

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

Лабораторная работа № 3.4.5

"ПЕТЛЯ ГИСТЕРЕЗИСА"

Выполнила студентка Б04-906

Прохорова Юлия

Долгопрудный, 2020 г.

1. Цель работы:

Изучение петель гистерезиса ферромагнитных материалов с помощью осциллографа

2. Оборудование:

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

3. Теоретическая часть

Изучение магнитной индукции в образцах. Магнитную индукцию удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при изменении магнитного потока Φ в катушке, намотанной на образец:

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

Пусть катушка плотно охватывает образец, и индукция B в образце-однородна. В этом случае

$$\Phi = BSN_{\text{и}}, \quad (2)$$

где $N_{\text{и}}$ число витков в измерительной катушке, а S - площадь витка. Используя (2) и (1) получаем:

$$|B| = \frac{1}{SN_{\text{и}}} \int \varepsilon dt \quad (3)$$

Таким образом, для определения B нужно проинтегрировать сигнал, наведенный меняющимся магнитным полем на измерительную катушку, намотанную на образец. Для интегрирования применяют интегрирующие схемы. RC-цепочка является таковой, если сопротивление резистора много больше сопротивления конденсатора (т.е. $U_{\text{вых}} \ll U_{\text{вх}}$). В самом деле:

$$U_{\text{вых}} = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I dt \simeq \frac{1}{RC} \int U_{\text{вх}} dt, \quad (4)$$

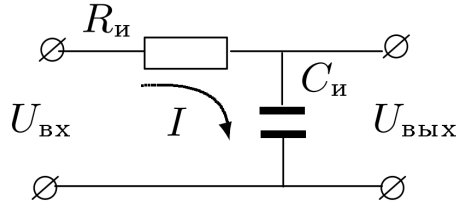


Рис. 1: Интегрирующая ячейка - RC-цепочка

Формула (4) тем ближе к истине, чем больше постоянная времени $\tau = RC$ превосходит время процесса. Для синусоидальных напряжений

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

где Ω - частота сигнала. Зная параметры интегрирующей цепочки, выразим B .

$$|B| = \frac{1}{SN_{\text{и}}} \int U_{\text{вх}} dt = \frac{R_{\text{и}}C_{\text{и}}}{SN_{\text{и}}} U_{\text{вых}}, \quad (6)$$

4. Экспериментальная установка

Схема установки изображена на рис. 2. Напряжение сети (220В , 50Гц) с помощью регулировочного автотрансформатора Ат через разделительный понжающий трансформатор Тр подается на намагниченную обмотку N_0 исследуемого образца. Действующее значение переменного тока в обмотке N_0 измеряется амперметром А. Последовательно с амперметром включено сопротивление R_0 , напряжение с которого подается на вход X электронного осциллографа.

Для измерения магнитной индукции B с измерительной обмотки $N_{\text{и}}$ на вход RC-цепочки подается напряжение $U_{\text{и}}(U_{\text{вх}})$, пропорциональное согласно (6) производной \dot{B} , а с интегрирующей ёмкости $C_{\text{и}}$ снимается напряжение $U_C(U_{\text{вых}})$, пропорциональное величине B , и подаётся на вход Y осциллографа.

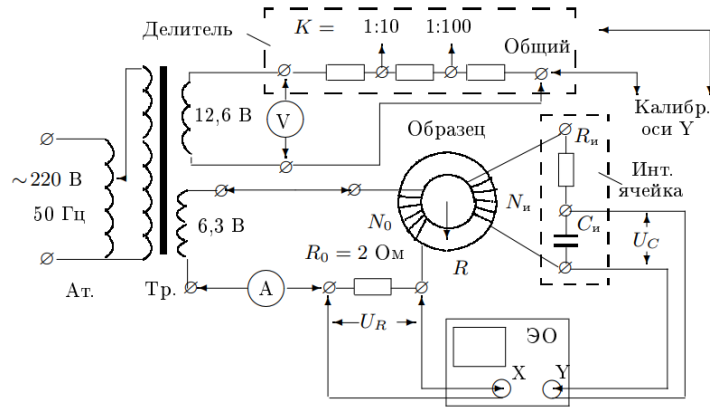


Рис. 2: Схема установки для исследования и намагничивания образцов

Замкнутая кривая, возникающая на экране, воспроизводит петлю гистерезиса. Но чтобы придать этой кривой количественный смысл, необходимо установить масштабы изображения (привести калибровку каналов X и Y ЭО).

