

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ

ОТЧЕТ

ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ № 11

«ИССЛЕДОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ »

ВЫПОЛНИЛ: МАЦЯС С.И.  
ГРУППА: 0113  
ФАКУЛЬТЕТ: ФРТ

Санкт-Петербург  
2001

**Цель работы:** изучение магнитного поля в веществе на примере исследования динамической петли магнитного гистерезиса ферромагнетика; определение основных характеристик ферромагнетика.

**Приборы и принадлежности:** тороидальный трансформатор, измерительная цепь с осциллографом.

*Общие сведения.* Все вещества являются магнетиками, т.е. способны приобретать во внешнем магнитном поле магнитный момент — намагничиваться.

Намагниченность вещества характеризуется магнитным моментом его единицы объема, называемым вектором намагниченности или просто намагниченностью

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

где  $\sum_{i=1}^N \vec{p}_{mi}$  — векторная сумма магнитных моментов атомов (молекул) в физически малом объеме  $\Delta V$ .

Намагниченность характеризует собственное (внутреннее) поле вещества и связана с напряженностью магнитного поля соотношением

$$J = \chi H,$$

где  $\chi$  — характерная для данного магнетика величина, называемая магнитной восприимчивостью.

Основная же (силовая) характеристика магнитного поля — индукция  $B$  — связана с намагниченностью  $J$  и напряженностью  $H$  магнитного поля в веществе соотношением

$$B = \mu_0 H + \mu_0 J = \mu \mu_0 H, \quad (1)$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$  — магнитная постоянная;  $\mu = 1 + \chi$  — относительная магнитная проницаемость вещества.

Все магнетики подразделяются на три группы:

1. Диамагнетики — вещества, у которых магнитные моменты каждого атома (молекулы) в отсутствие внешнего магнитного поля равны нулю. Только во внешнем магнитном поле у таких веществ появляется наведенный магнитный момент, направленный против внешнего поля. Поэтому у диамагнетиков  $\chi < 0$ . Само значение  $\chi$  невелико:  $|\chi| = 10^{-6} - 10^{-5}$ .

2. Парамагнетики — вещества, у которых магнитные моменты атомов (молекул) в отсутствие внешнего магнитного поля отличны от нуля, но их векторная сумма равна нулю, так как различны направления магнитных моментов (главным образом из-за хаотического теплового движения атомов и молекул). Магнитные моменты атомов парамагнетиков во внешнем магнитном поле ориентируются по полю, поэтому у парамагнетиков  $\chi > 0$  и имеет значение  $\chi = 10^{-5} - 10^{-2}$ .

3. Ферромагнетики — вещества, способные обладать намагниченностью в отсутствие внешнего магнитного поля. Внутреннее магнитное поле в сотни и тысячи раз превышает вызвавшее его внешнее поле. Величина  $\chi > 0$  и достигает значения  $\chi = 10^2 - 10^6$ . Для ферромагнетиков характерна нелинейная зависимость между индукцией  $B$  и напряженностью  $H$  магнитного поля, так как в этих веществах магнитная восприимчивость  $\chi$ , а следовательно, и магнитная проницаемость  $\mu$  зависят от  $H$ .

Зависимость магнитной индукции  $B$  в ферромагнетике от напряженности  $H$  периодически изменяющегося со временем внешнего магнитного поля отображается замкнутой кривой (рис. 6.1), называемой динамической петлей магнитного гистерезиса. Участок 1—2—3 соответствует кривой намагничивания ферромагнетика, намагниченность которого первоначально была равна нулю. Эта кривая называется основной или нулевой кривой намагничивания.

Форма и площадь петли зависят от скорости изменения  $H$ : чем выше частота намагничивающего поля, тем больше потери энергии на перемагничивание и сильнее отставание

намагниченности  $J$  и индукции  $B$  от их статического значения при данной величине  $H$  (магнитная вязкость).

При уменьшении напряженности внешнего поля до нуля намагниченность не исчезает и характеризуется величиной  $J_r$ , называемой остаточной намагниченностью.

