

Федеральное агентство по образованию  
Восточно-Сибирский государственный технологический университет  
Кафедра физики

Лабораторная работа № 4

**Исследование магнитных свойств ферромагнетика**

Составители: Санеев Э.Л.  
Манжуев В.М.  
Шагдаров В.Б.

Издательство ВСГТУ  
Улан-Удэ 2008

## 1. Теоретическое введение

Наличие среды вокруг проводника с током изменяет его магнитное поле. Это объясняется тем, что всякое вещество способно под действием магнитного поля создавать собственное магнитное поле, которое накладывается на поле тока и изменяет его. Обозначив индукцию магнитного поля тока  $\vec{B}_0$  (это поле часто называют внешним или намагничивающим), индукцию собственного поля вещества  $\vec{B}'$ , суммарное поле можно характеризовать величиной

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' . \quad (1)$$

Вещества, способные создавать собственное поле  $\vec{B}'$  (намагничиваться), называются магнетиками.

Намагничивание различных веществ объясняется наличием в их атомах и молекулах заряженных частиц (электронов, протонов), создающих при движении электрические токи (микротоки). При отсутствии внешнего поля магнитные моменты этих токов ориентированы произвольно, поэтому результирующий момент микротоков вещества и собственное поле  $\vec{B}'$  равны нулю.

Магнитным моментом контура с током принято называть величину

$$\vec{P}_m = iS\vec{n}$$

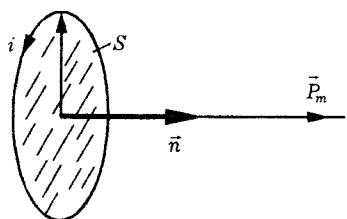


Рис. 1. Магнитный момент  $\vec{P}_m$  контура с током  $i$ .

где  $i$  — сила тока в контуре,  $S$  — площадь контура,  $\vec{n}$  — положительная нормаль к плоскости контура (рис. 1). Знак нормали определяется направлением тока в контуре по правилу правого винта. Индукция магнитного поля любого тока пропорциональна его магнитному моменту.

При помещении магнетика в поле магнитные моменты  $\vec{P}_m$  микротоков ориентируются по полю, в результате в магнетике создается результирующий момент и магнитная индукция  $\vec{B}'$ , т. е. магнетик намагничивается.

Степень намагничивания вещества характеризуют магнитным моментом единицы объема магнетика. Эту величину называют намагниченностью и обозначают  $\vec{J}$ . В случае однородного намагничивания среды объемом  $V$  вектор намагниченности

$$\vec{J} = \frac{1}{V} \sum_{m=1}^N \vec{p}_m ,$$

где  $\vec{p}_m$  — магнитный момент отдельной молекулы  $N$  — число молекул в объеме среды  $V$ .

Естественно полагать, что намагниченность  $\vec{J}$  зависит от свойств вещества и значения индукции намагничивающего поля  $\vec{B}_0$ . Эту зависимость во многих случаях можно считать линейной:

$$\vec{J} = \frac{\chi}{\mu_0} \vec{B}_0 , \quad (2)$$

где  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $\chi$  — безразмерная величина, которая характеризует способность вещества к намагничиванию и называется магнитной восприимчивостью. Естественно также полагать, что индукция собственного поля магнетика  $\vec{B}'$  определяется его намагниченностью. Легко показать, что в случае однородного намагничивания

$$\vec{B}' = \mu_0 \vec{J} . \quad (3)$$

Свойство магнетика изменять внешнее поле  $\vec{B}_0$  характеризуют также магнитной проницаемостью  $\mu$ , которая определяет магнитную индукцию результирующего поля  $\vec{B}$ :

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0. \quad (4)$$

Таким образом, при наличии магнетиков индукция магнитного поля тока  $\vec{B}_0$  изменяется в  $\mu$  раз. Это приводит к изменению густоты линий поля  $\vec{B}$  на границах различных сред и неоднородностях одной и той же среды, что создает неудобства при описании и изображении магнитных полей. В связи с этим вводят вспомогательную характеристику магнитного поля — напряженность  $\vec{H}$ :

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_0}. \quad (5)$$

Из (4) и (5) видно, что

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0}, \quad (6)$$

т. е. напряженность  $\vec{H}$  не зависит от свойств среды. Поле  $\vec{H}$  определяется только токами в проводниках (макроскопическими), создающими намагничивающее поле  $\vec{B}_0$ , поле  $\vec{B}$  — как макроскопическими, так и микроскопическими в магнетиках.

