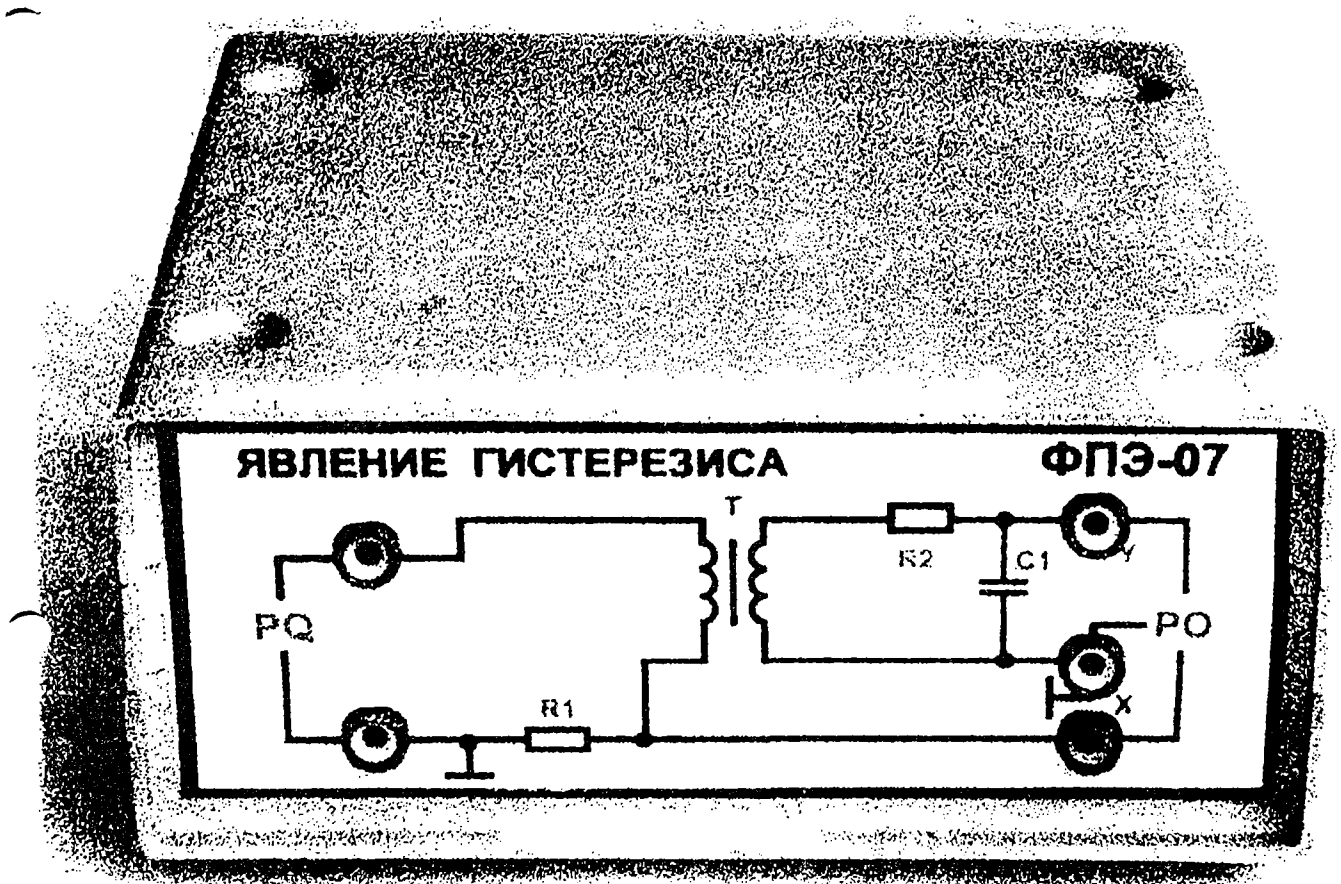


## Лабораторная работа 2.04

# Изучение гистерезиса ферромагнитных материалов



Цель работы – изучение гистерезиса ферромагнитных материалов, расчет и графическое построение основной кривой намагничивания, расчет работы перемещения и коэрцитивной силы.

