

**Государственное образовательное учреждение  
Московский государственный технологический университет  
«СТАНКИН»**

**Кафедра физики**

**Лабораторная работа**

**«Изучение магнитных свойств ферромагнетиков»**

$\vec{B}(\vec{H}) = \mu_0 \vec{H} + \mu_0 \vec{I}(H) = \mu_0 \mu(H) \vec{H}$  для изотропного ферромагнетика, где  $\vec{B}$  - вектор магнитной индукции,  $\vec{H}$  - вектор магнитной напряженности,  $\vec{I}$  - намагниченность (магнитный момент единицы объема вещества),  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$  - магнитная постоянная, определение остаточной магнитной индукции  $B_1$ , коэрцитивной силы  $H_1$ , а также оценка относительной величины потерь на перемагничивание за один цикл.

### Введение

Ферромагнетиками называются вещества, которые при температуре, меньшей температуры Кюри, могут спонтанно (самопроизвольно) намагничиваться, т. е. приобретать отличную от нуля намагниченность  $\vec{I}$ . При этом относительная магнитная проницаемость  $\mu$  ферромагнетика зависит от напряженности магнитного поля  $H$  и предыстории образца. Благодаря большой величине намагниченности  $\vec{I}$  относительная магнитная проницаемость  $\mu$  может принимать значения порядка  $10^4$ .

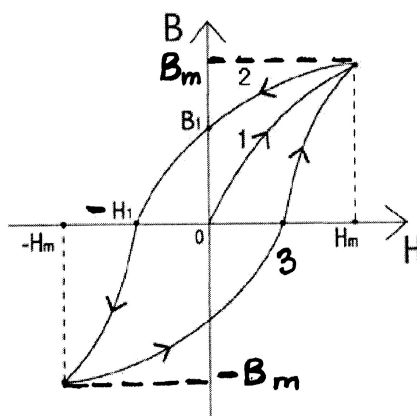


Рис. 1.

При циклическом изменении во времени напряженности внешнего магнитного поля от  $-H_m$  до  $H_m$  зависимость  $B(H)$  имеет неоднозначный гистерезисный характер (рис. 1). Если до включения внешнего магнитного поля ферромагнетик не был намагничен ( $I = 0$ ), то при увеличении внешнего магнитного поля от 0 до  $H_m$  его намагничивание будет происходить по кривой 1. Если затем уменьшать напряженность магнитного поля от  $H_m$  до  $-H_m$ , то изменение магнитной индукции описывается кривой 2. Магнитную индукцию  $B_1$  при  $H = 0$  называют *остаточной*. Для устранения остаточной магнитной индукции необходимо приложить магнитное поле, напряженность которого равна  $H_1$ , а направление противоположно направлению напряженности намагничивающего поля. Величина  $H_1$  называется *коэрцитивной силой*. При увеличении напряженности магнитного поля от  $-H_m$  до  $H_m$  изменение магнитной индукции описывается кривой 3. Для следующего цикла намагничивания ( $-H_m \rightarrow 0 \rightarrow H_m \rightarrow 0$

→  $-H_m$ ) изменение магнитной индукции соответствует петле гистерезиса в виде замкнутой кривой 32.

Сложный характер кривой намагничивания ферромагнетика определяется поведением его доменной структуры. Домен – небольшая область ферромагнетика со спонтанной намагниченностью. Ориентация намагниченности различных доменов различна, поэтому намагниченность единицы объема ферромагнетика равна 0, если только он предварительно не был намагничен. В процессе намагничивания изменяются как размеры, так и ориентация доменов, что и объясняет сложный характер кривой намагничивания. При очень больших внешних полях наступает насыщение, где величина намагниченности  $I = I_s = \text{const}$ .