Из (1), (2) и (3) имеем

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{J} = \vec{B}_0 (1 + \chi). \quad (7)$$

Из (4) и (7) получим связь между введенными характеристиками магнитных свойств среды:

$$\mu = 1 + \chi \quad (8)$$

В зависимости от знака и значения величины магнитной восприимчивости  $\chi$  различают три типа магнетиков. Вещества с  $\chi > 0$  называются парамагнетиками, с  $\chi < 0$  — диамагнетиками, с  $\chi \gg 1$  — ферромагнетиками.

Как видно из (2), при  $\chi > 0$  (парамагнетики) намагниченность совпадает по направлению с внешним полем  $\vec{B}_0$ . В диамагнетиках ( $\chi < 0$ )  $\vec{J}$  направлен противоположно

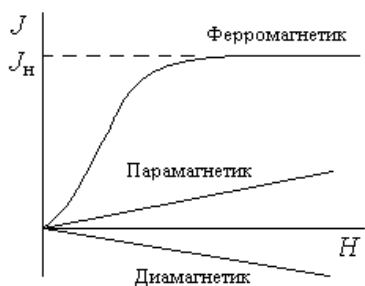


Рис.2. Зависимость намагниченности от величины напряженности внешнего магнитного поля

$\vec{B}_0$ . Парамагнетизм объясняется наличием магнитного момента у молекул этих веществ, обусловленного некомпенсированными микроточками. При помещении парамагнетика в магнитное поле магнитные моменты молекул приобретают некоторую ориентацию и возникает намагниченность  $\vec{J}$ . Из (2) и (6) находим, что намагниченность  $\vec{J} = \chi \vec{H}$ , т.е.  $\vec{J}$  прямо пропорциональна  $\vec{H}$  (рис. 2).

Значения  $\chi$  для парамагнетиков лежат в пределах от  $10^{-5}$  до  $10^{-3}$ . К ним относятся, например, кислород, алюминий, платина, щелочные и щелочноземельные металлы.

Молекулы диамагнетиков имеют скомпенсированные микроточки, их магнитные моменты равны нулю.

Намагничивание диамагнетиков обусловлено действием силы Лоренца — силы, действующей со стороны внешнего магнитного поля на движущиеся в молекуле заряды. Действие этой силы таково, что молекула диамагнетика приобретает магнитный момент, направленный противоположно внешнему полю  $\vec{H}$ . Эти «наведенные» силой Лоренца магнитные моменты молекул складываются и обуславливают намагниченность  $\vec{J}$ , пропорциональную напряженности внешнего поля  $\vec{H}$ , но противоположно ей направленную. Значение  $\chi$  для диамагнетиков составляет всего  $10^{-6}$ . К диамагнетикам

относятся инертные газы, многие металлы (цинк, медь, серебро, золото, ртуть), вода, стекло, мрамор и другие вещества.

Особое место среди магнетиков занимают ферромагнетики. Они отличаются следующими свойствами:

- а) аномально высоким значением  $\chi$ , а значит и  $\mu$  ( $10^3$  —  $10^5$ );
- б) нелинейной зависимостью  $J(H)$  (см. рис. 2);
- в) наличием температуры Кюри — температуры, при которой ферромагнетики превращаются в парамагнетики;
- г) существованием остаточной намагниченности и магнитного гистерезиса.

