

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Лабораторная работа 3.4.5
Петля гистерезиса (динамический метод).

Георгий Никишин
Группа Б05-909

Цель работы:

Изучение петель гистерезиса ферромагнитных материалов с помощью осциллографа.

Оборудование:

Автотрансформатор, понижающий трансформатор, интегрирующая цепочка, амперметр, вольтметр, электронный осциллограф, делитель напряжения, тороидальные образцы с двумя обмотками.

Экспериментальная установка:

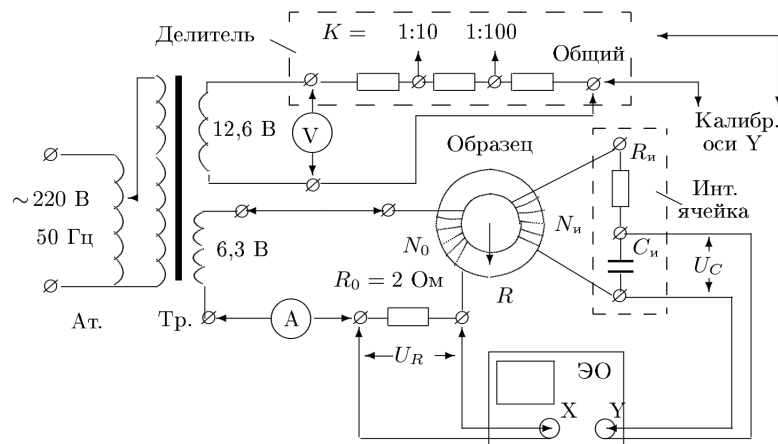


Рис. 1: Схема установки для исследования намагничивания образцов

Теоретическая часть

Действующее значение переменного тока в обмотке N_0 измеряется амперметром A (мультивольтметром GDM). Последовательно с амперметром включено сопротивление R_0 , напряжение с которого подаётся на вход X электронного осциллографа (ЭО). Это напряжение пропорционально току в обмотке N_0 , а следовательно и напряжённости H магнитного поля в образце.

Для измерения магнитной индукции B с измерительной обмотки N_i на вход интегрирующей RC -цепочки подаётся напряжение $U_i(U_{ВХ})$, пропорциональное производной \dot{B} , а с выхода снимается напряжение $U_C(U_{ВЫХ})$, пропорциональное величине B , и подаётся на вход Y осциллографа.

Замкнутая кривая, возникающая на экране, воспроизводит в некотором масштабе (различном для осей X и Y) петлю гистерезиса. Чтобы придать этой кривой количественный смысл, необходимо установить масштабы изображения, т.е. провести калибровку каналов X и Y ЭО. Для этого, во-первых, надо узнать, каким напряжениям (или токам) соответствуют амплитуды сигналов, видимых на экране, и во-вторых — каким значениям B и H соответствуют эти напряжения (или токи).

Исследуемый сигнал подаётся на вход X ; длина $2x$ горизонтальной черты, наблюдаемой на экране, характеризует удвоенную амплитуду сигнала.

Если известна чувствительность усилителя K_X в вольтах на деление шкалы экрана, то удвоенная амплитуда напряжения определяется произведением

$$2U_{X,0} = 2x \cdot K_X. \quad (1)$$

Напряжение, подаваемое на ось Y , измеряется аналогично.

Калибровку осей осциллографа (K_X и K_Y) можно использовать для построения кривой гистерезиса в координатах B и H , зная величину сопротивления R_0 с которого снимается сигнал, можно определить чувствительность канала по току $K_{XI} = K_X/R_0$ [А/дел]; затем, используя формулу, определить цену деления шкалы в А/м. Таким же образом определяется цена деления оси Y :

$$m_x = \frac{2R_0\sqrt{2}I_{\Phi}}{2x} \frac{B}{\text{дел}}. \quad (2)$$

$$m_y = \frac{2\sqrt{2}KU_{\Phi}}{2y} \frac{B}{\text{дел}} \quad (3)$$

$$RC = \frac{U_{\text{вх}}}{\Omega U_{\text{вых}}} \quad (4)$$

Обработка результатов экспериментов

1) Рассчитаем чувствительность канала X по формуле (2) и сравним с величиной K_x , использованной при калибровке:

$$I_{\Phi} = 1.92 \text{ А}; 2x = 9.6 \text{ дел} \Rightarrow m_x = \frac{2R_0\sqrt{2}I_{\Phi}}{2x} = 1.025 \frac{B}{\text{дел}}, K_X = 1 \text{ В} \quad (5)$$

