

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа прикладной математики и информатики

Отчёт о выполнении лабораторной работы 3.4.5

Петля гистерезиса (динамический метод)

Соболевский Федор Александрович
Б05-111

Декабрь 2022

1 Аннотация

В данной работе при помощи электронного осциллографа исследовались предельные петли гистерезиса и начальные кривые намагничивания для нескольких ферромагнитных образцов, были определены магнитные характеристики материалов, чувствительность каналов X и Y осциллографа и постоянная времени τ интегрирующей ячейки.

2 Теоретические сведения

Основные характеристики ферромагнетиков — их коэрцитивное поле H_c , магнитная проницаемость μ , рассеиваемая в виде тепла при перемагничивании мощность — зависят от частоты перемагничивающего поля. В данной работе кривые гистерезиса ферромагнитных материалов изучаются в поле частоты $\nu_0 = 50 \text{ Гц}$ с помощью электронного осциллографа.

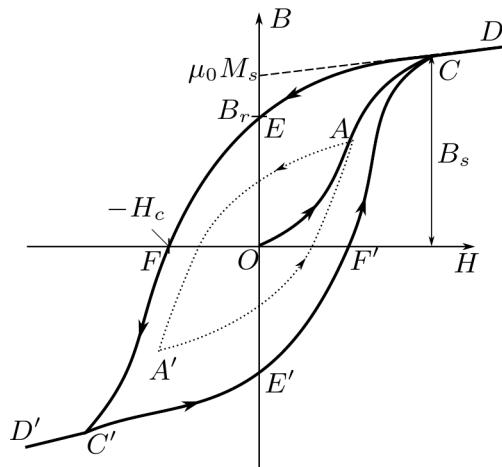


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

Магнитная индукция B и напряжённость поля H в ферромагнитном материале неоднозначно связаны между собой: индукция зависит не только от напряжённости, но и от предыстории образца. Связь между B и H типичного ферромагнетика иллюстрирует рис. 1.

Если к ферромагнитному образцу прикладывать переменное внешнее магнитное поле, то его состояние на плоскости $B - H$ будет изменяться по замкнутой кривой — петле гистерезиса. Размер петли определяется максимальным значением напряжённости H в цикле (например, петля AA' , обозначенная пунктиром на рис. 1). Если амплитуда напряжённости достаточно велика, то образец будет периодически достигать насыщения, что на рисунке соответствует кривой $CEFC'E'F'C$ (предельная петля гистерезиса). Пересечение предельной петли с вертикальной осью соответствует остаточной индукции B_r , пересечение с горизонтальной осью — коэрцитивному полю H_c . Крайние точки петель, соответствующие амплитудным значениям H (например, точка A на рис. 1), лежат на начальной кривой намагничивания (OAC).

2.1 Измерение магнитной индукции

Магнитную индукцию B удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при изменении магнитного потока Φ в катушке, намотанной на образец. Пусть катушка с N витками плотно охватывает образец сечением S , и индукция B в образце однородна. Тогда

$$|B| = \frac{1}{SN} \int \mathcal{E} dt.$$

Для интегрирования в работе используется интегрирующая RC -цепочка (рис. 2). «Входное» напряжение от источника $U_{\text{вх}}(t)$ подаётся на последовательно соединённые резистор R_i и конденсатор C_i . «Выходное» напряжение $U_{\text{вых}}(t)$ снимается с конденсатора. Предположим, что 1) сопротивление источника мало по сравнению с R_i , 2) выходное сопротивление (сопротивление на входе осциллографа), напротив, велико: $R_{\text{вых}} \gg R_i$ и, наконец, 3) сопротивление R_i достаточно велико, так что почти всё падение напряжения приходится на него, а $U_{\text{вых}} \ll U_{\text{вх}}$. В таком случае ток цепи равен $I = (U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}})/R_i \approx U_{\text{вх}}/R_i$, и входное и выходное сопротивление связаны соотношением

$$U_{\text{вых}} = \frac{q}{C_i} = \frac{1}{C_i} \int_0^t Idt \approx \frac{1}{\tau_i} \int_0^t U_{\text{вх}} dt, \quad (1)$$