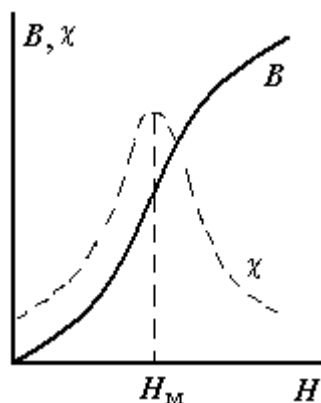


Рис.3. Зависимость индукции магнитного поля  $\vec{B}$  и магнитной восприимчивости  $\chi$  от напряженности внешнего поля

Нелинейность  $J(H)$ , а значит и  $B(H)$  в ферромагнетиках обусловлена тем, что в них  $\chi$  зависит от внешнего поля. Зависимость индукции магнитного поля  $\vec{B}$  и магнитной восприимчивости  $\chi$  от напряженности внешнего поля представлена на рис. 3. Видно, что при некотором значении  $H$  восприимчивость достигает максимального значения. При этом кривая  $B(H)$  имеет наибольшую крутизну. Такой вывод следует из выражений (2), (6) и (7), которые дают

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \chi \mu_0 \vec{H} . \quad (9)$$

Отсюда получаем, что  $B$  растет быстрее при тех значениях  $H$ , при которых  $\chi$  максимальна.

Приведенные свойства ферромагнетиков объясняются наличием в них малых областей самопроизвольной намагниченности — доменов. При отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты доменов ориентированы произвольно и результирующий магнитный момент магнетика равен нулю, т. е. ферромагнетик ненамагничен. Во внешнем поле магнитные моменты доменов начинают ориентироваться по полю. Возникает собственное магнитное поле ферромагнетика, которое резко увеличивается с ростом напряженности внешнего поля. При некотором значении  $H$  моменты доменов становятся параллельно полю, намагниченность  $J$  достигает насыщения (рис. 2). При этом небольшое возрастание  $B$  обусловлено лишь увеличением внешнего поля  $H$  (см. рис. 3).

Причины самопроизвольной намагниченности доменов в отсутствие внешнего поля связаны с проявлением обменных сил, имеющих квантовую природу и не рассматриваемых в курсе общей физики.

С ростом температуры и увеличением энергии теплового движения молекул самопроизвольная намагниченность отдельных областей может нарушиться, т. е. исчезнет доменная структура магнетика. В этих условиях ферромагнетик теряет все отличительные свойства и превращается в парамагнетик. Температура, при которой происходит этот переход, называется температурой Кюри. Для железа она равна  $780^\circ \text{C}$ , никеля —  $350^\circ \text{C}$ , кобальта —  $1150^\circ \text{C}$ . При охлаждении вещества ниже температуры Кюри в нем снова возникают домены, и оно становится ферромагнетиком.

Особый практический интерес вызывает свойство ферромагнетиков оставаться намагниченными после действия внешнего магнитного поля. Процесс намагничивания и размагничивания ферромагнетика внешним полем представлен на рис. 4 кривой  $B(H)$ . При увеличении напряженности внешнего поля  $H$  намагниченность ферромагнетика  $J$  и индукция результирующего поля  $B$  резко возрастают, достигая насыщения в некоторой точке А. При уменьшении  $H$  до нуля  $B$  не уменьшается до нуля. Остается некоторое значение  $B_{\text{ост}} = \mu_0 J_{\text{ост}}$  и при  $H = 0$ . Остаточная намагниченность  $J_{\text{ост}}$  обусловлена тем, что при  $H = 0$  магнитные моменты доменов не теряют полностью ориентацию. Энергии теплового движения при обычных температурах недостаточно для совершения работы по

полной дезориентировке доменов. Только значительным нагреванием намагниченного ферромагнетика можно «снять»  $B_{ост}$ . Размагнитить образец можно также, приложив внешнее поле противоположного направления  $H_k$ . Величина  $H_k$  называется коэрцитивной

