

Лабораторная работа 3.4.5. Петля гистерезиса. Динамический метод

Иван Сладков

19 февраля 2022 г.

1 Аннотация

В данной работе проводится исследование петель гистерезиса различных материалов (феррит, пермалой, кремнистое железо) в переменных магнитных полях и получение начальной кривой намагничивания.

2 Теоретические сведения

Если состояние некоторой системы зависит не только от мгновенных значений внешних параметров, но от истории их изменений, говорят, что в системе имеет место гистерезис. Таким свойством обладает магнитный момент ферромагнетика: $\mathbf{M} = \mathbf{M}(\mathbf{H})$.

Доведём систему до некоторой точки A , лежащей в области насыщения (здесь B_s — индукция насыщения), и начнём уменьшать напряжённость H . Обратный путь пойдёт не по начальной кривой, а выше неё.

При выключении внешних полей, то есть при достижении $H = 0$ в образце сохраняется собственное намагничивание. Соответствующее значение индукции B_r называют остаточной индукцией.

Значение $B = 0$ достигается при отрицательном значении $H = -H_c$. Величина H_c называется коэрцитивным полем. В точке C наступает насыщение для намагничивания в противоположную сторону. Если теперь попробовать вернуться в точку A , вновь наращивая поле, получим некоторый замкнутый цикл — предельную петлю гистерезиса (рис. 1)). Если в точке A насыщение не достигается, то аналогичным образом получится цикл меньшей площади.

2.1 Расчётные формулы

Из формулы

$$\mathcal{E} = -\frac{v\Phi(B)}{dt}$$

получим

$$|B| = \frac{1}{SN} \int \mathcal{E} dt = \frac{\tau_{II}}{SN} U_{\text{вых}}. \quad (1)$$

Последнее соотношение получено, т. к. используем интегрирующую цепочку с постоянной времени $\tau_{II} = R_{II}C_{II}$.

3 Оборудование и инструментальные погрешности

Экспериментальная установка на рис. 2. Петля гистерезиса отображается на экране ЭО в масштабе; для уточнения масштаба проводится калибровка.

Автотрансформатор

Понижающий трансформатор

Интегрирующая цепочка

Амперметр

Вольтметр

Электронный осциллограф (ЭО)

Делитель напряжения

Тороидальные образцы с двумя обмотками

Параметры установки соберём в табл. 1, 2.

