть ручки в среднее положение и воспользоваться дополнительной регулировкой 3 с помощью отвертки.

4. Ознакомиться с блоком питания (№ 2), состоящим из двух источников, включенных последовательно. Напряжение каждого источника можно изменять от 0 до 15 В ручками «ГРУБО» и «ТОЧНО» и измерять встроенным вольтметром. Выходное напряжение блока равно сумме показаний двух вольтметров. Блок питания соединяют со схемами кабелем с разъемом. Для включения тока в цепь служит тумблер «ТОК». Силу потребляемого тока в мА измеряют универсальным цифровым прибором (мультиметром); прибор питается от батареи, которую включают кнопкой «ПИТАНИЕ МУЛЬТИМЕТРА».

5. По правилам техники безопасности блок питания должен быть заземлен. Проверить наличие заземления. При его отсутствии - обратиться к дежурному.

Выключить тумблер «ТОК». Вставить в сеть вилку, нажать кнопки «СЕТЬ» источников. На вольтметрах должно появиться напряжение.

6. Задания 3 – 6 выполняют с использованием блока №4, на котором собраны катушка индуктивности и простые электрические схемы. Схема для каждого задания выделена в отдельный узел, который обозначен номером и названием задания. Внимательно ознакомится с блоком № 4.

7. Собрать электрическую схему, используя узел «Задание 3. Изучить зависимость энергии магнитного поля катушки индуктивности от силы тока». Узел содержит диод в пластмассовом корпусе и разъемы. Катушку индуктивности подключить вилкой к гнездам «КАТУШКА»; кабель блока питания соединить с разъемом «ПИТАНИЕ»; нагреватель калориметра присоединить к разъему «КАЛОРИМЕТР». В результате будет собрана схема, показанная на рис. 9.

8. Подготовить табл. 2.

Таблица 2

#### Результаты измерения магнитной энергии

$I$ , мА	$n$ , дел	$I^2$ , мА <sup>2</sup>	$W_m$ , Дж

*Примечание.* Таблица должна содержать 8 строк.

9. Включить тумблер «ТОК» блока питания, нажать кнопку «ПИТАНИЕ МУЛЬТИМЕТРА» и ручками «ГРУБО» и «ТОЧНО» источников установить ток катушки  $I$  примерно 30 мА. Отпустить кнопку питания мультиметра. Результат измерения тока записать в табл. 2.

10. Установить ноль калориметра.

11. Глядя на шкалу прибора калориметра, выключить резко тумблер «ТОК» блока питания. Заметить максимальное отклонение стрелки в числе делений  $n$ . Результат измерения  $n$  записать в табл. 2. Напомним, что величина  $n$  пропорциональна теплоте, выделившейся в калориметре.

12. Для получения зависимости  $n$  от силы тока катушки индуктивности необходимо повторить измерения п.п. 9 – 11. После каждого измерения калориметр охлаждается в течение примерно полминуты, при этом стрелка прибора возвращается к нулевому значению. Если стрелка не вернулась точно на ноль, необходимо установить ноль ручкой «ТОЧНО».

Для каждого следующего измерения ток катушки увеличивают примерно на 20%. Цикл измерений заканчивают, когда отклонение  $n$  достигнет предела шкалы.

### Задание 4. Градуировка калориметра

Градуировка заключается в нахождении коэффициента пропорциональности  $k$  в формуле  $Q_{\text{кал}} = k n$  (см. (7)), которая связывает число делений  $n$  регистрирующего прибора калориметра с теплотой калориметра  $Q_{\text{кал}}$ .

Градуировка производится по схеме рис. 12. Конденсатор емкости  $C = 22 \text{ мкФ}$  заряжают