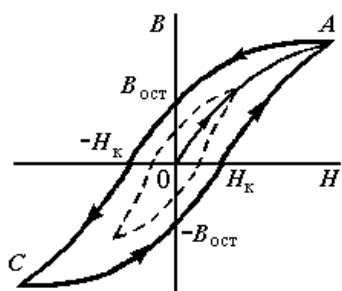


Рис.4. Процесс намагничивания и размагничивания ферромагнетика внешним полем

(задерживающей) силой. При дальнейшем увеличении поля  $H$ , противоположного первоначальному, намагниченность образца снова достигает насыщения (точка С). «Возвращая» поле  $H$  к нулю, а затем увеличивая до  $H_k$  (см. рис. 4) и более, получим замкнутую кривую, которую называют петлей гистерезиса. Если максимальные значения  $H$  таковы, что намагниченность достигает насыщения, получается максимальная петля гистерезиса. Если при амплитудных значениях  $H$  насыщение не достигается, получается петля, называемая частным циклом (пунктирная петля на рис. 4).

Коэрцитивная сила  $H_k$  характеризует свойство ферромагнетика сохранять намагниченность и, наряду с  $\mu$  и  $\chi$ , определяет его применимость для тех или иных практических целей. Большой  $H_k$  обладают углеродистые, вольфрамовые, хромовые, алюминий-никелевые и другие стали. Они имеют широкую петлю гистерезиса и называются «твердыми» магнитными материалами. Из них изготавливают постоянные магниты, трудно поддающиеся размагничиванию. «Мягкие» магнитные материалы (железо, сплавы железа с никелем и др.) идут на изготовление сердечников трансформаторов, использующихся, как известно, в цепях переменного тока. У этих материалов  $H_k$  сравнительно невелика, что обуславливает «легкое» перемагничивание.

При намагничивании ферромагнетика создается его собственное магнитное поле, обладающее определенной энергией. Эту энергию передает ферромагнетику намагничивающее поле, создаваемое внешним источником тока. Если ток переменный, то

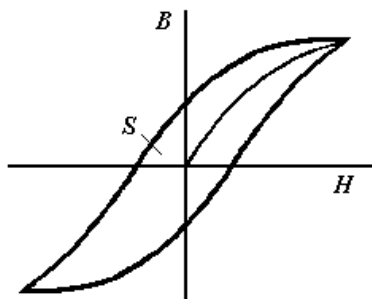


Рис.5. Петля гистерезиса.

процесс намагничивания чередуется с размагничиванием, когда энергия ферромагнетика возвращается к источнику. В процессе перемагничивания часть энергии теряется на работу по ориентации доменов (потери на гистерезис) и создание вихревых токов. Можно показать, что потери энергии на гистерезис за один цикл перемагничивания единицы объема ферромагнетика  $\Delta A$  численно равны площади петли гистерезиса  $S$  (рис. 5). Отсюда легко заключить, что малые потери на перемагничивание имеют «мягкие» магнитные материалы. Этим обусловлена экономическая целесообразность их применения в цепях переменного тока.

## 2. Вывод расчетных формул для определения магнитной индукции и напряженности магнитного поля ферромагнетика

Суть эксперимента заключается в независимом определении напряженности магнитного поля  $H$  в ферромагнетике с помощью закона полного тока и магнитной индукции  $B$  на основе использования закона электромагнитной индукции. В работе используется метод наблюдения семейства петель гистерезиса с помощью электронного осциллографа. Для этого на горизонтально отклоняющие пластины подается сигнал пропорциональный  $H$ , на вертикально отклоняющие пластины — сигнал пропорциональный  $B$ .

Исследуемый ферромагнетик представляет собой тонкое кольцо - тороид с намотанными на него двумя обмотками  $N_1$  и  $N_2$ . Когда по обмотке  $N_1$  течет ток, внутри

сердечника возникает магнитное поле. Если толщина тороида меньше его диаметра, величину напряженности магнитного поля можно считать постоянной по сечению тороида и равной напряженности в середине сечения.

По закону полного тока получим

$$H = \frac{N_1 \cdot I}{l} \quad (10)$$

где  $l$  - длина осевой (средней) линии тороида,  $I$ -сила тока в обмотке  $N_1$ .