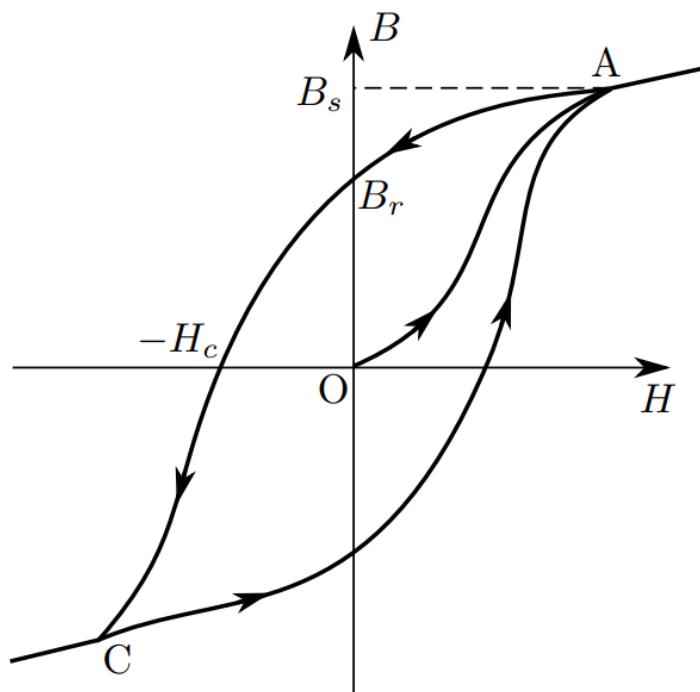


Рис. 1: Начальная кривая намагничивания и предельная петля гистерезиса

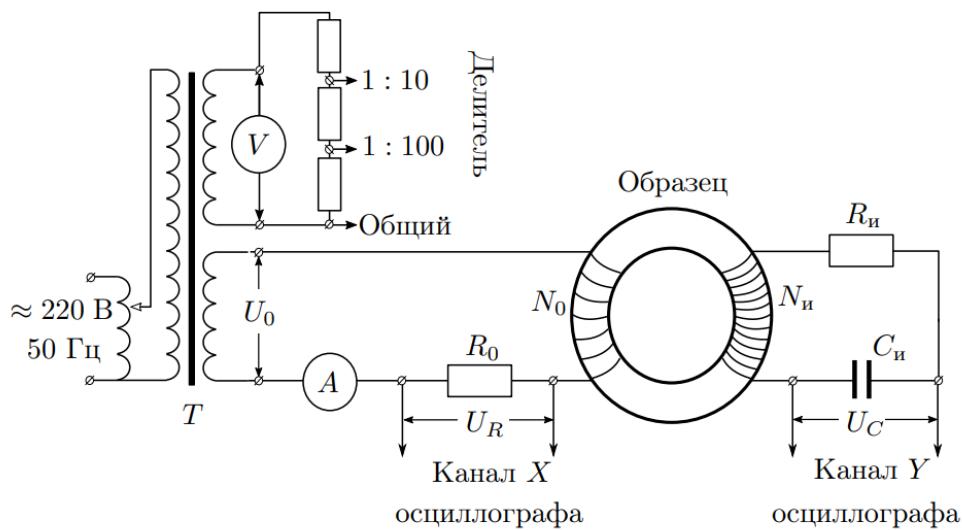


Рис. 2: Установка для исследования петли гистерезиса

R_0	0.3 Ом
R_i	20 кОм
C_i	20 мкФ
Ω	50 Гц

Таблица 1: Общие параметры

	Феррит	Пермалloy	Кремнистое железо
N_0	35	35	35
N_U	400	220	350
S , см ²	3	3.8	1.2
$2\pi R$, см	25	24	10

Таблица 2: Параметры образцов

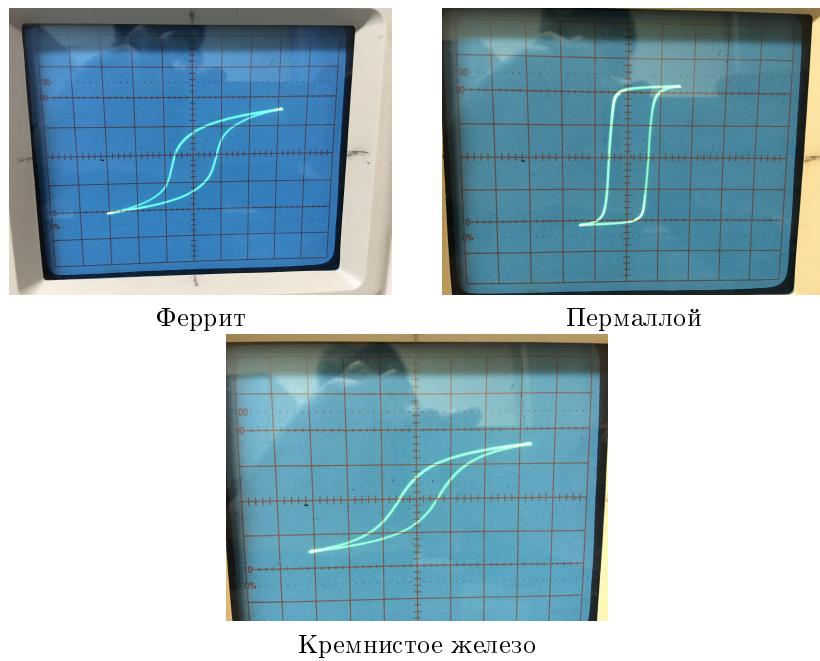


Рис. 3: Предельные кривые различных материалов

4 Результаты измерений и обработка данных

Все измерения и расчёты в СИ.

4.1 Исследование петли гистерезиса

Предельные петли для различных образцов изображены на рис. 4.1

Рассчитаем цену деления.

