

Работу выполнили
Бурнышев Павел и Борисов Никита, 676 гр.
под руководством
Алескерова И. А .

Маршрут X № 3
30 сентября 2017 г.,

Лабораторная работа № 3.4.5: Петля Гистерезиса(динамический метод)

Цель работы:

Изучение петель гистерезиса, ферромагнитных материалов с помощью осциллографа.

В работе используются:

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

Теория

Основные свойства ферромагнетиков : коэрцитивная сила, магнитная проницаемость, мощность рассеиваемая в виде тепла при перемагничивании – зависят от частоты переманичивающего тока.

Измерение магнитной индукции в образцах

ЭДС магнитной индукции, возникающей при изменении потока Φ в катушке, намотанной на образец:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (1)$$

В случае, если катушка неплотно охватывает образец, и индукция B в образце однородна, то

$$\Phi = BS N_{\text{инд}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{инд}}$ – число витков, S – площадь витка. Подставим это значение Φ в формулу (1) и после интегрирования получим:

$$|B| = \frac{1}{S N_{\text{инд}}} \int \varepsilon dt. \quad (3)$$

Для интегрирования сигнала применяют разные интегрирующие схемы, например, схему из соединенных последовательно резистора R и конденсатора C . Причем сопротивление резистора R должно заметно превышать сопротивление конденсатора, тогда ток в цепи пропорционален входному напряжению:
$$I \simeq \frac{U_{\text{вх}}}{R}.$$

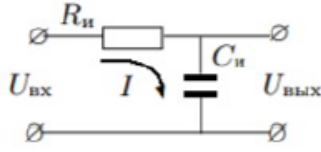


Рис. 1: Интегрирующая ячейка RC -цепочка.

Напряжение на конденсаторе равно

$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{RC} \int U_{\text{вх}} dt. \quad (4)$$

В случае синусоидальных напряжений:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вх}}}{RC\Omega}, \quad (5)$$

где Ω – частота сигнала.

Обозначим параметры интегрирующей ячейки через R_n и C_n и выразим индукцию с помощью (2) и (3) через $U_{\text{вых}}$:

$$|B| = \frac{1}{SN_n} \int \varepsilon dt = \frac{1}{SN_n} \int U_{\text{вх}} dt = \frac{R_n C_n}{SN_n} U_{\text{вых}}. \quad (6)$$

Экспериментальная установка

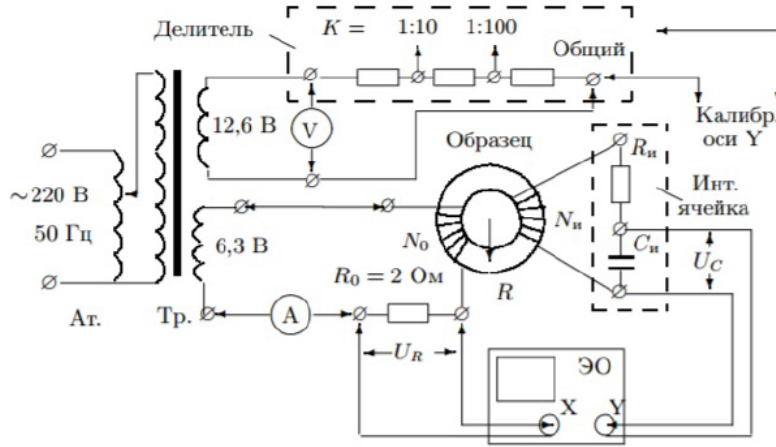


Рис. 2: Схема установки для исследования намагничивания образцов

Для измерения магнитной индукции B с измерительной обмотки N_n на вход подается напряжение $U_{\text{вх}}$. Замкнутая кривая, возникающая на экране осциллографа воспроизводит петлю гистерезиса. Чтобы придать этой кривой качественный смысл необходимо установить масштабы изображения, то есть произвести калибровку каналов X и Y ЭО.