Напряжение

$$U_x = IR_1$$

с резистора сопротивлением  $R_1$ , включенного в цепь обмотки  $N_1$  подается на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа. Измерив значение

$$U_x = a_x x,$$

где  $a_x$  - масштабный коэффициент отклонения по горизонтали,  $x$  - величина отклонения в делениях (рис. 6).

Определим ток  $I$  и подставим в формулу (10). В итоге получим

$$H = \frac{N_1 \alpha_x}{l R_1} x \quad (11)$$

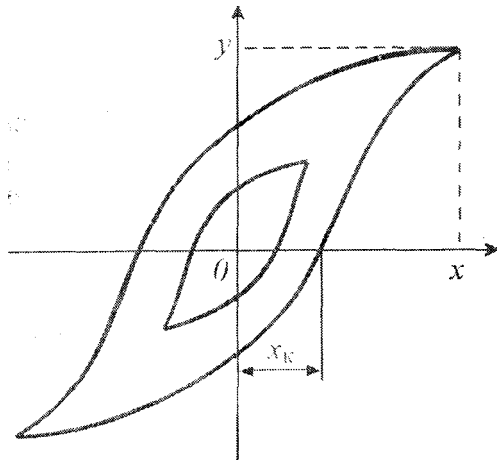


Рис. 6.

Для определения магнитной индукции в сердечнике наматывается еще одна обмотка с

числом витком  $N_2$ . При измерении магнитного потока в сердечнике в обмотке возникает Э.Д.С. индукции

$$E = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (12)$$

где  $S$  - площадь поперечного сечения сердечника.

Схема включения вторичной обмотки в измерительную цепь показана на рис.6.

Параметры схемы подобраны таким образом, что выполняется условие

$$I_2 R_2 \gg U_c$$

где  $I_2$  - ток в обмотке  $N_2$ ,  $U_c$  - напряжение на конденсаторе.

Пренебрегая падением напряжения на вторичной обмотке и напряжением на конденсаторе можно записать закон Ома в виде

$$E = I_2 R_2 \quad (13)$$

Учитывая, что  $I_2 = -dQ/dt$ , где  $Q$  заряд конденсатора из (12) и (13) получим

$$dB = \frac{R_2}{N_2 S} dQ$$

Проинтегрировав это выражение, получим

$$B = \frac{R_2}{N_2 S} Q$$

Так как

$$Q = U_c C = U_y C = a_y y C$$

окончательно найдем выражение для расчета магнитной индукции.

$$B = \frac{C R_2 \alpha_y}{N_2 S} y. \quad (14)$$

где  $a_y$  - масштабный коэффициент усилителя по вертикали,  $y$  - величина отклонения сигнала на экране осциллографа (рис. 6).

### 3. Устройство лабораторного модуля

Установка (Рис.7) состоит из генератора (рис. 7 а) прямоугольных импульсов, лабораторного модуля (рис. 7 б) и электронного осциллографа (ЭО) (рис. 7 в).

Лабораторный модуль состоит из кассеты, на лицевой панели которой приведена электрическая схема (рис. 7 б). Внутри кассеты размещается ферритовый сердечник с двумя обмотками, а также печатная плата, которая содержит элементную базу.

К гнездам «PQ» на лицевой панели (Г1, Г2 на рис.7 б) подключается генератор гармонических колебаний через разъем 5 (рис. 7 а).