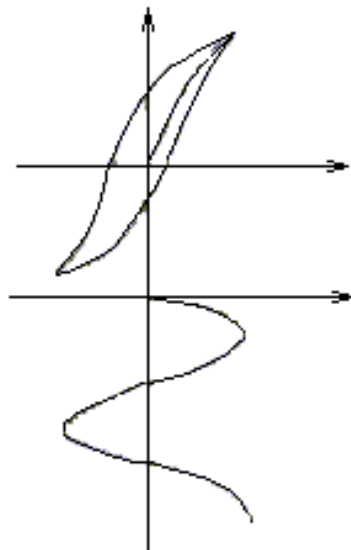


Рис. 6.1

Значение индукции  $B_r$ , сохраняющееся при этом у ферромагнетика (рис. 6.1), называется остаточной индукцией. Наличие  $B_r$  у магнетика является основой для создания магнитов.

Индукция  $B_r$  обращается в нуль лишь под действием поля  $H_c$ , имеющего направление, противоположное полю, вызвавшему намагничивание. Напряженность  $H_c$  называется коэрцитивной силой. Большой коэрцитивной силой обладают «твердые» магнитные материалы, имеющие широкую петлю гистерезиса.

*Методика эксперимента.* В работе изучается гистерезис ферромагнетика при намагничивании в переменном магнитном поле частотой 50 Гц и определяются остаточные индукция  $B_r$  и намагниченность  $J_r$ , коэрцитивная сила  $H_c$ , максимальное значение магнитной проницаемости  $\mu_{\max}$ , потери энергии при перемагничивании ферромагнетика.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 6.2. На кольцевом сердечнике, выполненном из ферромагнетика, имеющем площадь сечения  $S$  и длину средней линии  $l$ , размещены две катушки — возбуждающая и индикаторная с числом витков  $N_1$  и  $N_2$ , соответственно.

Петля гистерезиса наблюдается на экране осциллографа. На  $X$ - ВХОД осциллографа подают напряжение  $u_x = i_1 R_2$ , пропорциональное току  $i_1$ , т. е. напряженности  $H = \frac{N_1 i_1}{l}$  внутри возбуждающей катушки

$$u_x = \frac{l R_2}{N_1} H \quad (2)$$

Переменное магнитное поле является источником переменного потока магнитной индукции  $\Phi$ , пронизывающего витки индикаторной катушки.

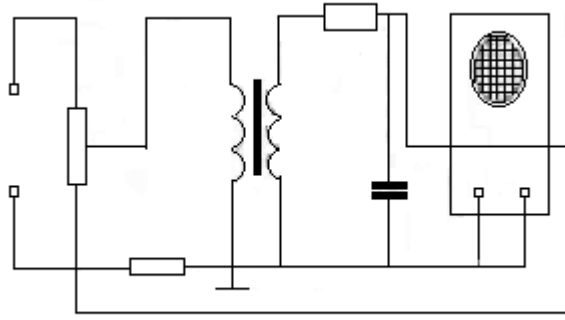


Рис. 6.2

В результате в индикаторной катушке возникает ЭДС индукции  $E_i = - \frac{N_2 d\Phi}{dt} = - \frac{N_2 S dB}{dt}$ , вызывающая ток  $i_2 = \frac{E_i}{R3}$  (здесь пренебрегают индуктивным сопротивлением катушки и емкостным сопротивлением конденсатора  $C1$ , малыми по сравнению с сопротивлением  $R3$ ). Этот ток создает на конденсаторе  $C1$  емкостью  $C$  напряжение

$$U_c = \frac{1}{C} \int i_2 dt = - \frac{N_2 S}{R3C} B, \quad (3)$$

которое подается на у - вход осциллографа.

Таким образом, на х - входе осциллографа действует напряжение, пропорциональное напряженности  $H$ , а на у - входе — индукции  $B$  магнитного поля, и на экране осциллографа наблюдается кривая, воспроизводящая в некотором масштабе петлю гистерезиса.

Характеристики ферромагнетика определяются по изображению петли гистерезиса на экране осциллографа и значениям цены делений экрана  $\left[ \frac{H}{x} \right]$  и  $\left[ \frac{B}{y} \right]$ , выраженным в единицах напряженности  $\left( \frac{A/m}{дел} \right)$  и индукции  $\left( \frac{Tл}{дел} \right)$  магнитного поля, соответственно. Значения  $\left[ \frac{H}{x} \right]$  и  $\left[ \frac{B}{y} \right]$ , согласно выражениям (2) и (3), равны

$$\left[ \frac{H}{x} \right] = \frac{N_1}{lR2} \left[ \frac{U}{x} \right],$$

$$\left[ \frac{B}{y} \right] = \frac{CR3}{N_2 S} \left[ \frac{U}{y} \right]$$

и рассчитываются после определения цены делений экрана в единицах напряжения  $\left[ \frac{B}{дел} \right]$   $\left[ \frac{U}{x} \right]$  и  $\left[ \frac{U}{y} \right]$ . Умножением масштабных множителей  $\left[ \frac{H}{x} \right]$  и  $\left[ \frac{B}{y} \right]$  на соответствующие размеры, измеренные по изображению петли гистерезиса, определяют значения  $H_m, B_m, B_r, H_c$ . Величину  $J_r$  рассчитывают из соотношения (1) подстановкой в него значений  $B = B_r$  и  $H = 0$ .