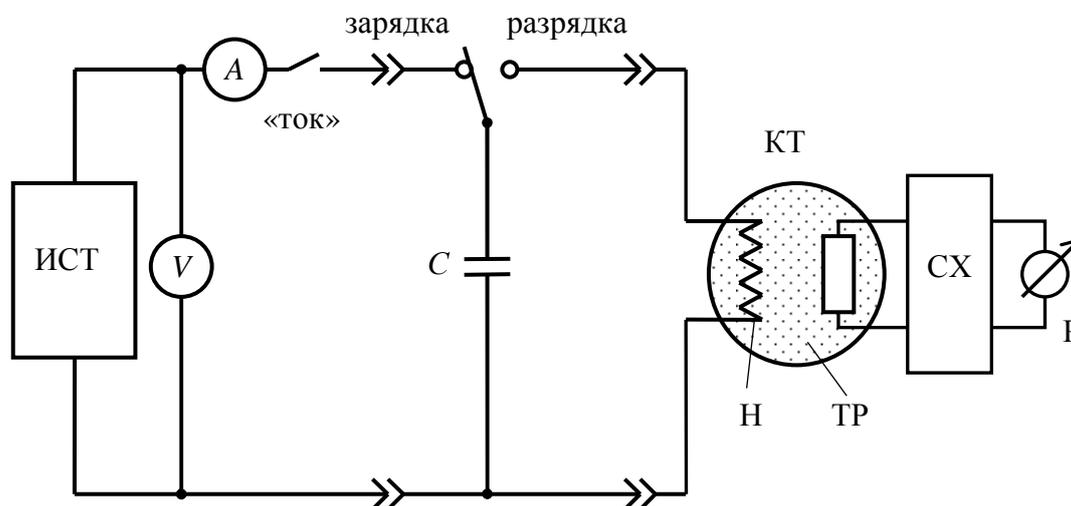


Рис. 12. Градуировка калориметра

до напряжения  $U$  и разряжают через нагреватель калориметра, в котором электрическая энергия конденсатора  $W_3 = CU^2/2$  полностью переходит в теплоту  $Q_{\text{кал}}$ . После разряда конденсатора производят отсчет показания калориметра  $n$  и находят коэффициент  $k$  из формулы

$$Q_{\text{кал}} = CU^2/2 = k n. \quad (9)$$

*Порядок выполнения задания.*

1 Подготовить табл. 3.

Таблица 3

#### Градуировка калориметра

$U, \text{ В}$	$n, \text{ дел}$	$W_3 = CU^2/2, \text{ Дж}$	$k, \text{ Дж/дел}$
$\langle k \rangle = \dots, \text{ Дж/дел}$			

2. Электрическую схему для градуировки (рис. 12) собрать с использованием узла «Задание 4. Градуировка калориметра». Узел содержит конденсатор емкости  $C = 22 \text{ мкФ}$  (микрофарад), переключатель «ЗАРЯДКА / РАЗРЯДКА» и разъемы.

Соединить кабель блока питания с разъемом «ПИТАНИЕ», а нагреватель калориметра - с разъемом «КАЛОРИМЕТР».

3. Установить переключатель в положение «ЗАРЯДКА». Включить тумблер «ТОК» блока питания. Установить напряжение  $U$  блока примерно 20 В. Напряжение равно сумме показаний двух вольтметров. Результат измерения  $U$  записать в табл. 3.

4. Установить нуль калориметра.

5. Переключить тумблер в положение «РАЗРЯДКА», при этом конденсатор быстро разряжается через нагреватель калориметра. Измерить максимальное отклонение стрелки калориметра  $n$ , дел. Результат измерения записать в табл. 3.

6. Повторить измерения п.п. 4 – 5.

7. Вычислить энергию конденсатора  $W_3 = CU^2/2$ , Дж и коэффициент  $k$  по формуле (9). Вычислить среднее  $\langle k \rangle$  из двух измерений, результаты записать в табл. 3.

8. По результатам измерений  $n$  в задании 3 (см. табл. 2) вычислить по формуле (8) магнитную энергию  $W_M$  в джоулях, используя среднее значение  $\langle k \rangle$ . Сопротивления:  $r = 351$  Ом,  $R = 103$  Ом. Результаты записать в табл. 2.

### Задание 5. Передача энергии в трансформаторе

Трансформатор (рис. 13) представляет собой устройство, предназначенное для преобра-