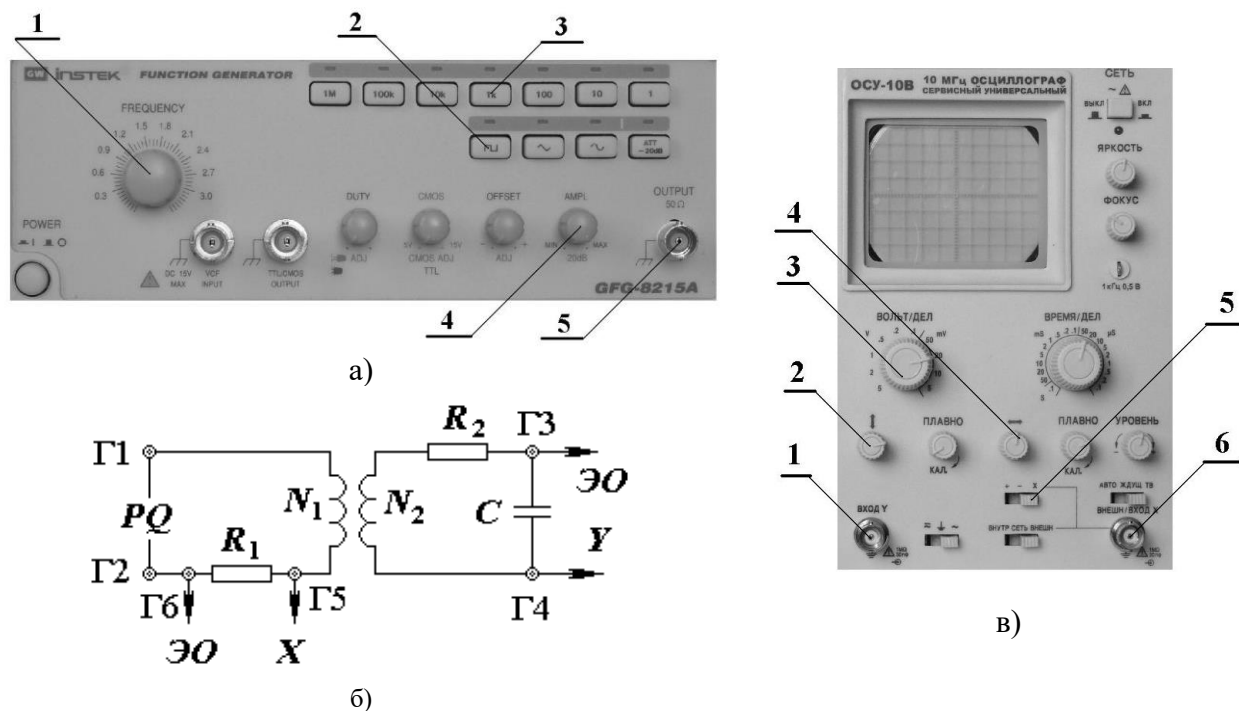


Рис. 7. Лабораторная установка.

а) генератор импульсов: 1 – регулятор частоты; 2 – кнопка включения прямоугольных сигналов; 3 – делитель диапазона частоты; 4 – регулятор изменения амплитуды выходного сигнала; 5 – основной выход сигнала.

б) схема лабораторного модуля.

в) осциллограф: 1 – вход Y; 2 – регулятор изображения осциллограммы по вертикали; 3 – усилитель вертикальной развертки; 4 - регулятор изображения осциллограммы по горизонтали; 5 – тумблер отключения усилителя горизонтальной развертки; 6 – вход X.

Сигнал с гнезд ЭО «Y» (Г3, Г4, рис. 7 б) подается на усилитель вертикальной развертки вход Y разъем 1 (рис. 7 в), а с гнезд ЭО «X» (Г5, Г6, рис. 7) снимается напряжение, которое пропорционально току в обмотке  $N_1$ , и подается на усилитель входа «X» (6, рис.7в) на горизонтально отклоняющие пластины, которые предварительно отключаются от усилителя горизонтальной развертки тумблером 5 (рис.7в).

# Лабораторная работа №15

## Исследование магнитных свойств ферромагнетика

### I. Цель работы:

- Изучить намагничивание ферромагнетиков.
- Построить по результатам опыта основную кривую намагничивания.
- Определить коэрцитивную силу, остаточную намагниченность.
- Оценить потери на перемагничивание образца.

### II. Приборы и принадлежности.

Лабораторная установка:

- лабораторный модуль \_\_\_\_\_ 1 шт.
- генератор гармонических колебаний (GFG 8215A) \_\_\_\_\_ 1 шт.
- осциллограф (ОСУ-10В) \_\_\_\_\_ 1 шт.
- приборная полка \_\_\_\_\_ 1 шт.