### Теоретическая часть

Все вещества обладают магнитными свойствами, т.е. являются магнетиками. Магнитные свойства веществ определяются величиной и ориентацией магнитных моментов молекул, ионов или атомов. Магнитный момент  $\vec{p}$  плоского контура площадью  $S$ , по которому течет ток  $I$ , определяется по формуле:

$$\vec{p} = IS\vec{n} \quad (1)$$

где  $\vec{n}$  - единичный вектор нормали, направление которого определяется по правилу правого винта. В магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  на замкнутый контур с током действует механический момент сил:

$$|\vec{M}| = |[\vec{p}\vec{B}]| = pB\sin(\vec{p}, \vec{B}), \quad (2)$$

который стремится повернуть контур так, чтобы направления  $\vec{p}$  и  $\vec{B}$  совпадали. Контур с током создает также собственное магнитное поле с индукцией  $\vec{B}_i$ , совпадающее по направлению с магнитным моментом  $\vec{p}$  контура. В устойчивом состоянии контура, когда  $\vec{M} = 0$ , вектор индукции  $\vec{B}' = \vec{B} + \vec{B}_i$  в любой точке плоскости внутри контура всегда больше вектора индукции  $\vec{B}$  внешнего магнитного поля. Увеличение индукции  $\vec{B}$  внутри контура с током в магнитном поле качественно объясняет увеличение индукции в ферромагнетике, помещенном во внешнее магнитное поле.

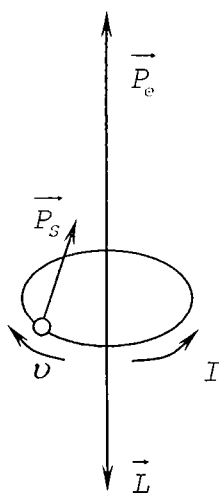


Рис. 1

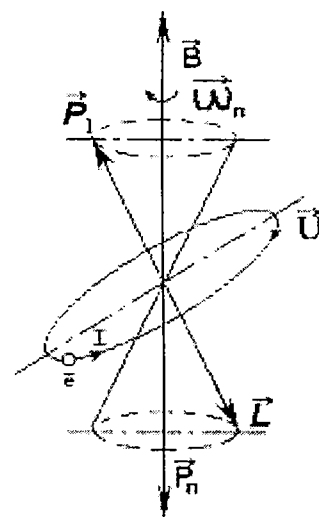


Рис. 2

Намагничивание вещества объясняется наличием у составляющих его атомов, молекул, ионов микроскопических магнитных моментов: электронного орбитального  $\vec{p}_e$ , электронного собственного (спинового)  $\vec{p}_s$ , ядерного  $\vec{p}_n$ . Электронным орбитальным магнитным моментом обладает электрон, движущийся вокруг ядра атома (рис. 1). Такой электрон подобен плоской круговой рамке с током  $I = ev$ , имеющей магнитный момент  $\vec{p}_e = IS\vec{n} = ev\pi r^2\vec{n}$ , где  $e$  – заряд электрона,  $v$  – частота вращения,  $r$  – радиус круговой орбиты. Направление магнитного момента  $\vec{p}$

противоположно направлению механического момента  $\vec{L} = [\vec{r}m_e\vec{v}]$  импульса (рис. 2)  $\vec{p}_e$  и  $\vec{L}$  связаны соотношением  $\vec{p}_e = \frac{-e}{2m_e}\vec{L}$ , где  $m_e$  – масса электрона.

Спиновой магнитный момент  $\vec{p}_s$  (рис. 1) является неотъемлемым свойством электрона. Единицей магнитного момента является магнетон Бора:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ Ам}^2,$$

где  $\hbar$  – постоянная Планка.

Ядерный магнитный момент  $\vec{p}_n$  либо равен нулю, либо на три-четыре порядка меньше  $\mu_B$  и его влиянием можно пренебречь. При отсутствии пол приближенно можно считать, что магнитный момент атома

$$\vec{p}_{am} = \sum_{i=1}^Z \vec{p}_{ei} + \sum_{i=1}^Z \vec{p}_{Si}, \quad (3)$$

где  $Z$  – число электронов в атоме.