Калибровка горизонтальной и вертикальной осей ЭО

Если известна чувствительность K_x , то удвоенная амплитуда напряжения определяется как:

$$2U_{x,0} = 2x \cdot K_x$$

Напряжение, подаваемое на O_y определим как:

$$2U_{y,0} = 2y \cdot K_y$$

При закороченной N_0 амперметр A измеряет эффективное значение синусоидального тока $I_{эфф}$. Сигнал подается на вход X ЭО. Измерив $2x$ – длину горизонтальной прямой на экране, можно рассчитать чувствительность канала X – m_x :

$$m_x = \frac{2R_0\sqrt{2}I_{эфф}}{2x} \frac{B}{\text{дел}}. \quad (7)$$

Измерив $2y$ – длину вертикальной прямой на экране, рассчитаем чувствительность канала Y :

$$m_y = \frac{2\sqrt{2}KU_{эфф}}{2y} \frac{B}{\text{дел}}. \quad (8)$$

Постоянная RC цепочки

Данная постоянная определяется экспериментально, измеряя амплитуды сигналов со входов X и Y . Константа времени высчитывается как $\tau = RC$. По (5) получаем:

$$\tau = RC = \frac{U_{вх}}{\Omega U_{вх}}. \quad (9)$$

Задания

1. Для наблюдения петли гистерезиса на экране осциллографа собираем схему аналогично рисунку 2, после чего подключаем цепь к сети питания, подберем ток и коэффициенты усиления так, чтобы предельная петля занимала большую часть экрана ЭО.
2. Для пермаллоя, кремнистого железа и феррита найдем предельную петлю Гистерезиса, указав для каждого объекта коэффициенты чувствительности по осям x и y – K_x и K_y , а также ток $I_{эфф}$ в намагничивающей обмотке и параметры тороида. Плавное уменьшение тока намагничивания до нуля, для каждого из трех материалов восстановим начальную кривую Гистерезиса. Будем отмечать вершины наблюдаемых петель, они и образуют кривую.

Кроме того, для каждого образца восстановим предельную петлю с помощью данных с экрана ЭО: измерим двойные амплитуды для коэрцитивной силы $[2x(c)]$ и индукции насыщения $[2y(s)]$. Запишем соответствующие значения K_x и K_y .

3. Прокалибруем горизонтальную ось ЭО, для этого отключим намагничивающую обмотку N_0 от сети и снимем зависимость $2x[\text{дел}] = f(I_{эфф})$:

$$O_x : I_{эфф} = 1.74\text{А}; 2x = 8.8\text{дел} \Rightarrow m_x = \frac{2R_0I_{эфф}}{2x} = 1.07 \Rightarrow k_x \approx 1$$

Для калибровки вертикальной оси осциллографа подключим вольтметр к обмотке 12.6 В. Не меняя K_y подберем напряжение U при котором стрелка вольтметра отклоняется максимально, после чего подадим на Y -вход напряжение с делителя, запишем получившиеся результаты $2y, U, k, k_y$.

$$O_y : U_{eff} = 130\text{мВ}; 2y = 7.0\text{дел} \Rightarrow m_y = \frac{2\sqrt{2}U_{eff}}{2y} = 47.9\text{мВ} \approx 50\text{мВ}$$

4. Определим τ – постоянную времени для RC -цепочки (1). Для этого разберем цепь тороида и подадим на вход RC -цепочки синусоидальное напряжение с обмотки 6.3 В трансформатора. Подобрав ток, при котором вертикальная прямая занимает большую часть экрана, мы можем найти входное напряжение $U_{вх} = 2yK_y$. По формуле (5) найдем выходное напряжение.

Запишем параметры RC -схемы: $R = 20 \text{ Ком}$, $C = 20\text{мкФ}$.

$$U_{вх} = 7.2\text{В}, U_{вых} = \frac{U_{вх}}{RC\Omega} = \frac{7.2}{2\pi 50} = 0.056\text{В}$$

Получаем, что по формуле (9):

$$\tau = \frac{U_{вх}}{\Omega U_{вх}} = 0.4\text{сек}; \delta(\tau) = \tau \cdot \sqrt{\left(\frac{2 \cdot \delta(U_{вх})}{U_{вх}}\right)^2} = 0.02 \Rightarrow \tau = 0.4 \pm 0.02\text{сек}$$

5. Для каждого из трех материалов запишем H_c – коэрцитивную силу, B_s – индукцию насыщения, а также μ – дифференциальную магнитную проницаемость:

	Пермаллой (Fe-Ni)	Кремнистое железо(Fe-Si)	Феррит
$H_c, \text{А/м}$	37 ± 3	23 ± 4	320 ± 15
$B_s, \text{Тл}$	0.3 ± 0.04	0.8 ± 0.1	0.03 ± 0.05
$\mu, \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{\text{А}}$	1	2	5

Вывод

С помощью экспериментальной установки мы исследовали процесс намагничивания ферромагнетиков: пермаллоя, кремнистого железа и феррита. Мы частично смогли смоделировать процесс появления петли Гистерезиса. Из нее мы смогли получить дифференциальную магнитную проницаемость исследуемых объектов. Возможно, что из-за плохих контактов проводов или же из-за неких других факторов не совсем точно удалось определить данные для кремнистого железа.