Для феррита:

$$h = \frac{K_x N_0}{2\pi R R_0} = \frac{0.02 * 35}{0.25 * 0.3} = 9.3 \pm 0.9 \text{ (A/m)/дел},$$

$$b = \frac{R_{\text{И}} C_{\text{И}} K_y}{S N_{\text{И}}} = \frac{20000 * 20 * 10^{-6} * 0.02}{3 * 10^{-4} * 400} = 0.067 \pm 0.007 \text{ Тл/дел.}$$

Для пермаллоя:

$$h = \frac{0.02 * 35}{0.24 * 0.3} = 10 \pm 1 \text{ (A/m)/дел},$$

$$b = \frac{20000 * 20 * 10^{-6} * 0.02}{3.8 * 10^{-4} * 220} = 0.1 \pm 0.01 \text{ Тл/дел.} \quad (2)$$

Для кремнистого железа:

$$h = \frac{0.1 * 35}{0.1 * 0.3} = 120 \pm 10 \text{ (A/m)/дел},$$

$$b = \frac{20000 * 20 * 10^{-6} * 0.1}{1.2 * 10^{-4} * 350} = 1.0 \pm 0.1 \text{ Тл/дел.}$$

По сделанным фото, учитывая калибровку, построим графики начальных кривых намагничивания.

Далее, найдём индукцию насыщения и коэрцитивную силу.

Для феррита:

$$H_c = \frac{(2x_c) * h}{2} = 3.1 * 9.3 / 4 = 15.0 \pm 0.1 \text{ A/m},$$

где h – цена деления для $K_x = 5 \text{ mV}$.

$$B_s = \frac{(2y_s) * b}{2} = 2.1 * 0.067 = 0.143 \pm 0.005 \text{ Тл.}$$

Для пермаллоя:

