

Отчет о выполнении лабораторной работы 3.4.5

Петля гистерезиса (динамический метод)

Севастьян Черняков

ФУПМ МФТИ, 2023

1. Введение

Цель работы:

Изучение петель гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных полях.

В работе используются:

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

2. Результаты измерений и обработка данных

2.1. Исследование петли гистерезиса

Параметры установки следующие: $R_0 = 0.3$ Ом, $R_{\text{и}} = 20$ кОм, $C_{\text{и}} = 20$ мкФ, $\omega = 50$ Гц. Подберем ток питания в намагничивающей обмотке с помощью автотрансформатора и коэффициенты усиления ЭО таким образом, чтобы предельная петля гистерезиса занимала большую часть экрана. Приведем характерные значения катушек разных материалов в таблице.

	Феррит	Пермаллой	Крем. 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 1: Параметры образцов

Для каждого образца получим передельные петли гистерезиса, по коэффициентам усиления ЭО K_x и K_y рассчитаем масштабы, определим двойные амплитуды коэрцитивной силы $[2x(c)]$ и индукции насыщения $[2y(s)]$. Здесь $K_x = 2R_0\sqrt{2}I_{\text{эф}}/2x$, $K_y = 2\sqrt{2}U_{\text{эф}}/2y$. Масштабы по осям X и Y рассчитаем по формулам $H = IN_0/(2\pi R)$, где $I = K_x/R_0$; $B = R_{\text{и}}C_{\text{и}}U_{\text{вых}}/(SN_{\text{и}})$, $U_{\text{вых}} = K_y$.

Для феррита:

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

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

Для пермаллоя:

$$H = \frac{0.02 * 35}{0.24 * 0.3} = 10 \pm 1 \text{ (А / м) / дел,}$$

$$B = \frac{20000 * 20 * 10^{-6} * 0.02}{3.8 * 10^{-4} * 220} = 0.1 \pm 0.01 \text{ Тл / дел.} \quad (1)$$

Для кремнистого железа:

$$H = \frac{0.1 * 35}{0.1 * 0.3} = 120 \pm 10 \text{ (А / м) / дел,}$$

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

Далее, найдём индукцию насыщения - максимальную индукцию, которую можно получить в данном магнитном материале, и коэрцитивную силу - значение напряжённости внешнего магнитного поля, необходимое для полного размагничивания ферромагнитного вещества..

Для феррита:

$$H_c = \frac{(2x_c) * H}{2} = 3.1 * 9.3/4 = 15.0 \pm 0.1 \text{ А/м,}$$

где H – цена деления для $K_x = 5 \text{ мВ}$.

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

Тогда амплитуда, соответствующая состоянию насыщения $H_s = 30.3 \pm 0.9 \text{ А/м}$, индукция насыщения в этом случае $B_r = 0.069 \pm 0.007 \text{ Тл}$

Для пермаллоя:

$$H_c = 3.1 * 9.7 = 30.1 \pm 0.1 \text{ А / м}$$

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

Также для пермаллоя $H_s = 64 \pm 2 \text{ А/м}$; $B_r = 1.02 \pm 0.06 \text{ Тл}$

Для кремнистого железа:

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

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

Также для кремнистого железа $H_s = 430 \pm 10 \text{ А/м}$; $B_r = 0.62 \pm 0.08 \text{ Тл}$

Табличные данные для исследуемых материалов приведены ниже.

Сравнивая полученные данные с табличными, можно утверждать, что они совпадают лишь по порядку величины.

Также приведём фотографии предельных петель гистерезиса.

По начальным кривым намагничивания и найдём, чему равны начальное и максимальное значения дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}} = dB/dH$. Получим следующие значения: $\mu_{\text{нач}} \approx 750$, $\mu_{\text{max}} \approx 290$ для феррита, $\mu_{\text{нач}} \approx 1300$, $\mu_{\text{max}} \approx 3700$ для пермаллоя и $\mu_{\text{нач}} \approx 430$, $\mu_{\text{max}} \approx 6800$ для кремнистого железа.