### **1. Физические основы измерений характеристик кривой намагничивания с помощью осциллографа**

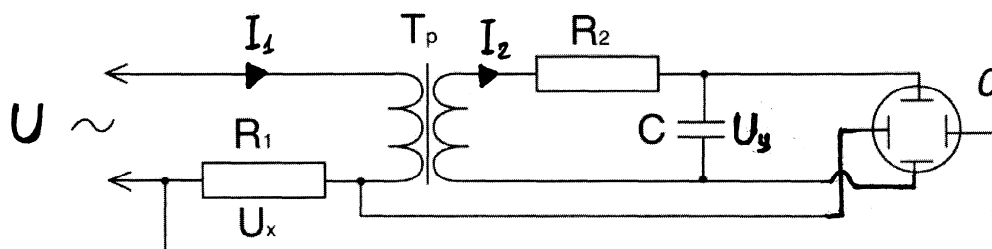


Рис. 2.

Принципиальная схема установки приведена на рис. 2. На первичную обмотку трансформатора  $T_p$  с тороидальным сердечником из исследуемого ферромагнетика подается переменное напряжение  $U$ . С резистора сопротивлением  $R_1$ , включенного последовательно с первичной обмоткой трансформатора, снимается напряжение

$$U_x = I_1 R_1, \quad (1)$$

которое подается на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа  $O$ .

Во вторичной обмотке трансформатора возбуждается ЭДС индукции, пропорциональная скорости изменения магнитного потока в ферромагнитном сердечнике. Эта ЭДС создает переменный ток  $I_2$  во вторичной обмотке, который заряжает конденсатор емкости  $C$ . Напряжение  $U_y$ , снимаемое с конденсатора, подается на вертикально отклоняющие пластины осциллографа  $O$ .

Покажем, что напряжение  $U_x \sim H$ , а напряжение  $U_y \sim B$ , т. е. на экране осциллографа должна наблюдаться кривая намагничивания  $B(H)$  для ферромагнитного материала сердечника.

Согласно теореме о циркуляции вектора напряженности магнитного поля  $\vec{H}$ , примененной к средней линии тороидального сердечника,

$$2\pi r_T H = N_1 I_1, \quad (2)$$

где  $r_T$  – радиус окружности, соответствующей средней линии сердечника,  $N_1$  – число витков первичной обмотки трансформатора,  $I_1$  – ток в первичной обмотке, возбуждаемый внешним напряжением  $U$ . Таким образом, напряжение на резисторе

$$U_x = I_1 R_1 = \frac{2\pi r_T R_1}{N_1} H \quad (3)$$

пропорционально напряженности магнитного поля. Связь между горизонтальным отклонением  $x$  луча на экране осциллографа и напряжением  $U_x$  определяется соотношением

$$U_x = k_1 x, \quad (4)$$

где  $k_1$  – коэффициент отклонения, поэтому

$$H = \frac{N_1}{2\pi r_T R_1} k_1 x. \quad (5)$$

Согласно основному закону электромагнитной индукции ЭДС, во вторичной обмотке

$$\mathcal{E} = -N_2 S \frac{dB}{dt}, \quad (6)$$

где  $N_2$  – число витков вторичной обмотки трансформатора,  $S$  – площадь поперечного сечения ферромагнитного сердечника. Если параметры цепи вторичной обмотки подобраны таким образом, что выполняются условия

$$I_2 R_2 \gg \left| L_2 \frac{dI_2}{dt} \right|, \quad U_C = \frac{q}{C}, \quad (7)$$

где  $I_2$  – ток, возбуждаемый во вторичной обмотке,  $L_2$  – индуктивность вторичной обмотки,  $U_C$  – напряжение на конденсаторе емкости  $C$ ,  $q$  – заряд на конденсаторе, то справедливо приближенное соотношение между током  $I_2$  и ЭДС  $\mathcal{E}$ , вытекающее из закона Ома,

$$I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2} = -\frac{N_2 S}{R_2} \frac{dB}{dt}. \quad (8)$$