Максимальное значение магнитной проницаемости определяется по графику зависимости  $\mu(H)$ . В связи с неоднозначностью зависимости  $B(H)$  в ферромагнетике понятие магнитной проницаемости применяется лишь к основной кривой намагничивания. Согласно (1) величина  $\mu$  равна

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H},$$

где  $B$  — значение индукции, определяемое по основной кривой намагничивания при заданной величине  $H$ .

Потери энергии в единице объема ферромагнетика за цикл перемагничивания равны площади петли гистерезиса (в единицах  $B \cdot H$ ); ее можно определить с помощью планиметра или прямым подсчетом площади (по клеткам) с умножением на соответствующие масштабные коэффициенты.

#### *Указания по выполнению наблюдений и обработке результатов*

1. Собрать схему и включить установку.
2. Потенциометр R1 вывести в крайнее левое положение и включить осциллограф.
3. Измерить координаты положения луча  $(x_0, y_0)$  в делениях сетки экрана осциллографа. Отличные от нуля значения  $(x_0, y_0)$  должны учитываться как систематические погрешности при расчетах по пп. 7 и 8.
4. При полностью введенном потенциометре R1 перенести на кальку изображение петли гистерезиса, отметив оси координат.
5. Определить значения масштабных множителей  $\left[\frac{U}{x}\right]$  и  $\left[\frac{U}{y}\right]$  (см указания на панели установки) и рассчитать значения  $\left[\frac{H}{x}\right]$  и  $\left[\frac{B}{y}\right]$ .
6. Уменьшая с помощью потенциометра R1 ток через возбуждающую обмотку до нуля, последовательно получить на экране осциллографа петли гистерезиса при различных  $H_m$  (8...10 значений). Измерить для каждой из них координаты вершины  $(x_{mi}, y_{mi})$ .
7. Рассчитать значения  $(H_{mi}, B_{mi})$ , соответствующие  $(x_{mi}, y_{mi})$ , и построить основную кривую намагничивания.
8. По наибольшей петле гистерезиса и значениям  $\left[\frac{H}{x}\right]$  и  $\left[\frac{B}{y}\right]$  определить остаточные индукцию  $B_r$  и намагниченность  $J_r$ , коэрцитивную силу  $H_c$ , потери энергии в единице объема магнетика за один цикл перемагничивания.
9. Рассчитать значения и построить график зависимости  $\mu(H)$ . Определить максимальное значение магнитной проницаемости  $\mu_{\max}$ .

## Обработка результатов

$$1. \left[ \frac{H}{x} \right] = \frac{N_1}{eR2} \left[ \frac{U}{x} \right] = \frac{495}{9,8 \cdot 10^{-2} \cdot 120} \cdot 0,9 = 38 \frac{A}{\partial \text{ел}}$$

$$\left[ \frac{B}{y} \right] = \frac{CR3}{N_2 \cdot S} \left[ \frac{U}{x} \right] = \frac{0,3 \cdot 10^{-6} \cdot 200 \cdot 10^3}{90 \cdot 1,17 \cdot 10^{-4}} = 1 \frac{Tл}{\partial \text{ел}}$$

2.

$$i=1 \quad \begin{aligned} H_{m1} &= \left[ \frac{H}{x} \right] \cdot X_{m1} = 0 \\ B_{m1} &= \left[ \frac{B}{y} \right] \cdot y_{m1} = 0 \end{aligned} \quad \begin{aligned} i=2 \quad H_{m2} &= \left[ \frac{H}{x} \right] \cdot X_{m2} = 38 \frac{A}{M} \\ B_{m2} &= \left[ \frac{B}{y} \right] \cdot y_{m2} = 0,4 Tл \end{aligned}$$