Магнитный момент молекулы  $\vec{p}_{mol} = \sum_{k=1}^N \vec{p}_{amk}$ , где  $N$  – число атомов в молекуле

Во внешнем магнитном поле на электрон атома, как на замкнутый контур током, действует момент сил  $\vec{M}$  (рис. 2). Под действием этого момента си электрон, подобно механическому волчку, будет совершать прецессию, при которо векторы  $\vec{p}$  и  $\vec{L}$  описывают с постоянной угловой скоростью конус вокруг направления поля. Это дополнительное движение электрона приводит к появлению него магнитного момента прецессии  $\vec{p}_n$ , направленного против магнитного пол  $\vec{B}$ . Это явление носит название диамагнитного эффекта. При наличии внешнег магнитного поля магнитный момент атома

$$\vec{p}_{am} = \sum_{i=1}^Z \vec{p}_{ei} + \sum_{i=1}^Z \vec{p}_{Si} + \sum_{i=1}^Z \vec{p}_{ni} \quad (4)$$

Намагниченность  $\vec{J}$  равна магнитному моменту единицы объема магнетика:

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{p}_{mol}}{\Delta V} \quad (5)$$

где  $\Delta V$  – малый объем магнетика;  $\sum \vec{p}_{mol}$  – сумма магнитных моментов всех молеку в объеме  $\Delta V$ . Намагниченность  $\vec{J}$  связана с напряженностью магнитного поля:

$$\vec{J} = \chi \vec{H} \quad (6)$$

где  $\chi$  – коэффициент пропорциональности, называемый магнитно восприимчивостью вещества. Магнитные свойства вещества характеризуются такж магнитной проницаемостью  $\mu$ .  $\chi$  и  $\mu$  связаны соотношением

$$\mu = 1 + \chi \quad (7)$$

В зависимости от знака и величины магнитной восприимчивости вс вещества делятся на три группы:

1. Диамагнетики – вещества (например, инертные газы), у которых пр отсутствии внешнего магнитного поля орбитальные  $\vec{p}_e$  и спиновые  $\vec{p}_s$  моменты атомов или молекул скомпенсированы. Во внешнем магнитном поле в результате прецессии появляются индуцированные магнитные моменты  $\vec{p}_{am} = \sum \vec{p}_n$  направленные против поля, а магнитная восприимчивость отрицательн

$\chi = -(10^{-6} \dots 10^{-8})$ .

2. Парамагнетики – вещества, у которых при отсутствии внешнего поля  $\vec{J} = 0$  вследствие хаотической ориентации магнитных моментов  $\vec{p}_{ам}$  или  $\vec{p}_{мол}$ . Во внешнем магнитном поле под действием вращающего момента сил  $\vec{M}$  магнитные моменты ( $\vec{p}_{ам}$  и  $\vec{p}_{мол}$ ) вещества стремятся сориентироваться в направлении поля, в результате чего  $J > 0$  и  $\chi > 0$  ( $\chi = 10^{-4} \dots 10^{-6}$ ).

3. Ферромагнетики – это кристаллические вещества, у которых магнитные моменты отдельных ионов  $\vec{p}_i \neq 0$ . У ферритов элементарную ячейку кристалла образуют ионы различного типа, у ферромагнетиков – одного типа. Как показали опыты Эйнштейна и де Гааза, а также опыты Н.Ф. Иоффе и П.Л. Капицы магнитный момент иона ферромагнетика обусловлен упорядоченной ориентацией спиновых магнитных моментов.

Часть ферромагнетика, в которой все магнитные моменты при отсутствии внешнего поля устанавливаются в одном направлении за счет обменного взаимодействия, называется доменом (рис. 7.3,а). Домен обладает магнитным моментом  $\vec{p}_0$ . Размеры доменов составляют  $l = 10^{-8} \dots 10^{-6}$  (м<sup>3</sup>). При отсутствии внешнего магнитного поля магнитный момент ферромагнетика  $\vec{p} = \sum \vec{p}_0 = 0$ .