Приложение

Для каждого из объектов рассчитаем чувствительности каналов по формулам (7) и (8), после чего рассчитаем τ через параметры $R_{и}$ и $C_{и}$. Приняв ток $I = \sqrt{2}I_{эфф}$, рассчитаем напряженность поля H по формуле $H = \frac{IN_0}{2\pi R}$, где N_0 – число витков намагничивающей обмотки. Теперь возможно будет построить график $H = f(x)$ и рассчитать наклон калибровочной прямой $\alpha = \frac{\Delta H [A/M]}{\Delta x \text{ дел}}$. Рассчитаем H_c , B_s , $\mu_{диф}$, взяв значения $2x(c)$, $R_{и}$, $C_{и}$. Для определения $\mu_{диф}$ нам необходимо найти скорость подъема кривой в графике начальной кривой намагничивания.

Пермаллой (Fe-Ni)

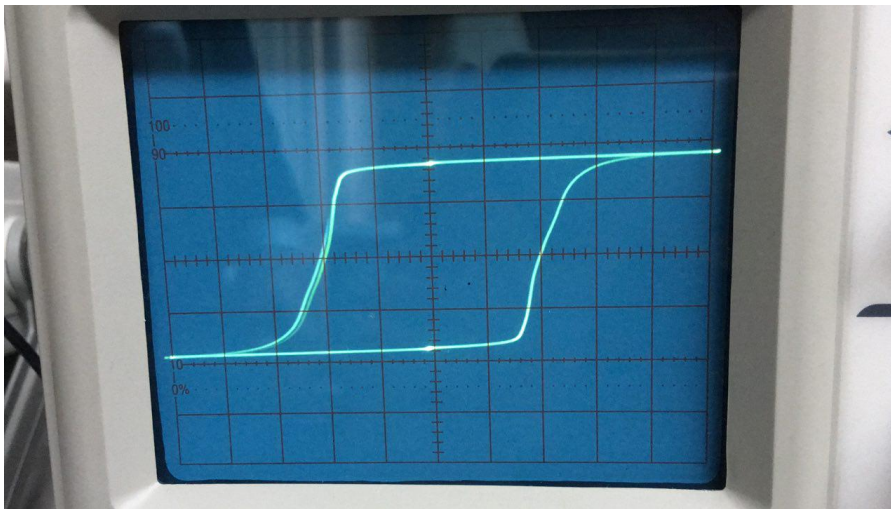
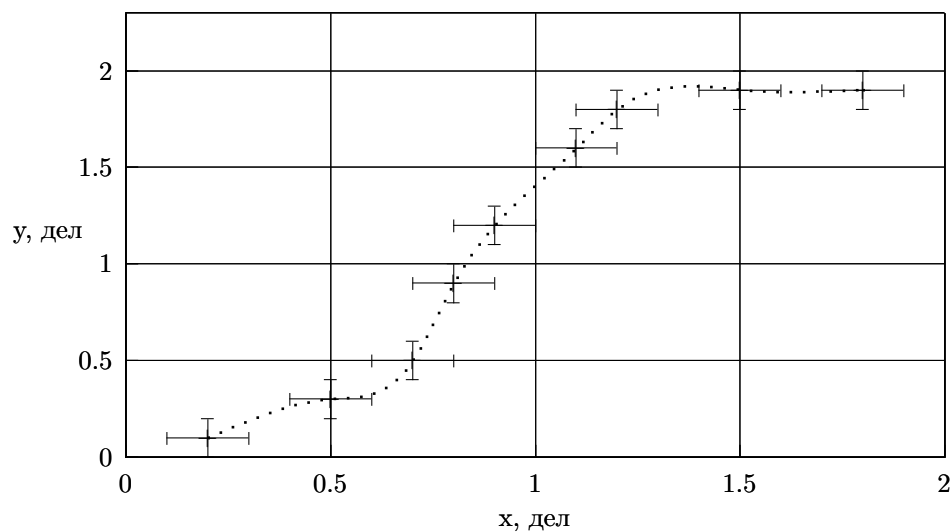


Рис. 3: Предельная петля для пермаллоя

В ходе эксперимента мы плавно увеличиваем ток, попутно снимая процесс на видео, восстановим по видео координаты точек вершин начальной кривой, получим таблицу:

№	x, дел	y, дел
1	1.9	1.9
2	1.5	1.9
3	1.2	1.8
4	1.1	1.6
5	0.9	1.2
6	0.8	0.9
7	0.7	0.5
8	0.5	0.3
9	0.2	0.1

Таблица 1: Координаты вершин частных петель



$K_x = 0.5V$; $K_y = 50 \frac{mV}{\text{дел}}$; $N_o = 15$ витков ; $N_U = 300$ витков ; $S = 0.66 \text{ см}^2$; $2\pi R = 14.1 \text{ см}$;
 $2x(c) = 4 \text{ дел}$; $2y(s) = 3.8 \text{ дел}$.