Таблица 13

Свойства¹⁾ магнитомягких ферромагнитных материалов [2, 4, 6]

Материал	Состав	$\mu_{нач}$	μ_{max}	H_c , А/м	B_s , Тл
Железо	99Fe	200	6000	70	2,16
–“– чистое	99,9Fe	$2,5 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^5$	0,8	2,16
–“– кремнистое	96Fe-4Si	500	$7 \cdot 10^3$	40	1,95
	97Fe-3Si	$9 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^4$	12	2,01
Сталь мягкая	0,1C-0,1Si-0,4Mn	800	1100	200	
Пермаллой 78	78Ni-22Fe	$4 \cdot 10^3$	10^5	4	1,05
Пермаллой 45	45Ni-55Fe	$1,2 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$	5,6	1,60
Пермендюр	50Co-50Fe	500	$6 \cdot 10^3$	160	2,46
Алфер	87Fe-13Al	700	$3,7 \cdot 10^3$	53	1,2
Альсифер	85Fe-10Si-5Al	$3,6 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^6$	1,6	0,89
Кобальт	99Co	70	250	800	1,79
Никель	99Ni	110	600	56	0,61
Феррит Ni-Zn		10–2000		16–1600	0,1–0,4
Феррит Mn-Zn		$500–2 \cdot 10^4$		4–100	0,3–0,4