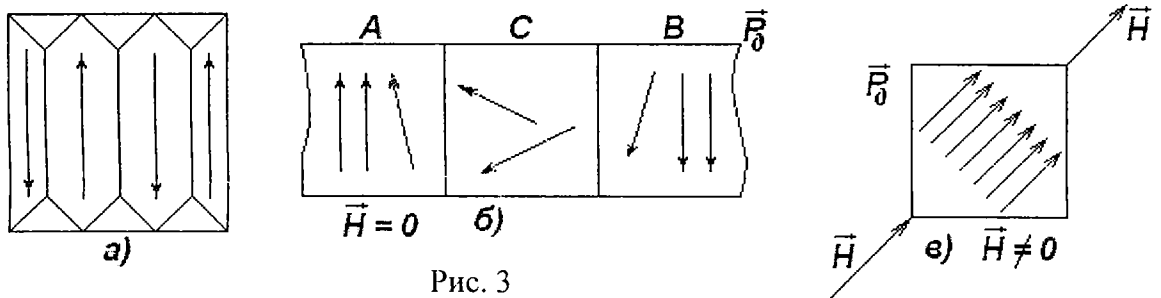


Рис. 3

Между доменами А и В имеются переходные слои С (рис. 3, б) шириной  $l_1 = 10^{-9} \dots 10^{-8}$  м. Внутри переходного слоя магнитные спиновые моменты ионов поворачиваются до тех пор, пока не примут нужного направления. Во внешнем магнитном поле переходные слои разрушаются. Магнитные моменты отдельных доменов поворачиваются в направлении магнитного поля (рис. 3, в).

Зависимость намагниченности  $J$  магнетиков от напряженности  $H$  внешнего магнитного поля изображена на рис. 4. Нелинейная область I отражает процесс ориентации доменов в ферромагнетиках в направлении внешнего поля при возрастании напряженности  $H$ . В сильных полях (область II) наступает магнитное насыщение и намагниченность практически не зависит от напряженности поля  $H$ . Кривая  $J = f(H)$  носит название основной кривой намагничивания. Для пара- и диамагнетиков зависимость  $J = f(H)$  линейная.

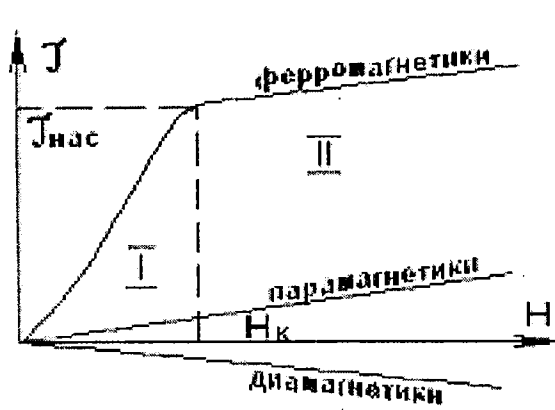


Рис.4

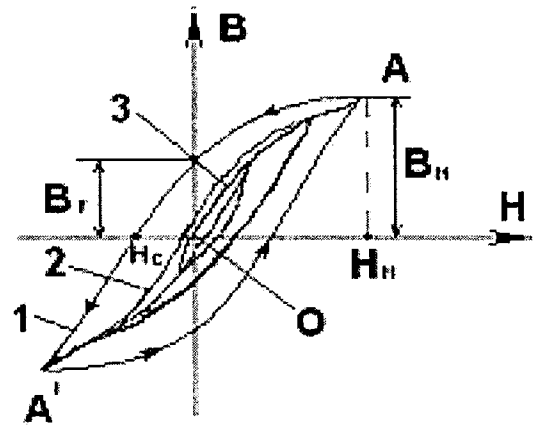


Рис.5

У ферромагнетиков и ферритов имеет место магнитный гистерезис, в котором проявляется зависимость намагниченности от предшествующего состояния. При циклических изменениях величины и направления напряженности внешнего поля  $H$  эта зависимость характеризуется кривой, называемой петлей гистерезиса (рис. 5, кривые 1, 2, 3). Если ферромагнетик был первоначально размагничен ( $B=0, H=0$ ), то его намагничивание происходит по основной кривой намагничивания  $OA$ . В точке  $A$  напряженность  $H_H$  и индукция  $B_H$  соответствуют состоянию магнитного насыщения. Его размагничивание происходит по кривой  $(A-B_{ост}-H_C-A')$ . При  $H=0$  намагниченность ферромагнетика не исчезает:  $B=B_{ост}$ . Это состояние называется остаточным магнетизмом. Напряженность  $(-H_C)$ , при которой исчезает остаточная намагниченность ( $B=0, H=-H_C$ ), принято называть коэрцитивной силой. Если при циклическом намагничивании  $H_{max} \geq H_C$ , то мы получаем максимальную петлю гистерезиса I. Кривые 2 и 3 – это частные циклы когда  $H_{max} < H_C$ . Максимумы  $B$  и  $H$  частных циклов лежат на основной кривой намагничивания  $OA$ . Условно принято считать ферромагнетики жесткими, если  $H_C \geq 100$  А/м. Если  $H_C < 100$  А/м, ферромагнетики считаются мягкими. Магнитная проницаемость  $\mu$  ферромагнетика зависит от напряженности магнитного поля  $H$  (рис. 6). Магнитная проницаемость  $\mu = B/\mu_0 H$  достигает максимума, когда напряженность  $H$  внешнего поля становится равной напряженности  $H_H$ , при которой домены максимально ориентируются по направлению поля (рис. 3, в) и при этом достигается магнитное насыщение образца. В табл. 1 приведены характеристики некоторых ферромагнетиков и ферритов.