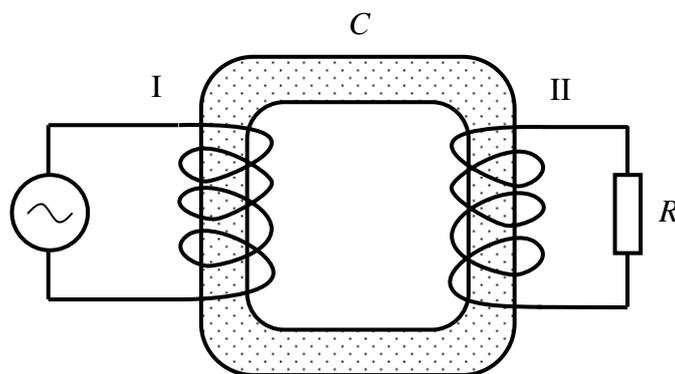


Рис. 13. Трансформатор

зования напряжения и силы переменного тока. Он имеет железный сердечник  $C$  замкнутой формы, который несет на себе две обмотки (катушки) – первичную  $I$  и вторичную  $II$ . Первичную обмотку подключают к сети питающего переменного тока, а вторичную – к потребителю электрической энергии. Переменный ток в первичной обмотке создает переменное магнитное поле, сосредоточенное в сердечнике. Изменяющееся магнитное поле порождает вихревое электрическое поле, которое служит причиной возникновения ЭДС во вторичной обмотке.

В трансформаторе происходит передача энергии из одного контура в другой посредством магнитного поля. Цель данного задания – продемонстрировать это явление.

Схема для выполнения задания показана на рис 14. Трансформатор содержит две одинаковые катушки  $K_1$  и  $K_2$  на общем замкнутом железном сердечнике. Магнитное поле создают,

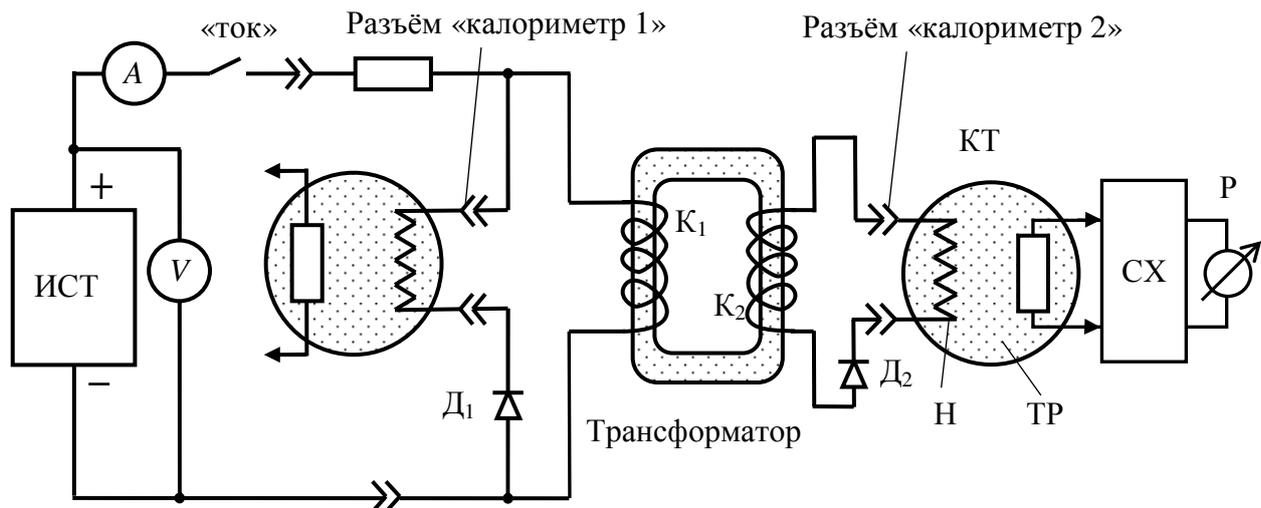


Рис. 14. Установка для изучения передачи энергии в трансформаторе

пропуская постоянный ток через первичную катушку. Благодаря большой магнитной проницаемости железа, магнитное поле и его энергия сосредоточены в сердечнике. Калориметр можно подключить либо к первой катушке, либо ко второй.

Когда калориметр подключен к первой катушке, диод  $D_1$  не пропускает ток источника через калориметр, но пропускает ток самоиндукции, т. е. он выполняет ту же функцию, что и в схеме на рис. 9. Диод  $D_2$  включен только для того, чтобы контуры первичной и вторичной катушки были одинаковыми для индукционных токов.

В первом опыте нагреватель калориметра подключают к катушке  $K_1$ , а вторичная цепь остается разомкнутой. После отключения источника тока магнитная энергия переходит в теплоту в первом контуре, которую измеряют калориметром в числе делений  $n_1$  показывающего прибора. Следовательно, в этом опыте измеряют магнитную энергию, запасенную в сердечнике, а сам опыт по содержанию не отличается от задания 3.