$$i=3 \quad \begin{aligned} H_{m3} &= \left[ \frac{H}{x} \right] \cdot X_{m3} = 53 \frac{A}{M} \\ B_{m3} &= \left[ \frac{B}{y} \right] \cdot y_{m3} = 0,6 Tл \end{aligned} \quad \begin{aligned} i=4 \quad H_{m4} &= \left[ \frac{H}{x} \right] \cdot X_{m4} = 76 \frac{A}{M} \\ B_{m4} &= \left[ \frac{B}{y} \right] \cdot y_{m4} = 1 Tл \end{aligned}$$

$$i=5 \quad \begin{aligned} H_{m5} &= \left[ \frac{H}{x} \right] \cdot X_{m5} = 83 \frac{A}{M} \\ B_{m5} &= \left[ \frac{B}{y} \right] \cdot y_{m5} = 1,2 Tл \end{aligned} \quad \begin{aligned} i=6 \quad H_{m6} &= \left[ \frac{H}{x} \right] \cdot X_{m6} = 101 \frac{A}{M} \\ B_{m6} &= \left[ \frac{B}{y} \right] \cdot y_{m6} = 1,4 Tл \end{aligned}$$

$$i=7 \quad \begin{aligned} H_{m7} &= \left[ \frac{H}{x} \right] \cdot X_{m7} = 107 \frac{A}{M} \\ B_{m7} &= \left[ \frac{B}{y} \right] \cdot y_{m7} = 1,6 Tл \end{aligned} \quad \begin{aligned} i=8 \quad H_{m8} &= \left[ \frac{H}{x} \right] \cdot X_{m8} = 114 \frac{A}{M} \\ B_{m8} &= \left[ \frac{B}{y} \right] \cdot y_{m8} = 1,8 Tл \end{aligned}$$

$$i=9 \quad \begin{aligned} H_{m9} &= \left[ \frac{H}{x} \right] \cdot X_{m9} = 152 \frac{A}{M} \\ B_{m9} &= \left[ \frac{B}{y} \right] \cdot y_{m9} = 2 Tл \end{aligned}$$

3.

$$B_r = 0,2 * 1 = 0,2 Tл$$

$$H_C = 0,4 * 38 = 15 \frac{A}{M}$$

$$Q = 0,9 * 0,2 * 3 = 0,5 \frac{Tл \cdot A}{M}$$

4.

Т.к.  $\mu_{mi} = \frac{B_{mi}}{\mu_0 H_{mi}}$ , тогда

$$\mu_{m2} = 8377; \mu_{m3} = 8754; \mu_{m4} = 10471; \mu_{m5} = 11423; \mu_{m6} = 10324; \mu_{m7} = 9862; \mu_{m8} = 9683;$$

$$\mu_{m9} = 9421;$$

**Вывод:** в ходе этой лабораторной работы мы изучили магнитное поле в веществе на примере исследования динамической петли магнитного гистерезиса ферромагнетика, получили графическое представление петли гистерезиса и определили основные характеристики ферромагнетика: остаточную индукцию  $B_r = 0,2 \cdot 1 = 0,2 \text{ Тл}$ , намагниченность  $J_r = 1,5 \cdot 10^5 \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{Гн}}$ , коэрцитивную силу  $H_C = 0,4 \cdot 38 = 15 \frac{\text{А}}{\text{м}}$ , потери энергии в единице объема магнетика за один цикл перемагничивания  $Q = 0,9 \cdot 0,2 \cdot 3 = 0,5 \frac{\text{Тл} \cdot \text{А}}{\text{м}}$ . Построили график зависимости  $\mu(H)$ , основную кривую намагничивания, определили максимальное значение магнитной проницаемости  $\mu_{\text{max}} = 10500$ .



## Протокол наблюдений

I	1	2	3	4	5	6	7	8
$x_{mi}$								
$y_{mi}$								
$H_{mi}$								
$B_{mi}$								
$\mu_{mi}$								

$$\nu = 50 \Gamma y$$

$$S =$$

$$l =$$

$$N_1 =$$

$$N_2 =$$

$$C =$$

$$R_2 =$$

$$R_3 =$$

$$B_r =$$

$$J_r =$$

$$H_c =$$

$$\mu_{\max} =$$

$$Q =$$

$$\left[ \frac{U}{x} \right] =$$

$$\left[ \frac{U}{y} \right] =$$

$$\left[ \frac{H}{x} \right] =$$

$$\left[ \frac{B}{y} \right] =$$

Выполнил: Мацяс, 0113

19.02.01

Проверил: Осипов