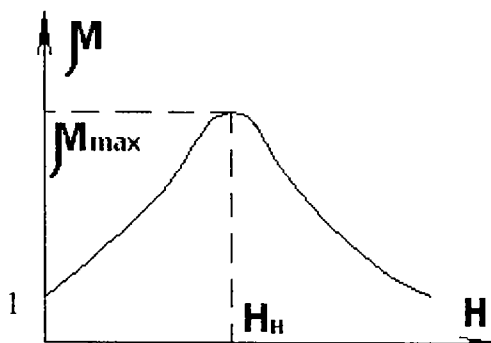


Рис. 6

Таблица 1

Вещество	$\mu_{\text{макс}}$	$H_c, \text{А/м}$	$B_{\text{ост}}, \text{Тл}$
Железо техническое	5000	80	0,06
Супермаллой	1000000	0.16	-
Сталь кобальтовая	-	2000	0,9
Феррит никель-цинковый	7500	4	-

## Экспериментальная часть

### Приборы и оборудование

Принципиальная схема установки приведена на рис. 7, где:  
 PQ – звуковой генератор ГС-118,  
 РО – электронный осциллограф С1-150,  
 ФПЭ-07 – модуль “явление гистерезиса”.

### Методика измерений

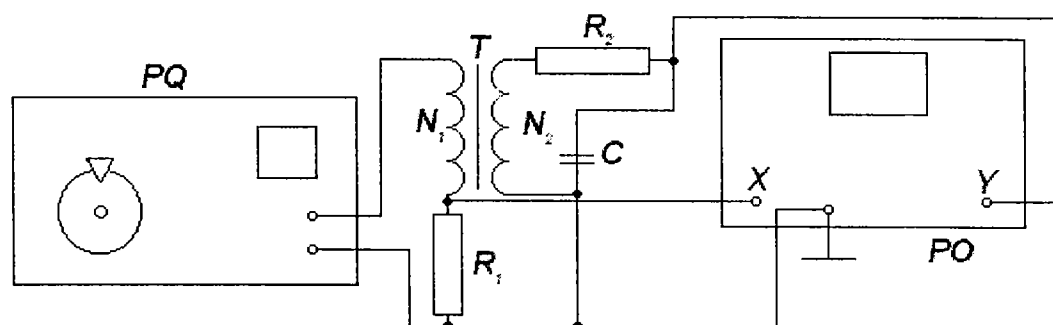


Рис. 7

Исследуемый образец выполнен в виде тороидального трансформатора Т первичная обмотка которого содержит  $N_1$  витков, а вторичная –  $N_2$  витков. Напряжение на первичную обмотку трансформатора Т подается с выхода звукового генератора PQ через сопротивление  $R_1$ . Вторичная обмотка трансформатора последовательно соединена с сопротивлением  $R_2$  и конденсатором С. С сопротивления  $R_1$  на вход усилителя горизонтального отклонения осциллографа РО подается напряжение  $U_x$ , пропорциональное напряженности магнитного поля  $H$ . На вход Y с конденсатора С подается напряжение  $U_y$ , пропорциональное индукции магнитного поля  $B$ . При радиусе витка обмотки  $r_a \ll r_m$ , радиуса тороида напряженность  $H$  в тороиде

$$H = \frac{N_1}{2\pi r_m} I_1 \quad (8)$$

где  $r_m = (r_1 + r_2)/2$ ;  $r_1 = d_1/2$ ;  $r_2 = d_2/2$ .