Во втором опыте нагреватель калориметра отключают от первой катушки и присоединяют ко второй. Через первую катушку пропускают такой же ток. После отключения источника возникающий индукционный ток циркулирует в том контуре, который замкнут, в данном случае – только во втором. Выключив ток источника, измеряют калориметром теплоту  $n_2$  во втором контуре. Опыт покажет, выделится ли во втором контуре такая же энергия, которая была запасена в магнитном поле тока первого контура.

*Порядок выполнения задания.*

1. Зарисовать в отчете схему на рис. 14.
2. Ознакомиться с узлом «Задание 5. Передача энергии в трансформаторе». Он содержит большой трансформатор, гасящее сопротивление в цепи питания первичной катушки, два диода в пластмассовых корпусах и разъёмы.

3. Выключить тумблер «ТОК» блока питания и присоединить его разъему «ПИТАНИЕ».
4. Нагреватель калориметра подключить к разъему «КАЛОРИМЕТР 1».
5. Включить тумблер «ТОК» блока питания и установить ток примерно 60 мА.
6. Выключить тумблер «ТОК», измерить показание калориметра ( $n_1$ ) и записать его в табл. 4.

Таблица 4

#### Передача энергии в трансформаторе

$n_1$	$n_2$	$n_2 / n_1$

7. Подключить нагреватель калориметра к разъему «КАЛОРИМЕТР 2».
8. Включить, а затем выключить тумблер «ТОК», измерить показание калориметра ( $n_2$ ).  
Результат измерения  $n_2$  записать в табл. 4.
9. Вычислить отношение  $n_2 / n_1$ . Сделать выводы.

#### Задание 6. Измерить индуктивность переменным током

Из результатов измерений в задании 3 можно найти индуктивность  $L$  катушки (см. ниже). Данное задание – контрольное. В нем индуктивность измеряют другим методом – переменным током (рис. 15), а совпадение результатов рассматривают в качестве доказательства правильности калориметрических измерений энергии магнитного поля.

*Теория метода.* Рассмотрим прохождение переменного тока через катушку индуктивности  $L$ , активное сопротивление которой пренебрежимо мало (рис. 15, а). При изменении тока возникает ЭДС самоиндукции  $\varepsilon = -L \frac{di}{dt}$ . Потенциалы  $\varphi_a$  и  $\varphi_b$  точек  $a$  и  $b$  связаны соотношением  $\varphi_a + \varepsilon = \varphi_b$ . Обозначим через  $U$  разность потенциалов точек  $a$  и  $b$ :

$$U = \varphi_a - \varphi_b = -\varepsilon = L \frac{di}{dt}.$$

Если ток изменяется по гармоническому закону

$$i = i_0 \sin \omega t,$$

напряжение равно

$$U = i_0 \omega L \cos \omega t = i_0 \omega L \sin (\omega t + \pi/2). \quad (10)$$

Из сравнения двух последних выражений видно, что колебания напряжения на индуктивности опережают по фазе колебания тока на  $\pi/2$ .

Сопротивлением катушки индуктивности переменному току (*индуктивным сопротивлением*)  $X_L$  называют отношение амплитуды напряжения  $U_0 = i_0 \omega L$  к амплитуде тока  $i_0$