$$H_c = 3.1 * 9.7 = 30.1 \pm 0.1 \text{ A/m}$$

$$B_s = 2.9 * 5 * 0.095 = 1.45 \pm 0.03 \text{ Тл}$$

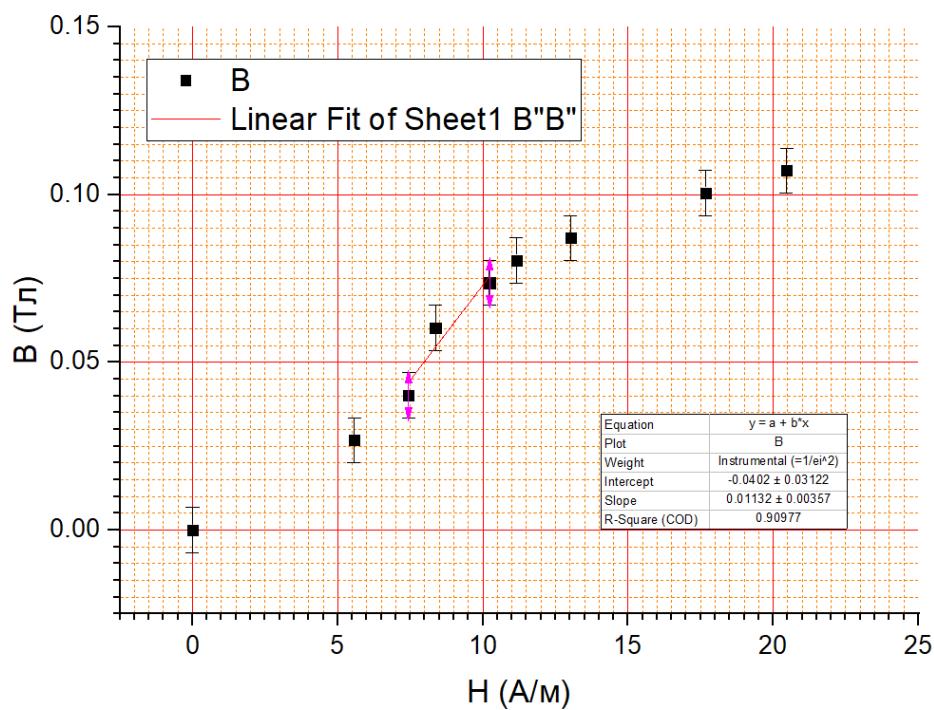


Рис. 4: Начальная кривая феррита

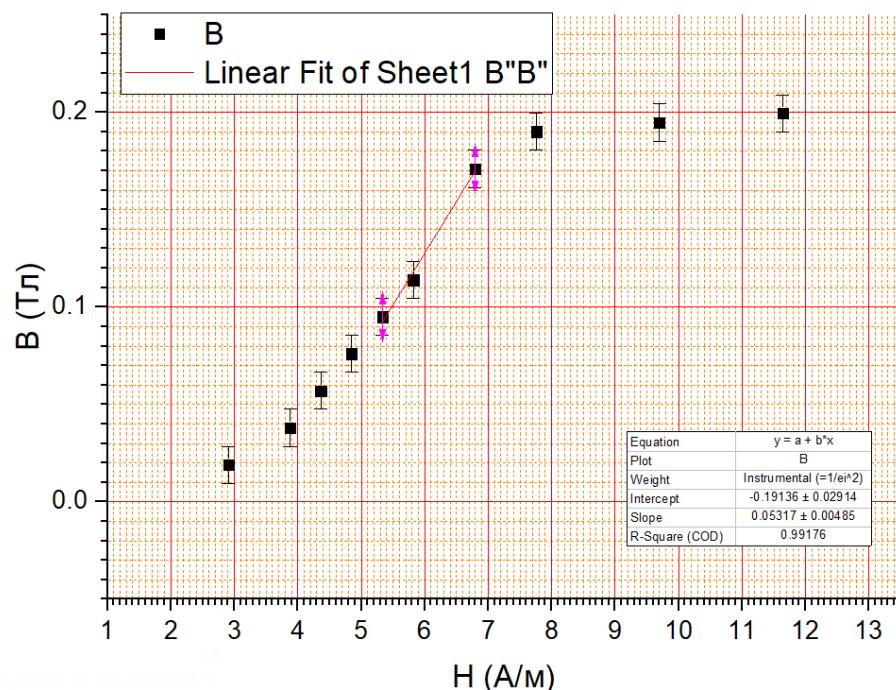


Рис. 5: Начальная кривая пермаллоя

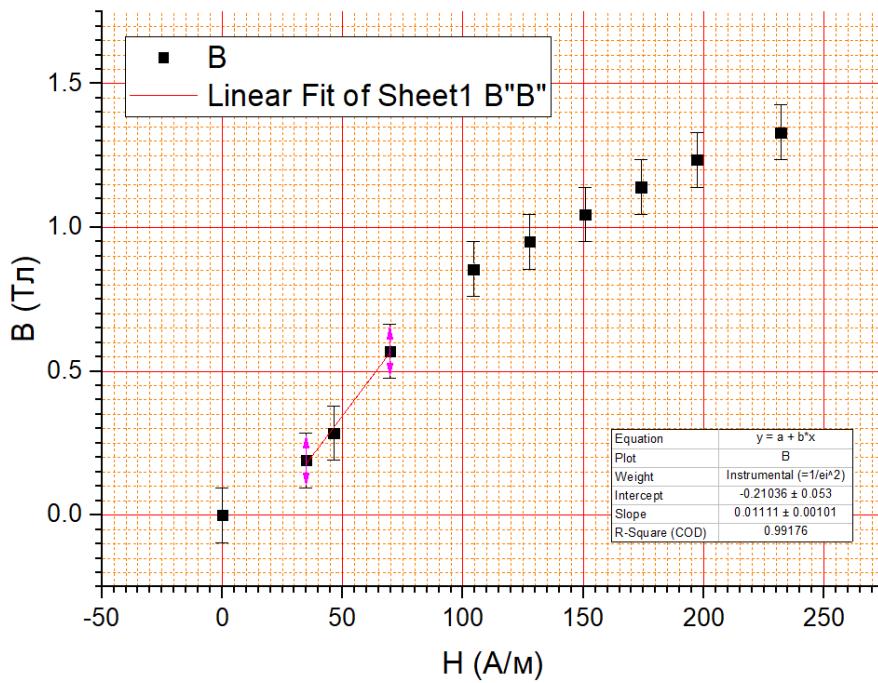


Рис. 6: Начальная кривая кремнистого железа

Для кремнистого железа:

$$H_c = 3 * 116 / 5 = 69.5 \pm 0.2 \text{ А/м}$$

$$B_s = 3 * 0.95 / 2 = 1.43 \pm 0.03 \text{ Тл.}$$

4.2 Проверка калибровки по X

Для $K_x = 0.1$ В

$$m_x = 2\sqrt{2}R_0 \frac{I_{\phi}}{2x} = 0.098 \pm 0.005 \text{ В}$$

Для $K_x = 0.05$ В:

$$m_x = 2 * \sqrt{2} * 0.3 \frac{0.336}{5.8} = 0.049 \pm 0.001 \text{ В} \quad (3)$$