где $\tau_i = R_i C_i$ - постоянная времени RC -цепочки. Для индукции поля из (2.1) получаем

$$|B| = \frac{1}{SN} \int U_{\text{вх}} dt = \frac{\tau_i}{SN} U_{\text{вх}}. \quad (2)$$

Замечание. Уточним критерий применимости соотношения (1). Пусть на вход интегрирующей ячейки подан синусоидальный сигнал с частотой ω_0 . Тогда, пользуясь методом комплексных амплитуд, нетрудно найти отношение амплитуд входного и выходного напряжений:

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1/\omega_0 C}{\sqrt{R^2 + 1/(\omega_0 C)^2}}.$$

Тогда неравенство $U_{\text{вых}} \ll U_{\text{вх}}$ реализуется, если

$$\tau \equiv RC \gg \frac{1}{\omega_0} \quad (3)$$

(импеданс конденсатора мал по сравнению сопротивлением резистора). В таком случае для синусоидального сигнала имеем

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \approx \frac{1}{\omega_0 \tau}. \quad (4)$$

В общем случае, если ω_0 — частота самой низкой гармоники в спектре произвольного входного сигнала, то при $\omega_0 \tau \gg 1$ неравенство $U_{\text{вых}} \ll U_{\text{вх}}$ выполняется на любой частоте $\omega > \omega_0$.

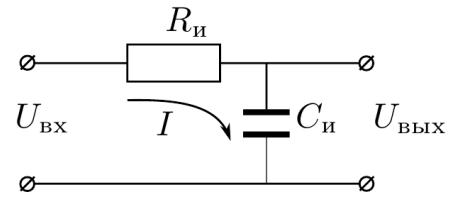


Рис. 2: Интегрирующая ячейка

2.2 Экспериментальная установка

Схема установки изображена на рис. 3. Напряжение сети (220 В , 50 Гц) с помощью трансформаторного блока T , состоящего из регулировочного автотрансформатора и разделительного понижающего трансформатора, подаётся на намагничивающую обмотку N_0 исследуемого образца.