Рис. 1: Свойства магнитомягких ферромагнитных материалов

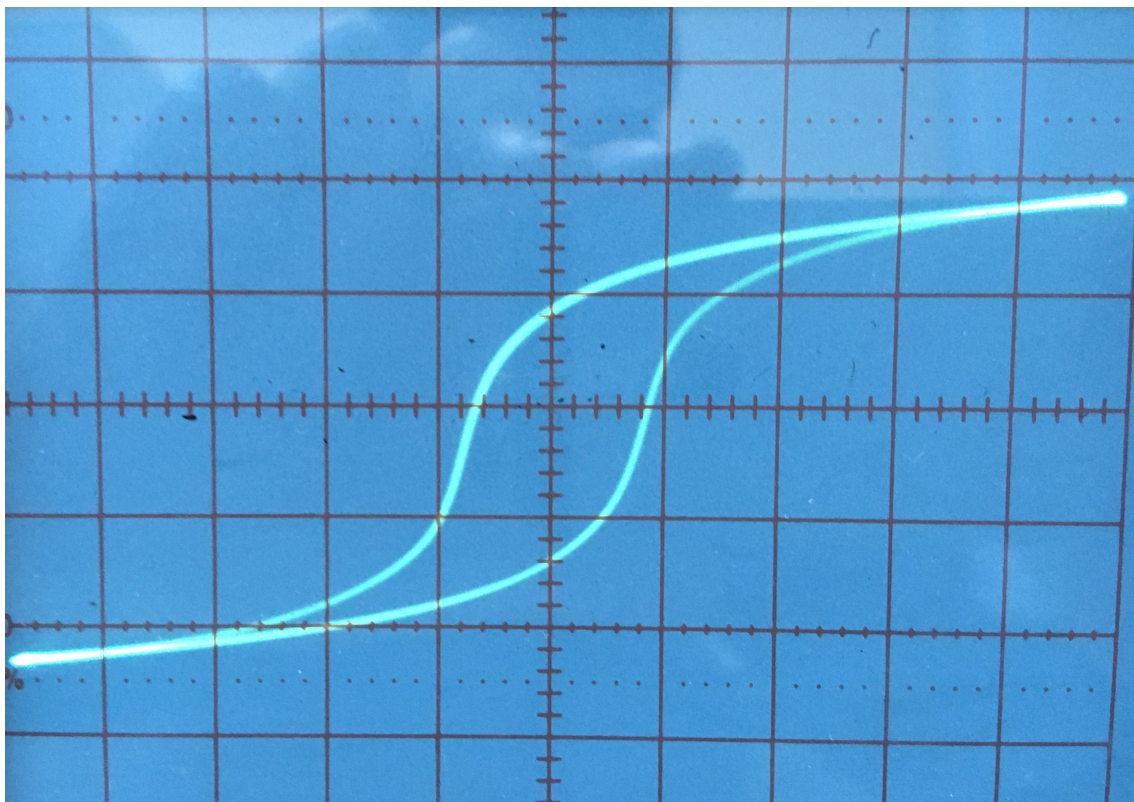


Рис. 2: Предельная петля гистерезиса феррита

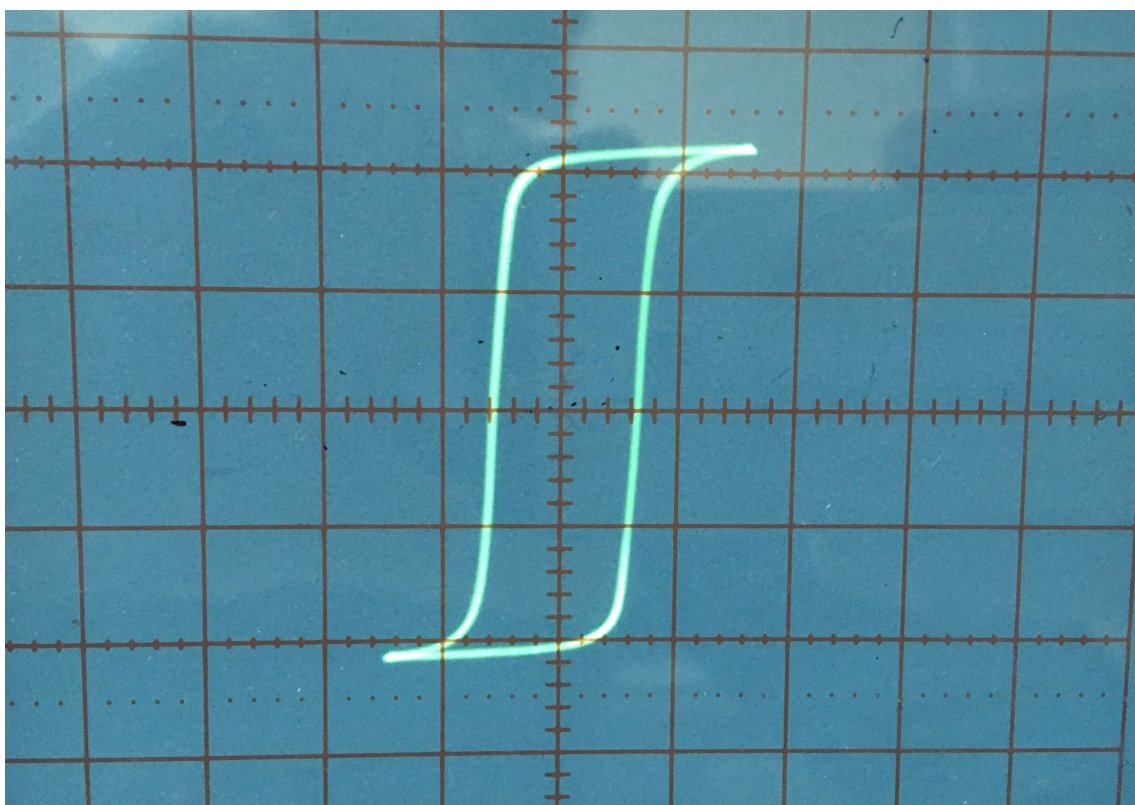


Рис. 3: Предельная петля гистерезиса пермаллоя

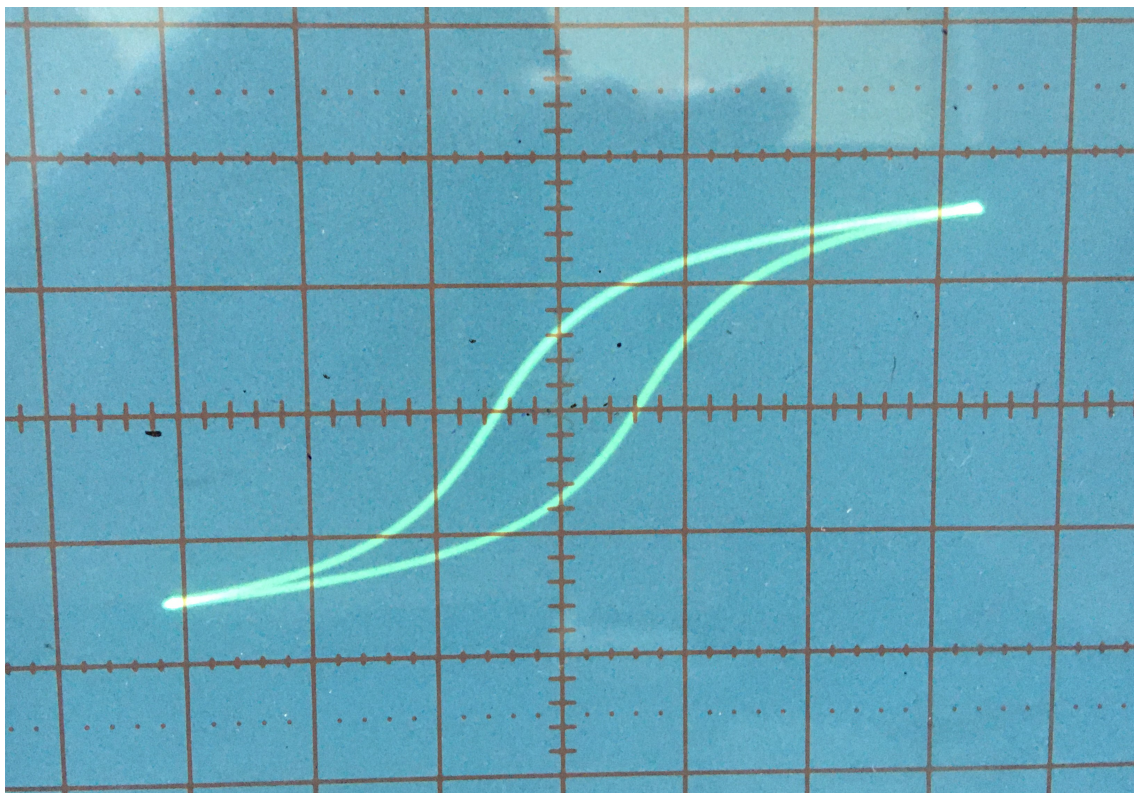


Рис. 4: Предельная петля гистерезиса кренистого железа

2.2. Проверка калибровки осциллографа

Проверим калибровку ЭО по оси Х. Отключим намагничивающую обмотку N_0 от цепи, соединив оба провода, идущих к обмотке, на одной ее клемме. С помощью автотрансформатора подберем такой ток через R_0 , при котором горизонтальная прямая занимает большую часть экрана. При $K_x = 0,1$ В/дел рассчитаем чувствительность $m_x = 0,098$ В/дел.

Аналогичные действия проводим при $K_x = 0,05$ В/дел. Получаем $m_x = 0,049$ В/дел.

Так как $m_x \approx K_x$, ЭО откалиброван по оси Х корректно.

Также необходимо проверить калибровку по оси Y. Для этого соединим вход Y ЭО с клеммам делителя "1:100 - земля". Не меняя рабочего коэффициента $K_y = 0,05$ В/дел, подберем с помощью трансформатора напряжение, при котором вертикальная прямая занимает большую часть экрана. Подключим вольтметр V к тем же клеммам делителя и, используя измеренное $U_{эф}$, рассчитаем чувствительность $m_y = 0,048$ В/дел.

Те же действия повторяем при $K_y = 0,02$ В/дел. Получаем $m_y = 0,019$ В/дел.

Так как $m_y \approx K_y$, ЭО откалиброван по оси Y корректно.

2.3. Определение 4τ - постоянной времени интегрирующей ячейки