Измерение напряжения с помощью осциллографа. Исследуемый сигнал подается на вход X . Удвоенная амплитуда напряжения характеризуется уравнением: $2U_{x,0} = 2xK_x$, x - отклонение от нуля, а K_x - чувствительность усилителя в В/дел.

Калибровка горизонтальной оси ЭО проводится при закороченной обмотке N_0 , тк эт обмотка с помещенным в нее ферромагнитным образцом является нелинейным элементом. Амперметр измеряет $I_{эфф}$, текущий через R_0 . Тогда измерив длину горизонтальной прямой на экране ЭО, можно рассчитать чувствительность:

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

Калибровка вертикальной оси проводится с помощью сигнала, снимаемого через делитель напряжения обмотки 12,6 В понижающего трансформатора. Вольтметр V измеряет напряжение $U_{эфф}$ на обмотке. Часть этого напряжения снимается делителя с коэффициентом деления K и подается на вход Y ЭО. Тогда измерив длину вертикальной прямой на экране ЭО, можно рассчитать чувствительность:

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

Здесь теристик должен быть отключен, так как несинусоидальный ток нагрузки в первичной обмотке N_0 приводит к искажению формы кривой напряжения на обмотке трансформатора, питающий делитель. Калибровку осей можно использовать для построения кривой гистерезиса в координатах B и H . H - рассчитываем из теоремы о циркуляции, B - из формулы (6).

Постоянную времени RC -цепочки можно определить экспериментально. С обмотки 6,3 B на вход интегрирующей цепочки подается синусоидальное напряжение $U_{\text{вх}}$. На вход Y поочередно подают $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}=U_c$ RC -цепочки. Тогда можно рассчитать постоянную времени:

$$\tau = RC = \frac{U_{\text{вх}}}{\Omega U_{\text{вых}}}, \quad (9)$$

5. Ход работы

- 1) Для 3-х образцов (феррит, пермаллой, кремистое железо) при помощи ЭО изучаем крайние точки петель гистерезиса. Предельную петлю определяем по появлению "усов затем, уменьшая ток, снимаем напряжения на подающем и интегрирующих контурах, соответствующие вершинам петель. Данные приведены в таблице

Феррит x	Феррит y	Пермаллой x	Пермаллой y	Железо x	Железо y
44	42	72	90	220	56
40	40	56	90	200	50
35	38	40	70	190	49
32	36	38	60	180	48
28	34	36	54	160	44
24	33	36	46	150	42
20	30	33	28	130	40
18	28	30	16	110	36
12	23	28	11	105	34
10	20	26	7.5	90	30
7	14	20	5	86	28
7	10	12.5	2	76	25
7	9	5	1	70	22
5	5	0	0	60	17.5
3	3			52	16
1	1			50	14
0	0			45	11
				36	9
				32	6
				28	5
				20	2.5
				10	0.5
				0	0

Таблица 1: Обработка данных с образцов

Из этих данных рассчитаем H , B и построим график зависимости $B(H)$ для образцов, которая будет представлять собой кривую намагничивания.