Так как падение напряжения на сопротивлении  $R_1$  равно  $U_x = I_1 R_1$ , то с учетом (8)

$$U_x = \frac{2\pi r_m R_1 H}{N_1} \quad (9)$$

$U_x$  определяется по коэффициенту отклонения электронного луча по горизонтальной оси  $k_x$ :

$$U_x = k_x x \quad (10)$$

С учетом (10) выражение для  $H$  может быть записано в виде

$$H = \frac{N_1 k_x x}{2\pi R_1 r_m} = \alpha k_x x \quad (11)$$

По закону Фарадея ЭДС индукции по вторичной обмотке

$$\varepsilon_i = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \frac{dB}{dt} S_2 \quad (12)$$

где  $\Phi$  – поток вектора магнитной индукции через один виток;  $S_2$  – площадь поперечного сечения тороида.

По закону Кирхгофа для вторичной обмотки получаем:

$$\varepsilon_i = U_C + I_2 R_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} \quad (13)$$

где  $U_C$  – напряжение на конденсаторе;  $I_2$  – ток во вторичной обмотке;  $L_2$  – индуктивность вторичной обмотки.

Так как  $L_2$  очень мало, а  $I_2 R_2 \gg U_C$ , уравнение (13) может быть записано с учетом (12) в следующем виде:

$$-N_2 \frac{dB}{dt} S_2 = I_2 R_2.$$

Откуда

$$I_2 = -\frac{N_2 S_2}{R_2} \frac{dB}{dt} \quad (14)$$

Учитывая (14), найдем напряжение  $U_y$ , равное напряжению на конденсаторе

$$U_y = U_C = \frac{Q}{C} = \frac{\int_0^t I_2 dt}{C} = -\frac{N_2 S_2}{R_2 C} \int_0^B dB = -\frac{N_2 S_2 B}{R_2 C} \quad (15)$$

где  $Q$  – заряд на обкладках конденсатора.

Если известен коэффициент отклонения луча  $k_y$  по вертикали, то

$$U_y = k_y y \quad (16)$$

Из выражения (15) и (16) получаем

$$B = \frac{R_2 C U_y}{N_2 S_2} = \frac{R_2 C k_y y}{N_2 S_2} = \beta k_y y \quad (17)$$

Подав одновременно напряжения  $U_y$  и  $U_x$  на вертикально и горизонтально отклоняющие пластины, получим на экране осциллографа петлю гистерезиса.

По площади петли можно найти работу перемагничивания, отнесенную к единице объема. Малое изменение объемной плотности энергии магнитного поля

$\omega_H = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$  в цикле перемагничивания определяется по формуле

$$d\omega_H = Hd(\mu\mu_0 H) = HdB \quad (18)$$

Работа  $dA_n$  расходуется на изменение внутренней энергии единицы объема ферромагнетика. За полный цикл перемагничивания

$$A_n = \oint HdB \quad (19)$$

Учитывая (11) и (17), получаем

$$A_n = \frac{N_1 R_2 C k_x k_y}{2\pi r_m R_1 N_2 S_2} S_n \quad (20)$$

где  $S_n$  – площадь петли гистерезиса;  $S_2 = (r_1 - r_2)b$ .

$k_x$  – коэффициент отклонения по каналу X;  $k_x = 0,3$  В/дел.

### Экспериментальная установка

Для изучения явления гистерезиса предназначен модуль ФПЭ-07. Принцип работы заключается в получении петли гистерезиса ферритового образца. Исследуемым образцом является сердечник тороидального трансформатора Т с двумя обмотками  $N_1$  (намагничивающая обмотка) и  $N_2$  (измерительная обмотка). Намагничивающая обмотка запитывается от генератора сигналов через резистор  $R_1$  переменным током. На резисторе  $R_1$  возникает напряжение, пропорциональное этому току и напряженности магнитного поля в образце. Это напряжение подается на вход “х” модуля ФПЭ-07. Измерительная обмотка трансформатора присоединена к интегрирующей  $R_2$ - $C_1$  цепочке. Напряжение на интегрирующей емкости  $C_1$  пропорционально величине вектора индукции и подается на вход “у” модуля ФПЭ-07.