Проверим применимость формулы (2). Для этого рассчитаем τ – постоянную времени RC -цепочки. Для определения напряжений на входе и выходе интегрирующей ячейки соединим вход ячейки с обмоткой «6,3 В» трансформатора. Подключим Y-вход ЭО ко входу интегрирующей ячейки и отключим X-вход ЭО. Подберем такой ток, чтобы вертикальная прямая занимала большую часть экрана, и определим входное напряжение $U_{вх} = 2y \cdot K_y = 5,6 \text{ дел} \cdot 1 \text{ В/дел} = 5,6 \text{ В}$. Не меняя тока, подключим Y-вход ЭО к выходу ячейки и аналогичным образом определим $U_{вых} = 2y \cdot K_y = 0,004 \text{ В}$. Рассчитаем $\tau_{\text{эксп}}$:

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

По определению $\tau_{RC} = R_{\text{и}} C_{\text{и}} = 0,4 \text{ с}$.

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

3. Вывод

Многие характеристики отличаются от справочных. Связано это, во-первых, с несовершенством исследуемого метода (например, снятия показаний с осциллографа), во-вторых, с разной концентрацией металлов в разных сплавах. Тем не менее, оценочно удалось определить некоторые магнитные параметры данного ряда веществ.

Ампл.	Феррит	Fe-Ni	Fe-Si
H_c , А/м	15 ± 0.1	30.1 ± 0.1	69.5 ± 0.2
	4 – 100	5.6	40
B_s , Тл	0.143 ± 0.005	1.45 ± 0.03	1.43 ± 0.03
	0.3 – 0.4	1.6	2.01
μ_{max}	290	3700	6800
	—	$(3.5) \cdot 10^3$	$7 \cdot 10^3$
$\mu_{\text{нач}}$	750	1300	430
	10 – 2000/500 – $2 \cdot 10^4$	$(1.2 - 4) \cdot 10^3$	500 - 9000

Таблица 2: Сводная таблица магнитных характеристик (табичные внизу)