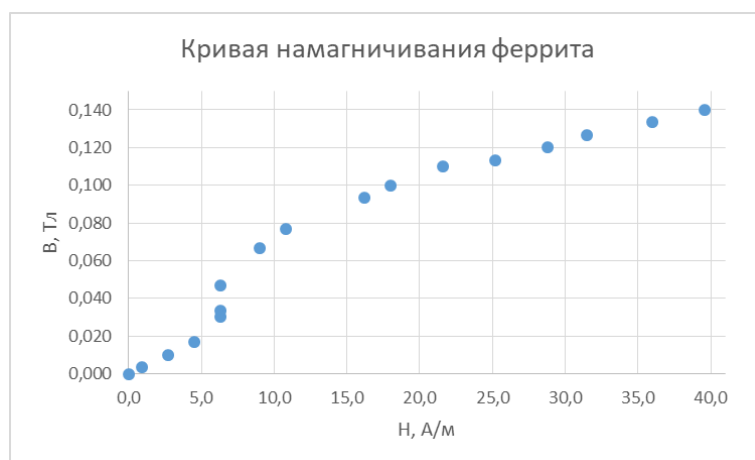


Рис. 3: Кривая намагничивания феррита

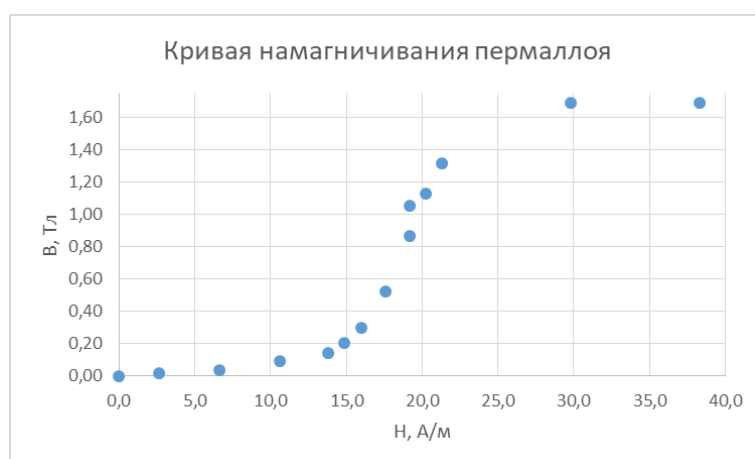


Рис. 4: Кривая намагничивания пермаллоя

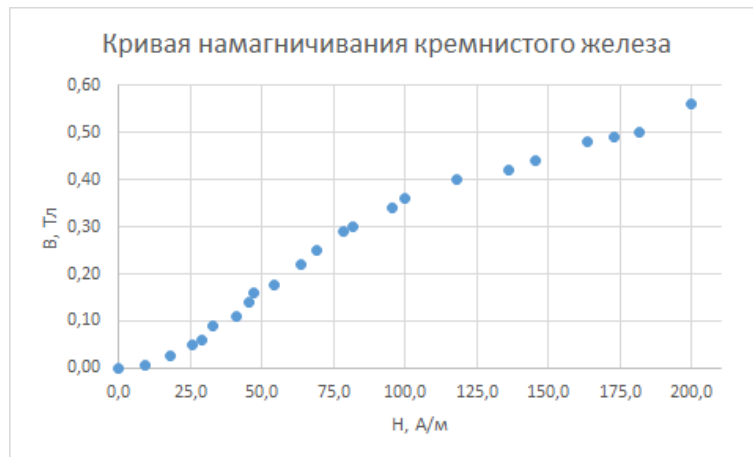


Рис. 5: Кривая намагничивания железа

- 2) Для каждого образца выберем ряд точек, с помощью оценим максимальновозможный коэффициент наклона $\frac{dB}{dH}$ в области насыщения и начального намагничивания. Зная значения наклона прямой гистерезиса и магнотной постоянной, можно найти значения магнитной проницаемости материалов:

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}, \quad (10)$$

где $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$.