2) Рассчитаем чувствительность канала Y по формуле (3) и сравним с величиной K_y , указанной на ЭО:

$$U_{\Phi} = 130.1 \text{ мВ}; 2y = 7.8 \text{ дел} \Rightarrow m_y = \frac{2\sqrt{2}KU_{\Phi}}{2y} = 49.6 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}, K_Y = 50 \text{ мВ} \quad (6)$$

3) Сравним экспериментальное значение τ с расчетом через $R_{\text{и}}$ и $C_{\text{и}}$, указанными на установке.

$$\tau = RC \quad (7)$$

$$U_{\text{ВХ}} = 7.2 \pm 0.1 \text{ В}; U_{\text{ВЫХ}} = 0.057 \pm 0.005 \text{ В} \Rightarrow \tau = 0.402 \pm 0.004 \text{ с} \quad (8)$$

$$R_{\text{и}} = 20 \cdot 10^3 \text{ Ом}; C_{\text{и}} = 20 \cdot 10^{-6} \Rightarrow \tau = 0.4 \text{ с} \quad (9)$$

$R = 20 \cdot 10^3 \text{ Ом}, \frac{1}{\Omega C} = 159 \text{ с} \Rightarrow$ легко убедимся, что с достаточной точностью выполняется

$$R \gg \frac{1}{\Omega C} \quad (10)$$

Пермаллой (Fe - Ni)

$$N_0 = 20 \text{ в.}; N_{\text{и}} = 300 \text{ в.}; S = 0.76 \text{ см}^2; 2\pi R = 13.3 \text{ см}$$

$$K_X = 1 \text{ В}; K_Y = 50 \text{ мВ}; I_{\Phi} = 1.52 \text{ А}$$

$$2x(c) = 9.2 \text{ дел}; 2y(s) = 7.4 \text{ дел}$$

4) Рассчитаем напряженность H поля в тороиде по формуле :

$$H = \frac{IN_0}{2\pi R} \quad (11)$$

Принимая $I = \sqrt{2}I_{\Phi}$, $I_{\Phi} = 1.74 \text{ А}$ получим:

$$H = 23.23 \pm 1.3 \frac{\text{А}}{\text{м}} \quad (12)$$

$$\delta H = H \cdot \delta I \frac{A}{M} \quad (13)$$

I, A	$x, \text{ дел}$	$y, \text{ дел}$
1.52	4.6	3.7
1.31	4.0	3.2
1.20	3.6	2.9
1.09	3.0	2.0
0.77	2.6	1.5
0.48	2.0	1.2
0.34	1.4	1.1

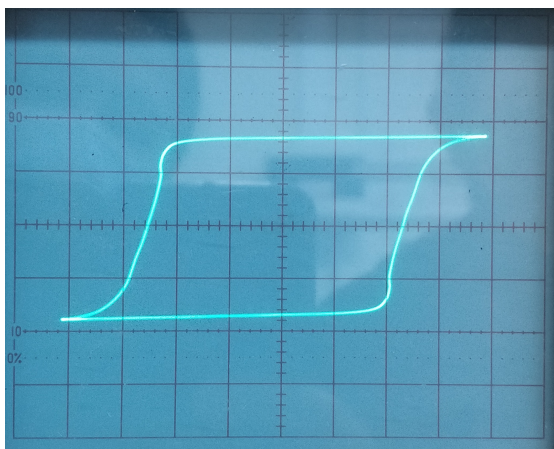


Рис. 2: Петля гистерезиса для пермаллоя

5) Рассчитаем B , B_s , $\mu_{\text{дифф}}$ и H_c :