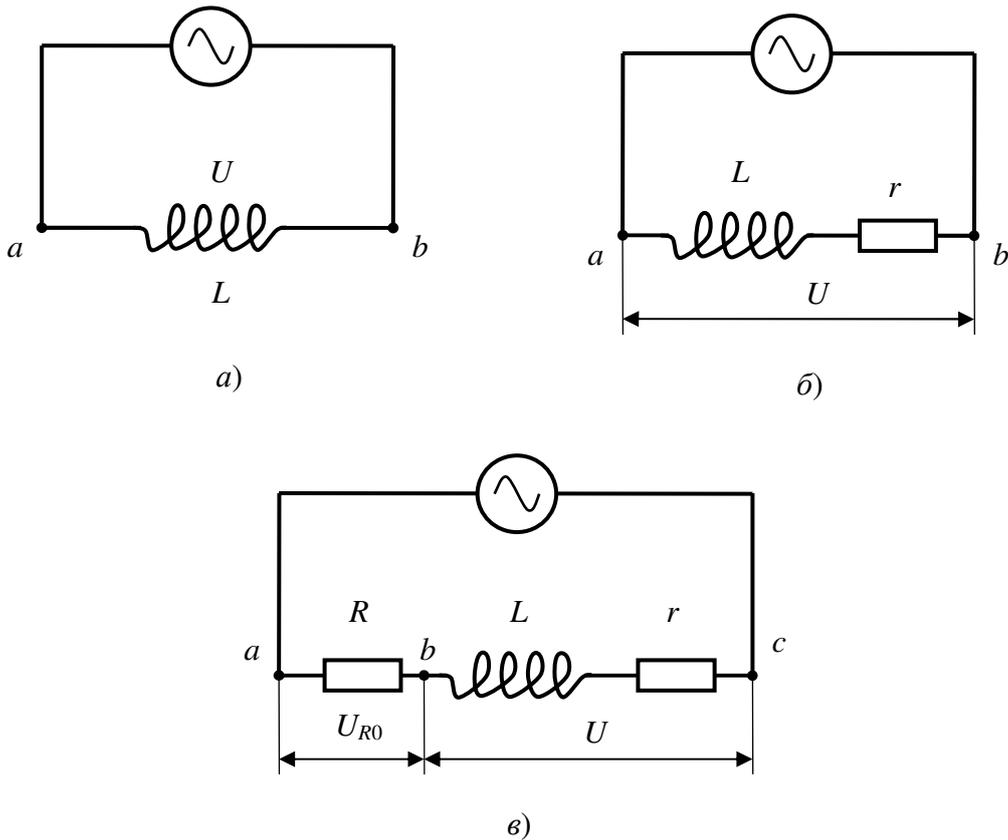


Рис. 15. Электрические цепи с переменным током

$$X_L = U_0 / i_0 = \omega L.$$

Индуктивное сопротивление пропорционально индуктивности и частоте тока. Если  $L$  выражено в генри, а  $\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$  – в  $\text{с}^{-1}$ , то  $X_L$  будет выражено в омах.

Рассмотрим последовательное соединение индуктивности и сопротивления  $r$ , которое может быть как сопротивлением самой катушки постоянному току, так и добавочным сопротивлением (рис. 15, б). Напряжение  $U$  равно сумме напряжений на индуктивности (см. (10)) и на сопротивлении, равном  $ri_0 \sin \omega t$ . Складывая напряжения методом векторных диаграмм, получим выражение для амплитуды напряжения  $U$

$$U_0 = i_0 ((\omega L)^2 + r^2)^{1/2}. \quad (11)$$

Схема для измерения индуктивности показана на рис. 15, в. Катушка с индуктивностью  $L$  и сопротивлением  $r$  подключена к клеммам  $bc$ . Последовательно с катушкой включено добавочное сопротивление  $R$ . Оба сопротивления известны. Измеряют напряжения  $U_0$  на катушке и  $U_{R0}$  – на сопротивлении  $R$ . Из напряжения  $U_{R0}$  находят амплитуду тока  $i_0 = U_{R0}/R$  и после подстановки в формулу (11) получают выражение для расчета индуктивности

$$L = \frac{1}{\omega} \{ (U_0/U_{R0})^2 R^2 + r^2 \}^{1/2}. \quad (12)$$

*Порядок выполнения задания.*

1. Составить конспект теоретической части, зарисовать схему на рис 15, в.
2. Собрать электрическую схему, используя узел «Задание 6. Измерить индуктивность» в блоке №4. Катушку подключить к гнездам «КАТУШКА», вольтметр переменного тока с пределом 10 В присоединить к гнездам « $U_{R0}$ » (рис. 16).