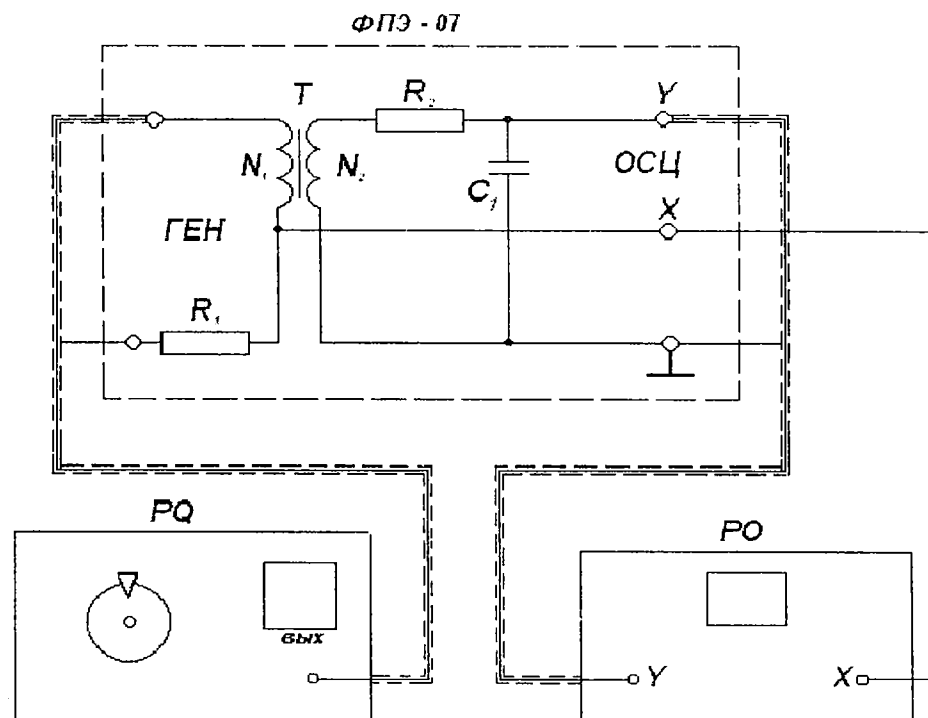


Рис. 8



## Порядок выполнения работы

Задание 1. Определение основной кривой намагничивания.

1. Подать напряжение на установку.
2. Ознакомиться с работой звукового генератора PQ и электронного осциллографа PO в режиме измерения фигур Лиссажу.
3. Подготовить приборы к работе:
  - а) установить следующие параметры выходного сигнала звукового генератора: частота – 2 кГц; выходное напряжение равно 0.
  - б) отключить развертку на осциллографе PO.
4. Включить лабораторный стенд и приборы. Установить луч в центре экрана осциллографа, после чего, регулируя величину выходного напряжения на звуковом генераторе и усиление по оси Y, установить максимальную петлю гистерезиса в пределах экрана, соответствующую магнитному насыщению образца. Уменьшая величину выходного напряжения, получить семейство петель гистерезиса (рис. 5) – не менее 5 петель. Для каждой петли снять координаты «X» и «Y» ее вершины и записать их в таблицу 2 (можно зарисовать их на кальку с экрана);
5. По формулам (11) и (17) вычислить значения напряженности H и индукции B вершин каждой петли гистерезиса и записать их в таблицу, используя следующие значения величин:  $d_1=21,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $d_2=12 \cdot 10^{-3}$  м,  $b=10 \cdot 10^{-3}$  м,  $N_1=200$ ,  $N_2=100$ ,  $R_1=22$  Ом,  $R_2=2.9$  кОм,  $C=0,47$  мкФ, где  $d_1$  – диаметр первичной обмотки тороида;  $d_2$  – диаметр вторичной обмотки тороида;  $N_1$  – число витков первичной обмотки;  $N_2$  – число витков вторичной обмотки;  $R_1$ ,  $R_2$  – добавочные сопротивления.
6. Оценить доверительную границу случайной погрешности измерения H и B при доверительной вероятности  $P=0,9$ , связанную с погрешностью величин  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $x$ ,  $y$ . Погрешность измерения величин H и B определяется:
  - а) приборными погрешностями коэффициентов отклонения электронного луча  $k_x$ ,  $k_y$  и погрешностями визуального отсчета величин  $x$  и  $y$  на экране осциллографа (по паспорту на осциллограф  $\Delta k_x=\pm 0,07k_x$ ,  $\Delta k_y=\pm 0,07k_y$ ,  $\Delta x=\Delta y=0,5$  мм);
  - б) погрешностями величин  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $r_1$ ,  $S_2$ ,  $C$  (она существенного вклада в общую погрешность не дает);
  - в) систематической погрешностью, связанной с некоторыми допущениями при выводе расчетных формул (11) и (17). Доверительные границы погрешности отдельных измерений в соответствии с формулой (Приложение 2.13) и уравнениями (11) и (17) определяются выражениями

$$\Delta H = \alpha \sqrt{x^2 \left( \frac{k_p \Delta k_x}{3} \right)^2 + k_x^2 \left( \frac{k_p \Delta x}{3} \right)^2} \quad (21)$$

$$\Delta B = \beta \sqrt{y^2 \left( \frac{k_p \Delta k_y}{3} \right)^2 + k_y^2 \left( \frac{k_p \Delta y}{3} \right)^2} \quad (22)$$