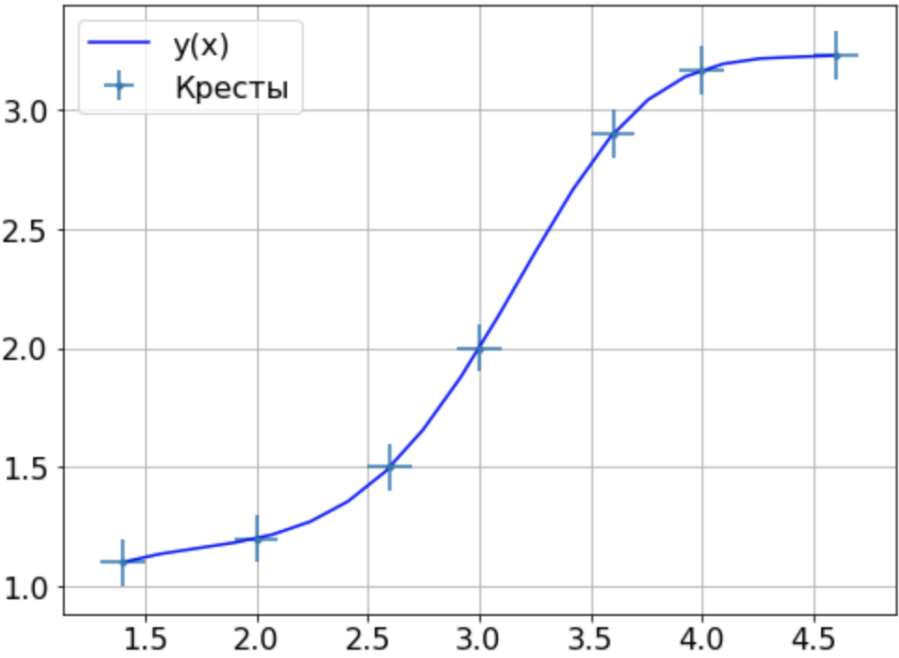
$$B = \frac{R_{\text{И}} C_{\text{И}} U_{\text{ВЫХ}}}{S N_{\text{И}}} = 1.877 \pm 0.153 \text{ Тл}; \quad B_s = 1.4 \pm 0.1 \text{ Тл} \quad (14)$$

$$\delta B = B \cdot \delta U_{\text{ВЫХ}} \quad (15)$$

$$H_c = 0.9 \pm 0.1 \frac{A}{M} \quad (16)$$

$$\mu_{\text{дифф}} = 49.0 \pm 0.1 \quad (17)$$

$$\delta \mu_{\text{дифф}} = \sqrt{\left(\frac{\delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\delta y}{y}\right)^2} \quad (18)$$



Кремнистое железо (Fe - Si)

$N_0 = 25 \text{ в.}; N_{II} = 250 \text{ в.}; S = 2.00 \text{ см}^2; 2\pi R = 11.0 \text{ см}$

$K_X = 1 \text{ В}; K_Y = 50 \text{ мВ}; I_{\Phi} = 1.52 \text{ А}$

$2x(c) = 8.4 \text{ дел}; 2y(s) = 6.8 \text{ дел}$

6) Рассчитаем H по формуле (11), принимая $I_{\Phi} = 1.92 \text{ А}, I = \sqrt{2}I_{\Phi}$

$$H = 62 \pm 3 \frac{\text{А}}{\text{м}} \tag{19}$$

$$\delta H = H \cdot \delta I \frac{\text{А}}{\text{м}} \tag{20}$$

<i>I</i> , А	<i>x</i> , дел	<i>y</i> , дел
1.384	4.2	3.4
1.384	3.6	3.3
0.986	2.8	2.9
0.878	2.5	2.7
0.799	2.3	2.5
0.561	1.6	2.0
0.460	1.4	1.8
0.345	1.0	1.4

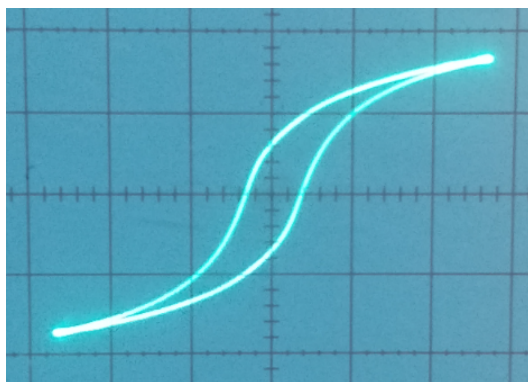


Рис. 3: Петля гистерезиса для кремнистого железа

7) Отсюда рассчитаем B , B_s , $\mu_{\text{дифф}}$ и H_C :