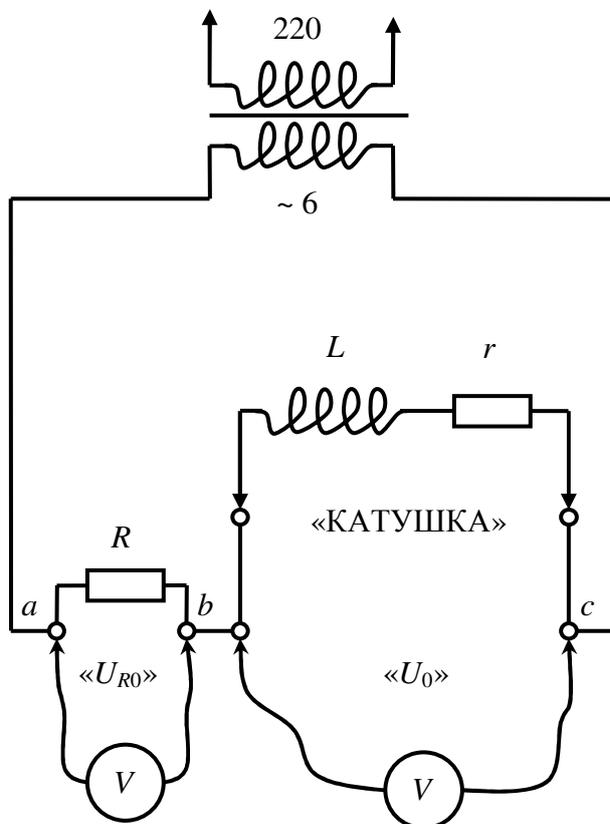


Рис. 16. Схема измерения индуктивности переменным током

Схема работает на переменном токе частотой  $\nu = 50$  Гц от небольшого понижающего трансформатора с 220 В до 6 В.

3. Включить понижающий трансформатор в сеть 220 В с помощью вилки.
4. Измерить напряжение  $U_{R0}$  и записать результат в табл. 5.
5. Подключить вольтметр к гнездам « $U_0$ », измерить напряжение и записать результат в табл. 5.
6. Выключить сетевое питание всех блоков лабораторной установки.
7. Вычислить индуктивность по формуле (12). Результат записать в табл. 5 и 6.

Таблица 5

### Измерение индуктивности переменным током

Параметры схемы:  $R = 1677$  Ом,  $r = 351$  Ом,  $\omega = 2\pi\nu = 100\pi$

$U_{R0}$ , В	$U_0$ , В	$L$ , Гн

### Задание 5. Обработать результаты измерений задания 3

1. По результатам измерений (см. табл. 2) построить на миллиметровой бумаге графическую зависимость магнитной энергии  $W_m$ , Дж, от квадрата силы тока  $I^2$ ,  $\text{mA}^2$ . Через отчетливо нанесенные экспериментальные точки и начало координат провести наилучшую «на глаз» прямую.

2. Построенный график сравнить с теоретической формулой (4). Сделать выводы.

3. Используя полученный график и формулу (4), вычислить индуктивность  $L$  катушки. Для расчета рекомендуем подставить в (4) значения  $W_m$  и  $I^2$  для некоторой точки (не обязательно – экспериментальной), лежащей на проведенной прямой. Величину  $I^2$  выразить в  $\text{A}^2$ . Результат вычисления индуктивности записать в табл. 6.

Таблица 6

#### Индуктивность катушки

Метод измерения	$L$ , Гн
Калориметрический	
Переменным током	

6. Сравнить результаты измерения индуктивности двумя методами. Их совпадение служит доказательством того, что магнитная энергия измеряется калориметром достаточно точно.

#### Контрольные вопросы

1. Что такое магнитное поле? Каковы его источники?
2. Дать определение магнитной индукции.
3. Чему равны силы Лоренца и Ампера?
4. Что такое линии магнитной индукции? Каким свойством они обладают?
5. Объяснить методику расчета магнитной индукции по известным токам в проводках.
6. Какому закону подчиняется явление электромагнитной индукции?
7. В чем заключается закон (правило) Ленца?
8. Дать определение индуктивности и единицы измерения.
9. В чем состоит явление самоиндукции? Чему равна ЭДС самоиндукции?
10. Как зависит магнитная энергия катушки с током от силы тока?
11. Как связана объемная плотность энергии магнитного поля с магнитной индукцией?
12. Как устроен калориметр? Объяснить методику измерения энергии магнитного поля катушки индуктивности.

### Список рекомендуемой литературы

1. *Иродов И.Е.* Основные законы электромагнетизма: Учеб. Пособие для вузов. –М.: Высш. Шк., 1983.-279 с.
2. *Калашников С.Г.* Электричество: Учебное пособие. –М.: Наука. 1985.-576с.
3. *Савельев И.В.* Курс общей физики. Т.2.- М.: Наука. 1978.-480 с.
4. *Фетисов И.Н.* Измерение энергии стационарных электрического и магнитного полей с помощью калориметра. Шестая международная конференция "Физика в системе современного образования" (ФССО-01): Тез. доклада, том 2. Ярославль: Изд-во ЯГ-ПУ им. К.Д. Ушинского, 2001.
5. *Фетисов И.Н.* Лабораторная работа Э-60 «Энергия электрического поля». МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010.