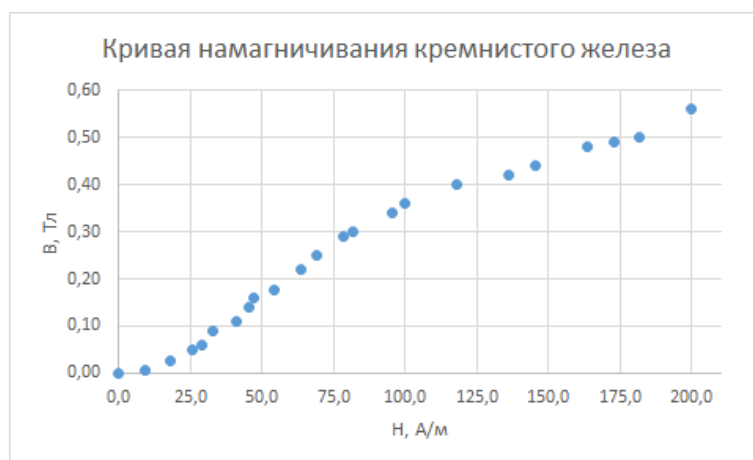


Рис. 6: Кривая намагничивания железа

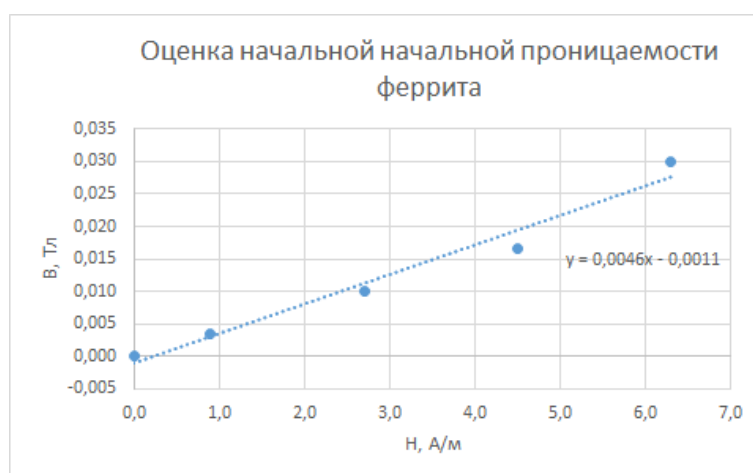


Рис. 7: Оценка магнитной проницаемости феррита

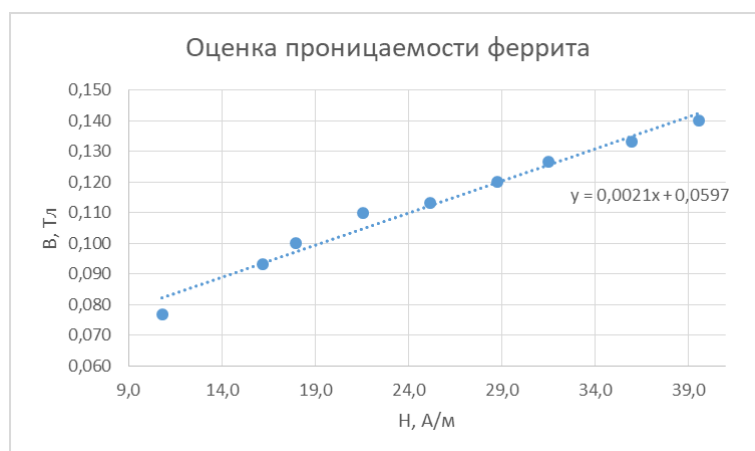


Рис. 8: Оценка магнитной проницаемости феррита

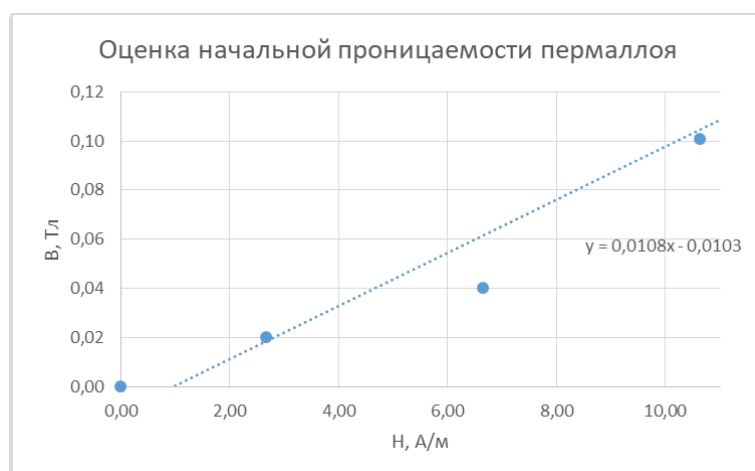


Рис. 9: Оценка магнитной проницаемости пермаллоя

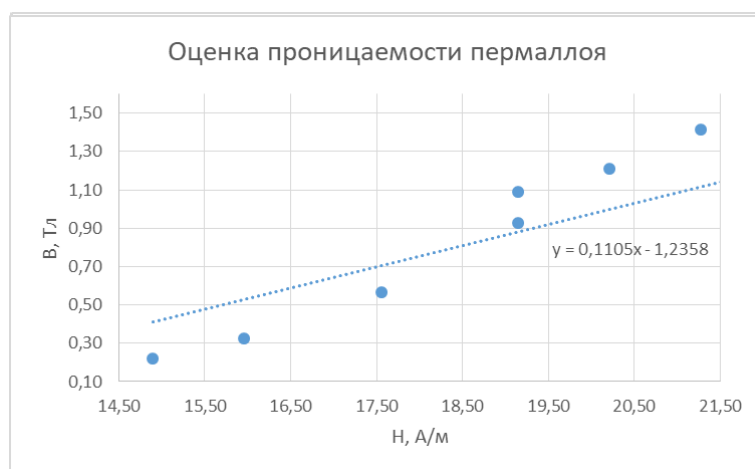