Тогда напряжение  $U_C$ , подаваемое на вертикально отклоняющие пластины осциллографа, определяется формулой

$$U_C = U_y = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t I_2 dt = -\frac{N_2 S}{CR_2} B. \quad (9)$$

Связь между вертикальным отклонением  $y$  луча на экране осциллографа и напряжением  $U_y$  имеет вид

$$U_y = k_2 y, \quad (10)$$

поэтому с точностью до знака, который не имеет принципиального значения при гармоническом изменении напряжения,

$$B = \frac{CR_2}{N_2 S} k_2 y. \quad (11)$$

Из выражений (4) и (10) следует, что физические процессы, протекающие в рассмотренной установке, позволяют преобразовать напряженность магнитного поля в горизонтальное смещение луча на экране осциллографа, а магнитную индукцию в вертикальное смещение этого луча. В результате на экране осциллографа наблюдается кривая намагничивания материала сердечника трансформатора.

Работа по перемагничиванию сердечника за один цикл

$$A_1 = \oint \vec{H} d\vec{B} = \frac{N_1 N_2 S \cdot k_1 \cdot k_2}{2\pi R_1 R_2 C r_T} \oint x dy = K \cdot S_{п.г.}, \quad (12)$$

где  $K = \frac{N_1 N_2 S \cdot k_1 \cdot k_2}{2\pi r_T R_1 R_2 C}$  определяется параметрами установки,  $S_{п.г.} = \oint x dy$  - площадь петли гистерезиса в делениях горизонтальной и вертикальной шкал осциллографа. Плотность энергии магнитного поля в ферромагнетике при его максимальном намагничивании (рис. 1)

$$W_M = \frac{1}{2} H_m B_m = \frac{1}{2} K x_m \cdot y_m, \quad (13)$$

поэтому относительную величину потерь энергии на перемагничивание ферромагнетика за один цикл можно записать следующим образом

$$\gamma = \frac{A_1}{W_M} = 2 \frac{S_{п.г.}}{x_m y_m}. \quad (14)$$

Здесь  $x_m$  и  $y_m$  - координаты вершины петли гистерезиса на экране осциллографа, измеренные в делениях горизонтальной и вертикальной шкал осциллографа.

## **2. Описание лабораторной установки**

Установка состоит из генератора сигналов ГЗ – 112, осциллографа О и кассеты ФПЭ – 07, содержащей трансформатор с ферромагнитным сердечником. Генератор вырабатывает синусоидальное напряжение, которое подается на первичную обмотку трансформатора. Сила тока в цепи первичной обмотки, определяющая величину напряженности магнитного поля регулируется с помощью выходного напряжения генератора.

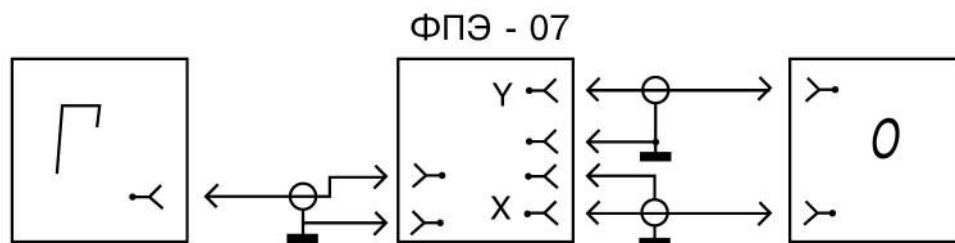


Рис. 3.

Лабораторная установка имеет следующие параметры:

1.  $r_1 = 8$  мм – внутренний радиус тороида;
2.  $r_2 = 14$  мм – внешний радиус тороида;
3.  $h = 9$  мм – толщина тороида;

4.  $R1 = 100 \text{ Ом} \pm 10 \%$ ;
5.  $R2 = 24 \text{ кОм} \pm 10 \%$ ;
6.  $C1 = 470 \text{ нФ} \pm 10 \%$ ;
7.  $N1 = 100 \text{ витков}$ ;
8.  $N2 = 200 \text{ витков}$ .