Параметры установки:

- сопротивление резисторов  $R_1 = 39 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 62,5 \text{ кОм}$ ;
- ёмкость конденсатора  $C = 0,094 \text{ мкФ}$ ;
- частота сигнала  $\nu = 2400 \text{ Гц}$ ;
- ферритовый сердечник М2000НМ  $S = (6 \times 6) \text{ мм}^2$ ,  $l = 80 \text{ мм}$ ,  $N_1 = 100$  витков,  $N_2 = 100$  витков.
- масштабный коэффициент усиления осциллографа по горизонтали  $\alpha_x = 0,3 \text{ В/дел.}$ , по вертикали  $\alpha_y = 40 \text{ В/дел.}$

### III. Основные расчетные формулы.

Напряженность магнитного поля:

$$H = \frac{N_1 \alpha_x}{l R_1} x, \quad (11)$$

где  $N_1$  – число витков в первичной обмотке,  $\alpha_x$  – масштабный коэффициент усиления осциллографа по горизонтали,  $l$  – длина осевой (средней) линии тороида,  $R_1$  – сопротивление резистора,  $x$  – величина отклонения сигнала на экране осциллографа по горизонтали в делениях.

Магнитная индукция:

$$B = \frac{C R_2 \alpha_y}{N_2 S} y, \quad (14)$$

где  $C$  – ёмкость конденсатора,  $R_2$  – сопротивление резистора,  $\alpha_y$  – масштабный коэффициент усилителя по вертикали,  $N_2$  – число витков вторичной обмотки,  $S$  – площадь поперечного сечения сердечника,  $y$  – величина отклонения сигнала на экране осциллографа.

Относительная магнитная проницаемость:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (15)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная вакуума.

Потери энергии  $\Delta A$  в единице объема ферромагнитного сердечника за один цикл перемагничивания:

$$\Delta A = \delta \cdot s, \quad (16)$$

где  $\delta$  – потеря энергии в Дж, соответствующую одной клетке ( $1 \times 1 \text{ см}^2$ ),  $s$  – площадь петли гистерезиса в  $\text{см}^2$ ,



#### IV. Подготовка модуля к работе.

1. Подсоединить к гнездам «PQ» на лицевой панели (рис. 7 б) генератор гармонических колебаний через основной выход 5 (рис.7 а).
2. Соединить гнезда ЭО «Y» (рис. 7 б) с разъемом усилителя 1 (рис. 7 в) осциллографа с помощью коаксиального кабеля.
3. Соединить гнезда ЭО «X» (рис. 7 б) с пластинами горизонтальной развертки «X» 6 (рис. 7 в), предварительно отключив генератор развертки.
4. Включить в сеть генератор и осциллограф и установить частоту генератора  $\nu = 2,4$  кГц. при помощи регулятора 1 и кнопки 3 (рис. 7 а)
5. При помощи кнопки 2 (рис. 7 а) установить прямоугольную форму сигнала генератора.
6. Вращением регулятора 4 (рис. 7 а) по часовой стрелке до упора установить максимальную величину выходного напряжения генератора.
7. Регуляторами перемещения осциллограммы по вертикали 2 и по горизонтали 4 (рис. 7 в) установить изображение петли гистерезиса в центре экрана осциллографа.
8. Регулируя усиление на оси у осциллографа установить предельную петлю гистерезиса, соответствующую магнитному насыщению образца, так, чтобы она помещалась на экране, при этом координата «X» вершины предельной петли гистерезиса должна составлять 5 делений (одно деление составляет одну клеточку)

#### V. Порядок проведения измерений.

1. Измерить координаты «X» и «Y» вершины предельной петли гистерезиса в делениях и занести в таблицу 1.
2. Уменьшая величину напряжения генератора, получить семейство петель гистерезиса (5 ÷ 10 петель). Для каждой петли определить координаты «X» и «Y» ее вершины. Данные занести в таблицу 1.

Таблица 1.

X	дел.										
Y	дел.										
H	A/м										
B	Тл										
$\mu$											

3. По предельной петле гистерезиса определить координату « $x_k$ », соответствующую коэрцитивной силе  $H_k$ . Данные занести в таблицу 2.