Рис. 10: Оценка магнитной проницаемости пермаллоя

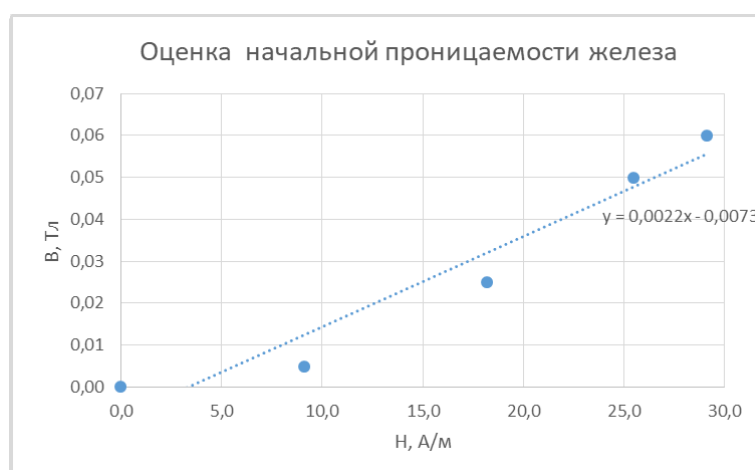


Рис. 11: Оценка магнитной проницаемости железа

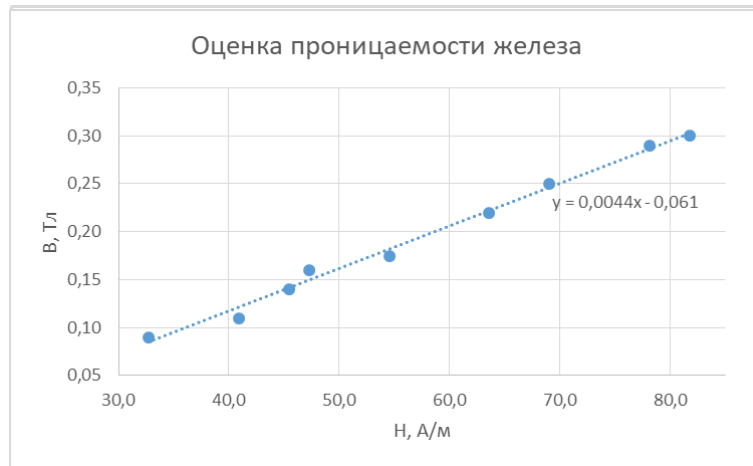


Рис. 12: Оценка магнитной проницаемости железа

- 3) Рассмотрим петлю гистерезиса в предельном положении. Координата предельной точки оси x будет соответствовать коэрцитивной силе H_c , а по оси y - индукции насыщения B_s .