### Проведение измерений

#### 1. Определение зависимости $B = f(H)$ .

- 1) Соберите схему установки согласно рис. 3. Включите генератор и осциллограф в сеть, соблюдая меры техники безопасности, и дайте им прогреться  $5 \div 7$  мин.
- 2) При отсутствии напряжения на первичной обмотке трансформатора с помощью ручек регулировки на передней панели осциллографа установите светящуюся точку в центре координатной сетки.
- 3) Регулируя выходное напряжение генератора и усиление каналов **X** и **Y** осциллографа, получите на экране максимальную петлю гистерезиса с участком насыщения ферромагнетика. Определите координаты **X** и **Y** вершины петли и запишите в таблицу.
- 4) Уменьшая выходное напряжение генератора, снимите координаты **X** и **Y** вершин еще для  $3 \div 4$  петель гистерезиса.
- 5) С помощью формул (5) и (11) рассчитайте значения **H** и **B**, результаты занесите в таблицу.
- 6) Постройте график зависимости  $B = f(H)$ .
- 7) Определите погрешность измерений **H** и **B**.

Таблица

| $N_2 \Pi / \Pi$ | <b>X</b> , дел | <b>Y</b> , дел | $H, A/M$ | $B, Tл$ | $\Delta H, A/M$ | $\Delta B, Tл$ |
|-----------------|----------------|----------------|----------|---------|-----------------|----------------|
|                 |                |                |          |         |                 |                |

#### 2. Определение остаточной индукции и коэрцитивной силы.

- 1) Получите на экране максимальную петлю гистерезиса.
- 2) Используя координатную сетку экрана, найдите координату **Y**<sub>1</sub>, соответствующую остаточной индукции **B**<sub>1</sub>, и координату **X**<sub>1</sub>, соответствующую коэрцитивной силе **H**<sub>1</sub>.
- 3) С помощью формул (5) и (11) определите коэрцитивную силу и остаточную индукцию магнитного поля.

- 4) Рассчитайте погрешности измерений коэрцитивной силы  $H_1$  и остаточной индукции  $B_1$ .

### 3. Определение относительных потерь энергии.

- 1) Получите на экране осциллографа максимальную петлю гистерезиса.
- 2) Используя координатную сетку экрана, измерьте координаты  $X$  и  $Y$  вершины этой петли.
- 3) На миллиметровой бумаге, соблюдая масштаб, постройте в координатах  $Y = f(X)$  петлю гистерезиса и рассчитайте её площадь.
- 4) С помощью формулы (14) найдите относительные потери энергии  $\gamma$ .

### Контрольные вопросы

1. Что такое парамагнетики и диамагнетики?
2. Что такое ферромагнетики?
3. Как определяется напряженность магнитного поля?
4. Как определяется индукция магнитного поля?
5. Что такое магнитная проницаемость магнетика?
6. Как выполняется закон сохранения энергии при намагничивании ферромагнетика?
7. Как формулируется теорема о циркуляции вектора напряженности магнитного поля?
8. Что такое явление электромагнитной индукции?
9. Что такое индуктивность?
10. Зачем в трансформаторах используются сердечники из ферромагнитных материалов?

### Литература

1. Сивухин Д. В. *Общий курс физики. Т. III. Электричество.* – М.: Наука, 1977, § 58-61, 74-77, 79.
2. Савельев И. В. *Курс общей физики. Т. 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика.* – М.: Наука, 1982, § 51-59.
3. Калашников С. Г. *Электричество.* – М.: Наука, 1977, § 103-106, 109, 110, 118, 119.
4. Киттель Ч. *Введение в физику твердого тела.* – М.: Наука, 1978.
5. Вонсовский С. В. *Ферромагнетизм.* – М.: Наука, 1971.
6. Звездин А. К., Котов В. А. *Магнитооптика тонких пленок.* – М.: Наука, 1988.