

## РАБОТА 17

### ИССЛЕДОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

**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, то есть способны приобретать во внешнем магнитном поле магнитный момент – намагничиваться. Намагниченность вещества характеризуется магнитным моментом его единицы объема, называемым вектором намагниченности или просто намагниченностью

$$\mathbf{j} = (\Delta V)^{-1} \sum_{i=1}^N \mathbf{p}_{mi},$$

здесь  $\sum_{i=1}^N \mathbf{p}_{mi}$  – 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

$$\mathbf{J} = \kappa \mathbf{H},$$

где  $\kappa$  – характерная для данного магнетика величина, называемая магнитной восприимчивостью.

Основная же характеристика магнитного поля – индукция  $\mathbf{B}$  – связана с намагниченностью  $\mathbf{J}$  и напряженностью  $\mathbf{H}$  магнитного поля в веществе соотношением

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

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $\mu = 1 + \kappa$  – 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  $\kappa < 0$ . Само значение  $\kappa$  невелико:  $|\kappa| = 10^{-6} - 10^{-5}$ .

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  $\kappa > 0$  и имеет значение  $10^{-5} - 10^{-2}$ .

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  $\kappa$  при этом положительна и достигает значений  $10^2 - 10^6$ . Для ферромагнетиков характерна нелинейная зависимость между индукцией  $B$  и напряженностью  $H$  магнитного поля, так как в этих веществах магнитная восприимчивость  $\kappa$ , 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.11.1), 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.

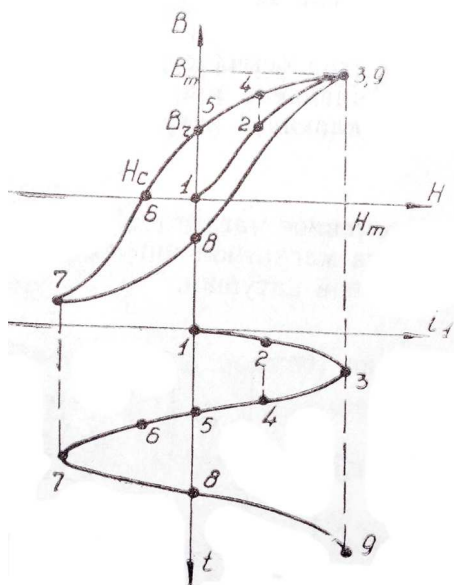


Рис.11.1

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. Значение индукции  $B_r$ , сохраняющееся при этом у ферромагнетика (рис.11.1), 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 намагничение. 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.11.2. 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.

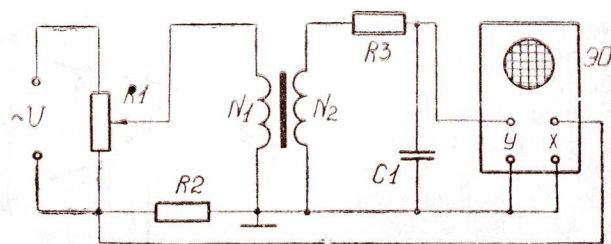


Рис.11.2

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  $H = N_1 i_1 / l$  внутри возбуждающей катушки:

$$u_x = (I \cdot R_2 / N_1) H \quad (2)$$

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

В результате в индикаторной катушке возникает ЭДС индукции  $E_i = -N_2 d\Phi/dt = -N_2 S dB/dt$ , вызывающая ток  $i_2 = E_i / R_3$  (здесь пренебрегают индуктивным сопротивлением катушки и емкостным сопротивлением конденсатора  $C_1$ , малыми по сравнению с сопротивлением  $R_3$ ). Этот ток создает на конденсаторе  $C_1$  емкостью  $C$  напряжение

$$U_c = C^{-1} \int i_2 dt = -N_2 S B / (CR_3), \quad (3)$$

которое подается на  $y$ -вход осциллографа.

Таким образом, на  $x$ -входе осциллографа действует напряжение, пропорциональное напряженности  $H$ , а на  $y$ -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  $[H/x]$  и  $[B/y]$ , выраженным в единицах напряженности ((А/м)/дел) и индукции (Тл/дел) магнитного поля, соответственно. Значения  $[H/x]$  и  $[B/y]$ , согласно выражениям (2) и (3), равны

$$\begin{aligned} [H/x] &= [N_1 / (I \cdot R_2)] [U/x] \\ [B/y] &= [CR_3 / (N_2 S)] [U/y] \end{aligned}$$

и рассчитываются после определения цены делений экрана в единицах напряжения (В/дел)  $[U/x]$  и  $[U/y]$ . Умножением масштабных множителей  $[H/x]$  и  $[B/y]$  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

$$\mu = B / (\mu_0 H),$$

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  $BH$ ); 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  $R_1$  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  $R_1$  перенести на кальку изображение петли гистерезиса, отметив оси координат.
5. Определить значения масштабных множителей  $[U/x]$  и  $[U/y]$  (см. указания на панели установки) и рассчитать значения  $[H/x]$  и  $[B/y]$ .
6. Уменьшая с помощью потенциометра  $R_1$  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 намагничения.

8. По наибольшей петле гистерезиса и значениям  $[H/x]$  и  $[B/y]$  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  $\mu_{max}$ .

### *Литература*

Савельев И. В. Курс общей физики.—М.- Наука, 1982.—Т. 2, §§ 59, 68.

Лабораторный практикум по физике: Учеб. пособие для студентов вузов/Б. Ф. Алексеев, К. А. Барсуков, И. А. Войцеховская и др.; Под ред. К. А. Барсукова и Ю. И. Уханова.—М.: Высш. шк., 1988.