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

$$B = \frac{R_n C_n}{SN} U_y \quad (12)$$

Занесем эти данные также в таблицу.

Образец	$k \cdot 10^{-3}$	$\mu_{max} \cdot 10^3 \text{Гн/м}$	$k \cdot 10^{-3}$	$\mu \cdot 10^3 \text{Гн/м}$	$B_c \text{Тл}$	$H_c \text{А/м}$
Феррит	4.6	3.65	2.1	1.6	0.14	7.2
Пермаллой	110.5	87.7	10.8	8.6	1.8	25.5
Кремнистое железо	4.4	3.5	2.2	1.7	0.6	54.6

Таблица 2: Обработка данных с образцов

- 4) Рассчитаем чувствительности по осям. Начнем с канала X .

$$m_x = \frac{2R_0 \sqrt{2} I_{\text{эфф}}}{2x} = 19 \text{мВ} \quad (13)$$

Здесь $R_0 = 0.2 \text{ Ом}$, $I_{\text{эфф}} = 0.273 \text{ А}$, $2x = 8$. На ЭО чувствительность $K_x = 20 \text{ мВ}$. Тогда $\Delta m_x/m_x = 5\%$

Чувствительность канала Y :

$$m_y = \frac{2\sqrt{2}KU_{\text{эфф}}}{2y} = 49 \text{ мВ} \quad (14)$$

Здесь $U_{\text{эфф}} = 135 \text{ мВ}$, $2y = 7.8$. Тогда $\Delta m_y/m_y = 2\%$

5) Рассчитаем постоянную времени.

$$\tau = \frac{U_{\text{вх}}}{\Omega U_{\text{вых}}} = 0.38 \text{ с} \quad (15)$$

Здесь $U_{\text{вх}} = 600 \text{ мВ}$, $U_{\text{вых}} = 5 \text{ мВ}$, $\Omega = 2\pi \cdot 50 \text{ Гц}$.

Сравним с расчетами по формуле $\tau = RC = 0.4 \text{ с}$.

Здесь $R = 20 \text{ кОм}$, $C = 20 \text{ мкФ}$. Тогда $\Delta \tau/\tau = 5\%$

6. Вывод

Сравним полученные значения с табличными.

Образец	$\mu_{\text{max}}, 10^3 \text{ Гн/м}$	$\mu, 10^3 \text{ Гн/м}$	$B_c, \text{ Тл}$	$H_c, \text{ А/м}$
Феррит	3.65	1.6	0.14	7.2
Пермаллой	87.7	8.6	1.8	25.5
Кремнистое железо	3.5	1.7	0.6	54.6
Феррит, табл		0.01 - 20	0.1 - 0.4	4 - 1600
Пермаллой, табл	100	4	1.05	4
Кремнистое железо, табл	7	0.5	2	12

Таблица 3: Сравнительная таблица

Как видно из таблицы, характерные максимальные и начальные значения магнитной проницаемости согласуются с табличными. Для B_c и H_c совпадение наблюдается только для образца феррита. Значение индукции других образцов близки по порядку, а вот коэрцитивной силы разнятся. Итоговые различия можно связать с неточным получением

предельных петель, расплывчатостью картинки.

В ходе лабораторной работы

- 1) Изучили явление петли гистерезиса на примере трех тороидальных образцов из различных ферромагнетиков.
- 2) Получили оценки максимальных значений магнитной проницаемости материалов.
- 3) Получили значения коэрцитивной силы и индукции насыщения.