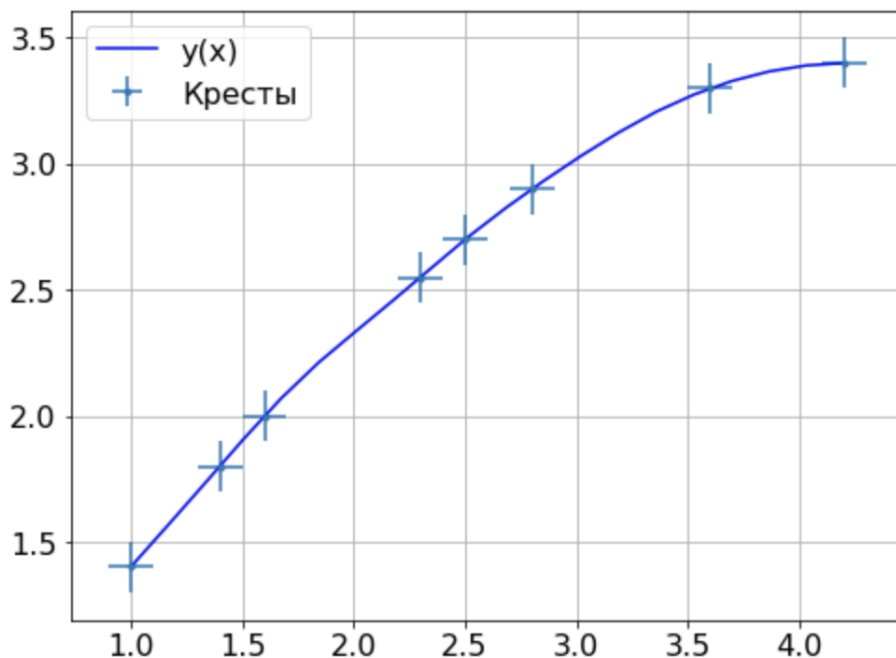
$$B = \frac{R_{\text{И}} C_{\text{И}} U_{\text{ВЫХ}}}{S N_{\text{И}}} = 0.40 \pm 0.03 \text{ Тл}; \quad B_s = 1.1 \pm 0.1 \text{ Тл} \quad (21)$$

$$\delta B = B \cdot \delta U_{\text{ВЫХ}} \quad (22)$$

$$H_C = 4.3 \pm 0.1 \frac{\text{А}}{\text{м}} \quad (23)$$

$$\mu_{\text{дифф}} = 200.0 \pm 0.1 \quad (24)$$

$$\delta \mu_{\text{дифф}} = \sqrt{\left(\frac{\delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\delta y}{y}\right)^2} \quad (25)$$



Феррит

$$N_0 = 42 \text{ в.}; \quad N_{\text{И}} = 400 \text{ в.}; \quad S = 3.00 \text{ см}^2; \quad 2\pi R = 25.0 \text{ см}$$

$$K_X = 1 \text{ В}; K_Y = 50 \text{ мВ}; I_{\text{эф}} = 1.2 \text{ А}$$

$$2x(c) = 8.4 \text{ дел}; 2y(s) = 8.8 \text{ дел}$$

8) Рассчитаем H по формуле (11), принимая $I_{\text{эф}} = 1.2 \text{ А}$, $I = \sqrt{2}I_{\text{эф}}$:

$$H = \frac{IN_0}{2\pi R} = 22.1 \pm 1.2 \frac{\text{А}}{\text{м}} \quad (26)$$

$$\delta H = H \cdot \delta I \frac{\text{А}}{\text{м}} \quad (27)$$

$I, \text{ А}$	$x, \text{ дел}$	$y, \text{ дел}$
1.20	4.2	4.4
1.12	3.6	4.3
1.00	3.3	3.7
0.85	3.0	3.3
0.66	2.5	2.7
0.48	2.3	2.4
0.38	1.9	1.9
0.36	1.4	1.4
0.25	1.0	1.3