где  $\Delta H$  и  $\Delta B$  – доверительные границы погрешностей измерения H и B,  $k_p=1,645$  для доверительной вероятности  $p=0.9$ . Значения  $\pm \Delta H$  и  $\pm \Delta B$  наносятся на кривую  $B=f(H)$ , а также записываются в таблицу 2.

Задание 2: Оценка работы перемангничивания  $A_{II}$  за один цикл.

1. Получить максимальную петлю гистерезиса и зарисовать на кальке в координатах  $x$  и  $y$ .
2. Скопировать эту петлю на миллиметровую бумагу, измерить ее площадь.
3. Определить работу перемагничивания за один цикл по формуле (20).
4. Результаты занести в таблицу 3.

Задание 3. Определение коэрцитивной силы  $H_c$  и остаточной индукции  $B_{ост}$ .

1. По максимальной петле гистерезиса найти координату  $x_c$ , соответствующую коэрцитивной силе  $H_c$  и  $y_{ост}$ , соответствующую  $B_{ост}$  (см. рис. 5).
2. По формулам (11 и 17) рассчитать  $H_c$  и  $B_{ост}$ .
3. По полученному значению  $H_c$  определить группу ферромагнетика (мягкий или жесткий). По формулам (21 и 22) оценить погрешности измерения  $H_c$  и  $B_{ост}$ .
4. Данные занести в таблицу 7.3.

Таблица 2.

№ п/п	$x$ , дел	$H$ , А/м	$\Delta H$ , А/м	$y$ , дел	$k_y$ , В/дел	$B$ , Тл	$\Delta B$ , Тл
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

Таблица 3.

$S_{п,2}$ мм <sup>2</sup>	$S_{п,2}$ дел <sup>2</sup>	$A_{п,2}$ Дж	$x_c$ , дел	$H_c$ , А/м	$\Delta H_c$ , А/м	тип ферромагнетика	$U_{ост}$ , дел	$B_{ост}$ , Тл

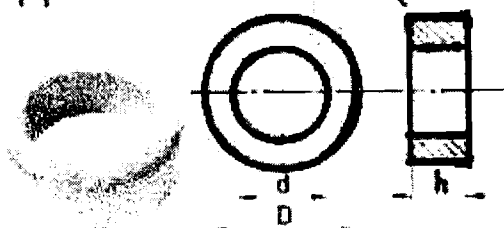
### Контрольные вопросы

1. Как ведет себя контур с током в магнитном поле?
2. Каковы свойства парамагнетиков, диамагнетиков, ферромагнетиков?
3. Какова причина спонтанной намагниченности доменов в ферромагнетиках?
4. Как ведут себя домены при увеличении напряженности внешнего магнитного поля? Что означает насыщение ферромагнетика?
5. В чем заключается явление магнитного гистерезиса?

## К лабораторной работе 2.04

### Изучение гистерезиса ферромагнитных материалов

Феррит М2000НМ1-Б (К31х18,5х7~)



Условное обозначение М2000НМ1-Б(К31х18,5х7 ~)

М - изделие из феррита

2000 - значение начальной магнитной проницаемости  
НМ – низкочастотный марганец-цинковый для слабых магнитных полей

Б - различие по свойствам

К31х18,5х7 Dхdхh (mm)    *Размеры кольца*

$$C1 = 0.22 \text{ мкФ} \pm 20 \%$$

$$R1 = 51 \text{ Ом} \pm 5 \%$$

$$R2 = 4.3 \text{ кОм} \pm 5 \%$$

$$N_1 = 100$$

$$N_2 = 200$$

$$K_x = 1 \text{ В/дел}$$

2.04

**Образец – ферромагнетик-сердечник кольцевой:**

**число витков первичной обмотки      100**

**число витков вторичной обмотки      100+100**