Для $K_x = 0.02$ В:

$$m_x = 2\sqrt{2} * 0.3 * \frac{0.19}{8.2} = 0.0196 \pm 0.0002 \text{ В} \quad (4)$$

Калибровка по х выполнена с достаточной точностью.

4.3 Проверка калибровки по Y

Для $K_y = 0.1$ В:

$$m_y = 2\sqrt{2}U_{\phi}/(2y) = 2\sqrt{2} * 0.138 / 4 = 0.097 \pm 0.002 \text{ В}$$

Для $K_y = 0.05$ В:

$$m_y = 2\sqrt{2} * 0.0814 / 4.8 = 0.48 \pm 0.01 \text{ В}$$

Для $K_y = 0.02$ В:

$$m_y = 2\sqrt{2} * 0.0444 / 6.4 = 0.019 \pm 0.003 \text{ В}$$

Калибровка выполнена с достаточной точностью.

4.4 Оценка τ

$$K_y = 1 \text{ В/дел.}$$

$$(2y) = 5.6 \pm 0.1 \text{ дел.}$$

$$U_{\text{вх}} = 5.60 \text{ В.}$$

$$U_{\text{вых}} = 0.04 \text{ В.}$$

Тогда:

$$\tau_{\text{теор}} = RC = (20 * 10^3) * (20 * 10^{-6}) = 0.4 \text{ с}$$

$$\tau_{\text{эксп}} = \frac{U_{\text{вх}}}{\Omega U_{\text{вых}}} = \frac{5.6}{2\pi * 50 * 0.04} = 0.44 \pm 0.01 \text{ с}$$

$\tau_{\text{эксп}}$ отличается от $\tau_{\text{теор}}$ на 10%. Это может быть связано, например, с погрешностью при замере $(2y)$.

4.5 Оценка погрешностей

Т. к. в работе присутствует осциллограф, практически все погрешности определяются погрешностью, связанной со снятием показаний по экрану. Т. к. физически невозможно считать показания лучше, чем с точностью 1/10 дел., погрешность h и b в пп. 4.1 – 10%.

Но при расчёте коэрцитивной силы, погрешность снятия показаний с экрана учтена в σ_h , и абсолютная погрешность сохраняется (но только если не меняется масштаб).

При оценке погрешностей в пп. 4.2 – 4.4 отн. погр. $\sigma_{(2y)} / (2y) = (10\%) / (2y)$. Для $(2x)$ – аналогично. Они превалируют над другими инструментальными погрешностями.

5 Вывод

Обобщим полученные данные в табл. 3. Многие характеристики существенно отличаются от справочных. Скорее всего, это связано с несовершенством метода, а не с низким качеством сплавов (пермалloy НП50, например, прецизионный сплав). По крайней мере, оценочно удалось определить некоторые магнитные параметры данного ряда веществ. Получена примерная кривая намагничивания.

Ампл.	Феррит	Fe-Ni	Fe-Si
$H_c, \text{ A/m}$	15 ± 0.1	30.1 ± 0.1	69.5 ± 0.2
	20	11 – 40	100
$B_s, \text{ Тл}$	0.143 ± 0.005	1.45 ± 0.03	1.43 ± 0.03
	0.15	1.50 – 1.52	2
$\mu_{\text{диф}}$	9010 ± 500	42300 ± 4000	8800 ± 800
	10000	8000 – 35000	20000

Таблица 3: Сводная таблица магнитных характеристик

Список литературы

- [1] Сивухин Д. В. *Общий курс физики. Том 3 Электричество и магнетизм*, 2004
- [2] Кириченко Н.А. *Электричество и магнетизм.*, 2011
- [3] *Лабораторный практикум по общей физике. В 3 томах. Том 2. Электричество и магнетизм: учебное пособие* под ред. А. В. Максимычева, М. Г. Никулина