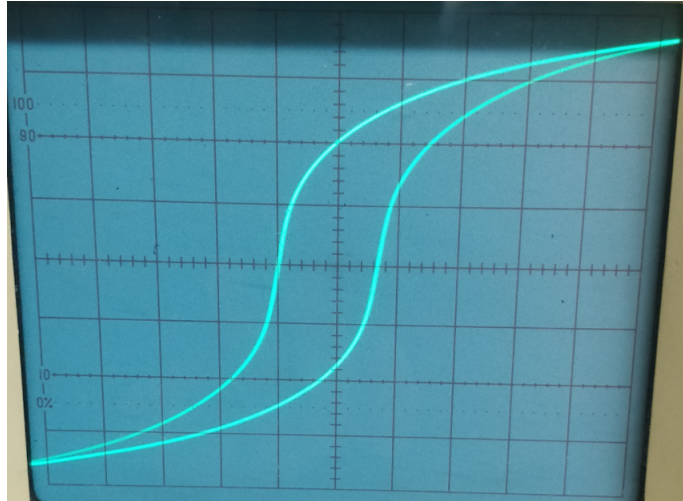


Рис. 4: Петля гистерезиса для феррита

9) Отсюда рассчитаем B , B_S , $\mu_{\text{дифф}}$ и H_C :

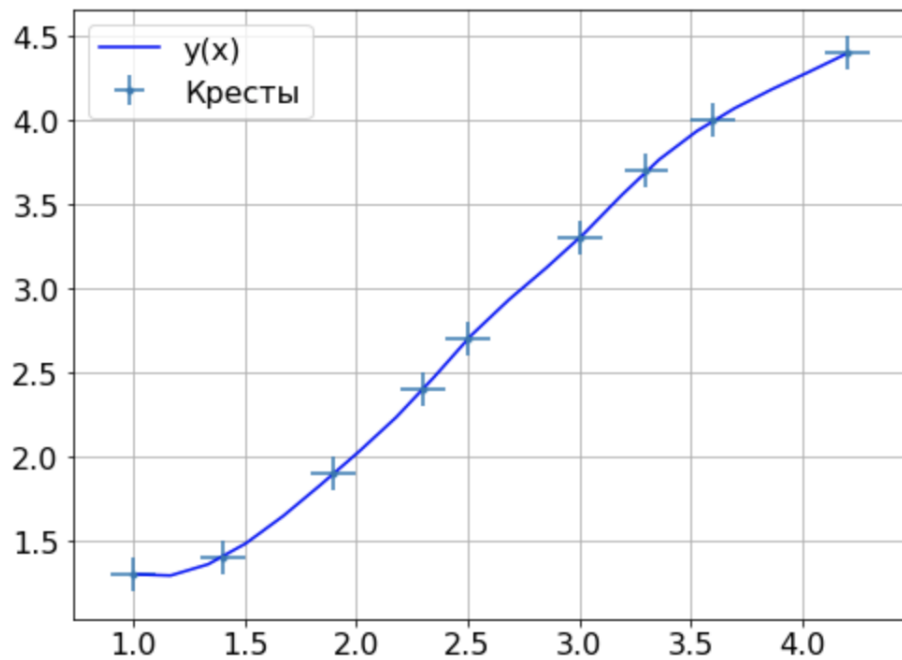
$$B = \frac{R_{\text{И}} C_{\text{И}} U_{\text{ВЫХ}}}{S N_{\text{И}}} = 0.27 \pm 0.01 \text{ Тл}; B_s = 1.3 \pm 0.1 \text{ Тл} \quad (28)$$

$$\delta B = B \cdot \delta U_{\text{ВЫХ}} \quad (29)$$

$$H_c = 4.5 \pm 0.1 \frac{\text{А}}{\text{м}} \quad (30)$$

$$\mu_{\text{дифф}} = 295.0 \pm 0.1 \quad (31)$$

$$\delta \mu_{\text{дифф}} = \sqrt{\left(\frac{\delta x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\delta y}{y}\right)^2} \quad (32)$$



Вывод

Петля гистерезиса является качественной характеристикой ферромагнетика, по ней с достаточной точностью можно вычислить B , H , H_c , $\mu_{\text{дифф}}$. Основной вклад в погрешность измерений вносят показания, снимаемые с осциллографа