По данным установки рассчитаем следующие величины:

$$H = \frac{IN_0}{2\pi R} = 18.7 \frac{A}{m}; B = \frac{R_{и} C_{и} U_{\text{внеш}}}{SN_U} = \frac{0.4 \cdot 7.2}{0.66 \cdot 300} = 0.15 \text{ Тл}; H_c = \frac{4 \cdot 0.187}{2} = 0.37 \frac{A}{\text{см}}; B_s = \frac{3.8 \cdot 0.15}{2} = 0.3 \text{ Тл}; \mu = 1 \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{A}.$$

Кремнистое железо(Fe-Si)

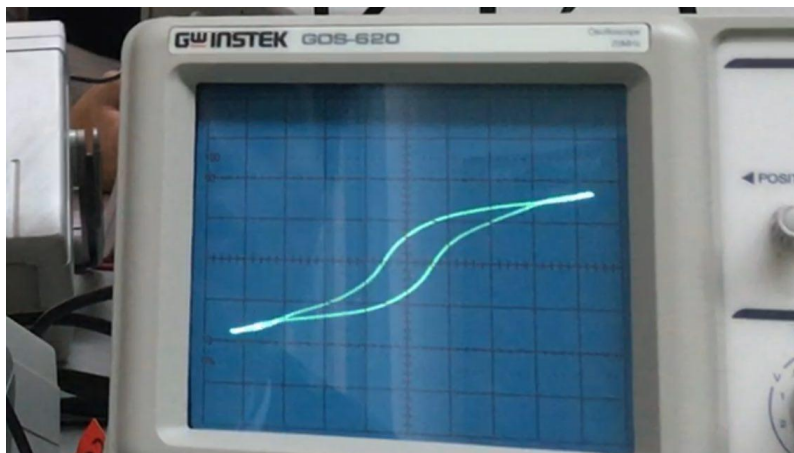
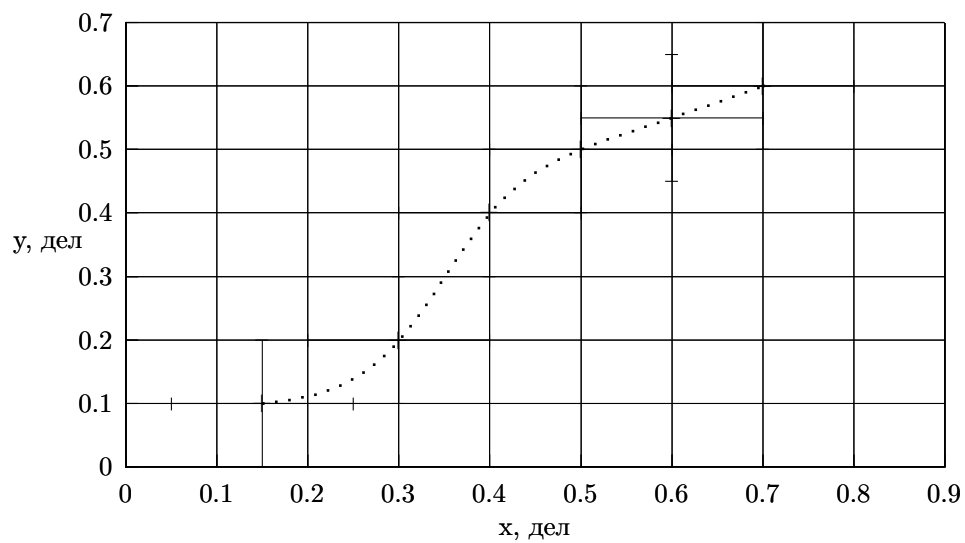


Рис. 4: Предельная петля для кремнистого железа

Стоит отметить, что для данного случая петля гистерезиса сформировалась в предельном виде очень быстро – практически в самом начале эксперимента при наращивании напряженности магнитного поля у нас перестали меняться величины остаточной индукции B и коэрцитивной силы H_c .