Таблица 2.

$x_k$	$\Delta x$	$H_k$	$\Delta H_k$	$\Delta H$	$\Delta B$	$\Delta \mu$
дел.	дел.	A/м	A/м	A/м	Тл	

#### VI. Обработка результатов измерений.

##### Снятие кривой намагничивания.

1. По формулам (11) и (14) рассчитать значения  $H$  и  $B$  и записать данные в таблицу 1.
2. Построить на миллиметровой бумаге график зависимости  $B = f(H)$ . При этом масштаб по осям  $H$  и  $B$  выбирается так, чтобы полученная кривая намагничивания помещалась в квадрате размерами примерно  $15 \times 15$  см<sup>2</sup>.
3. По формуле (15) рассчитать величину относительной магнитной проницаемости и результаты занести в таблицу 1.
4. Построить на миллиметровой бумаге график зависимости  $\mu = f(H)$ .
5. Для точки ( $B_{\max}$ ,  $H_{\max}$ ) предельной кривой намагничивания рассчитать

погрешности  $\Delta B$ ,  $\Delta H$ ,  $\Delta \mu$ , занести в таблицу 2, и записать результат в стандартном виде.

б. По измеренному значению  $X_k$  рассчитать по формуле (11) коэрцитивную силу  $H_k$  и определить ее погрешность  $\Delta H_k$ .

**Снятие петли гистерезиса и определение потерь энергии на перемагничивание.**

1. Получить на экране осциллографа изображение предельной петли гистерезиса, занимающее большую часть экрана. Записать координаты  $x$  и  $y$  вершин, а также координаты точек пересечения координатных осей с петлей гистерезиса и координаты нескольких промежуточных точек кривой, необходимых для уверенного построения петли на миллиметровой бумаге. Данные занести в таблицу 3.

Таблица 3.

$x$	Д										
ел.											
$y$	Д										
ел.											
$H$	$A$										
/м											
$B$	$T$										
л											

2. По формулам (11) и (14) рассчитать значения  $H$  и  $B$  и записать данные в таблицу.

3. По полученным данным в масштабе, принятом ранее, построить изображение петли гистерезиса на миллиметровой бумаге, как функцию  $B(H)$ .

4. Подсчитать число полных  $m$  и неполных  $n$  клеток, занимаемых петлей гистерезиса. Размер клетки взять  $1 \times 1 \text{ см}^2$ . Приблизительно площадь петли гистерезиса ( $\text{см}^2$ ):

$$s = m + \frac{n}{2}.$$

Эта площадь пропорциональна искомым потерям энергии.

4. Найти потерю энергии  $\delta$  в Дж, соответствующую одной клетке.

$$\delta = h \cdot b,$$

где  $h$  и  $b$ , выбранный масштаб, измеряемый в соответствующих единицах:  $[h] = (A/m)/\text{см}$ ;  $[b] = \text{Тл}/\text{см}$ .

5. Определить потери энергии  $\Delta A$  в единице объема ферромагнитного сердечника за один цикл перемагничивания по формуле (16).

6. Оценить потери энергии на перемагничивание сердечника за время вашей работы на установке.

**Контрольные вопросы.**

1. Какие величины характеризуют магнитные свойства вещества? Как они связаны между собой?

2. Поясните природу пара-, диа- и ферромагнетизма и характер зависимостей  $J$  от  $H$  для каждого из этих случаев.

3. Как можно размагнитить постоянный магнит?

4. Поясните процедуру расчета потерь энергии на перемагничивание сердечника.

5. Как уменьшить эти потери?

**Литература.**

1. Детлаф А.А., Яворский Б.М., Курс физики, М.: Высшая школа, 2000.

2. Епифанов Г.И., Физика твердого тела, М.: Высшая школа, 1977.

3. Гуревич А.Г., Ферриты на сверхвысоких частотах, М.: Физматгиз, 1960.

4. Борисенко В.Е., Дерябин В.М. и др., Лабораторный практикум по физике,

Тюмень: Изд-во ТГУ, 2002.