№	х, дел	у, дел
1	0.7	0.6
2	0.6	0.55
3	0.5	0.5
4	0.4	0.4
5	0.3	0.2
6	0.15	0.1

Таблица 2: Координаты вершин частных петель



$K_x = 1V$; $K_y = 50 \frac{mV}{\text{дел}}$; $N_o = 20$ витков ; $N_U = 200$ витков ; $S = 2 \text{ см}^2$; $2\Pi R = 11 \text{ см}$;
 $2x(c) = 1.4 \text{ дел}$; $2y(s) = 1.2 \text{ дел}$.

По данным установки рассчитаем следующие величины:

$$H = \frac{IN_0}{2\Pi R} = 32 \frac{A}{m}; B = \frac{R_u C_U U_{\text{внеш}}}{S N_U} = 0.3 \text{ Тл}; H_c = 0.23 \frac{A}{\text{см}}; B_S = 0.8 \text{ Тл}; \mu = 2 \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{A}.$$

Феррит

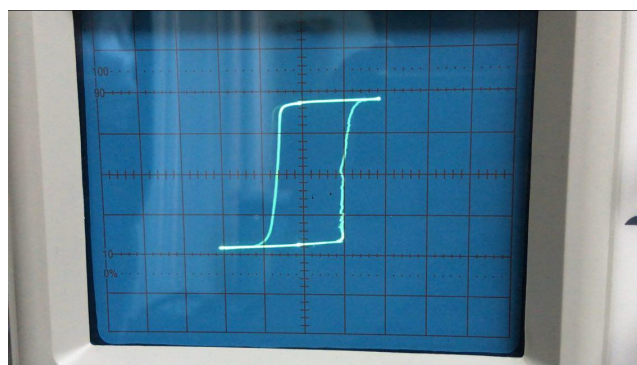
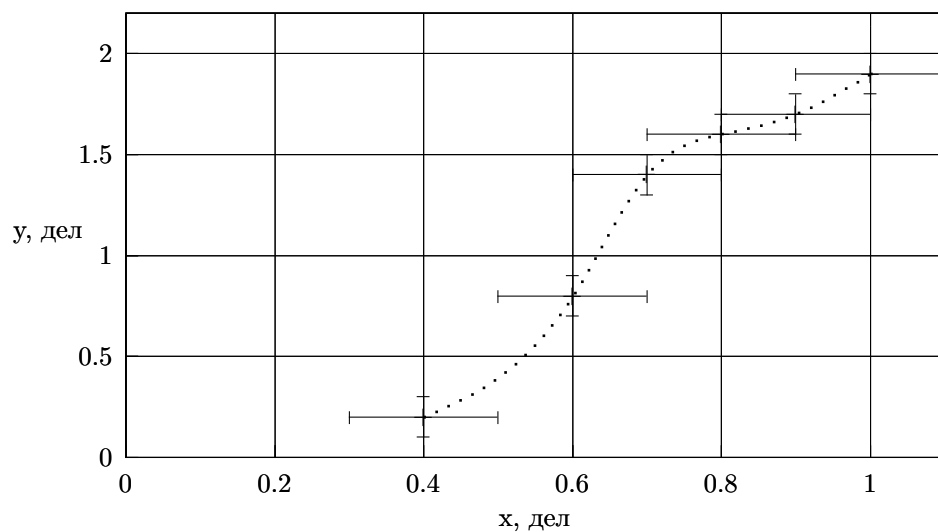


Рис. 5: Предельная петля для феррита

№	x, дел	y, дел
1	1	1.9
2	0.9	1.7
3	0.8	1.6
4	0.7	1.4
5	0.6	0.8
6	0.4	0.2

Таблица 3: Координаты вершин частных петель намагничивания феррита



$K_x = 1V$; $K_y = 50 \frac{mV}{\text{дел}}$; $N_o = 45$ витков ; $N_U = 400$ витков ; $S = 3 \text{ см}^2$; $2\Pi R = 25 \text{ см}$;
 $2x(c) = 2 \text{ дел}$; $2y(s) = 3.8 \text{ дел}$.

По данным установки рассчитаем следующие величины:

$$H = 3.2 \frac{IN_0}{2\Pi R} = \frac{A}{m}; B = \frac{R_u C_U U_{\text{внеш}}}{S N_U} = 0.024 \text{ Тл}; H_c = 0.04 \frac{A}{\text{см}}; B_S = 0.05 \text{ Тл}; \mu = 5 \frac{\text{Тл} \cdot \text{м}}{A}.$$