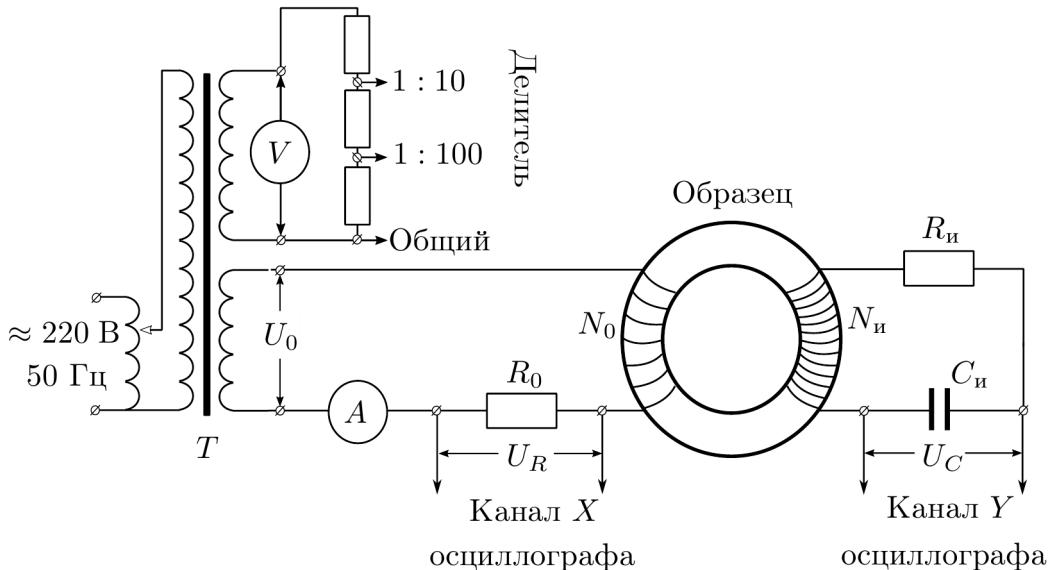


Рис. 3: Схема установки для исследования намагничивания образцов

В цепь намагничивающей катушки, на которую подаётся некоторое напряжение U_0 , последовательно включено сопротивление R_0 . Напряжение на R_0 , равное $U_R = R_0 I_0$, где I_0 — ток в намагничивающей обмотке N_0 , подаётся на канал X осциллографа. Связь напряжённости H в образце и тока I_0 рассчитывается по теореме о циркуляции. Действующее значение переменного тока в обмотке N_0 измеряется амперметром А. Для измерения магнитной индукции B с измерительной обмотки N_i на вход RC -цепочки подаётся напряжение U_i ($U_{\text{вх}}$), пропорциональное производной dB/dt . С интегрирующей ёмкостью C_i снимается напряжение U_C ($U_{\text{вых}}$), пропорциональное величине B , и подаётся на вход Y осциллографа. Значение индукции поля B рассчитывается по формуле (2). Замкнутая кривая, возникающая на экране, воспроизводит в некотором масштабе (различном для осей X и Y) петлю гистерезиса. Пример изображения предельной петли гистерезиса на осциллографе представлен на рис. 4. Чтобы придать этой кривой количественный смысл, необходимо установить масштабы изображения, т. е. провести калибровку каналов X и Y осциллографа.

3 Оборудование и инструментальные погрешности

В работе использовались: автотрансформатор, понижающий трансформатор, интегрирующая цепочка, амперметр, вольтметр, электронный осциллограф, делитель напряжения, торoidalные образцы с двумя обмотками.

Инструментальные погрешности:

- **Амперметр:** $\delta_U = \delta_I = 1\%$;
- **Осциллограф:** чувствительность осциллографа определяется в ходе работы для каждого значения масштаба.

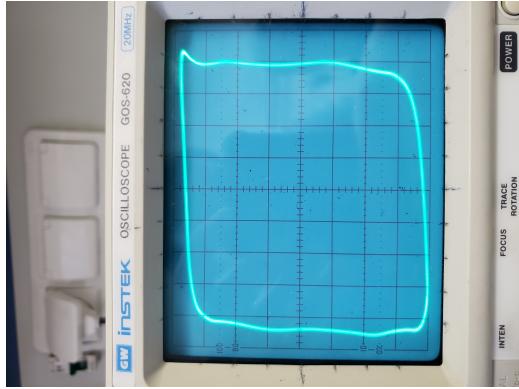


Рис. 4: Предельная петля гистерезиса пермаллоя

4 Результаты измерений и обработка экспериментальных данных

Параметры установки: $R_0 = 0,2 \text{ Ом}$, $R_u = 20 \text{ кОм}$, $C_u = 20 \text{ мкФ}$.

	Кремнистое железо	Пермаллой	Феррит
N_0 , витков	20	15	45
N_U , витков	200	300	400
$S, \text{см}^2$	2	0,66	3
$2\pi R, \text{см}$	11	14,1	25

Таблица 1: Характеристики исследуемых образцов

Если известна чувствительность канала K_x в [В/дел], то удвоенная амплитуда напряжения определяется произведением

$$2U_{x_0} = 2x \cdot K_x.$$

Напряжение, подаваемое на вход Y определяется аналогично.

Калибровку осей осциллографа 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 $K_{I_x} = \frac{K_x}{R_0}$ [А/дел], а затем по формуле

$$H = \frac{IN_0}{2\pi R} = \frac{K_x N_0}{2\pi R R_0} \quad (5)$$

определить цену деления шкалы в [А/м]. Используя формулу

$$B = \frac{R_u C_u U_{\text{вых}}}{S N_U} \quad (6)$$

можно рассчитать цену деления вертикальной шкалы в [Тл].

4.1 Кремнистое железо

Измерения проводились при следующих параметрах: $K_x = 10 \text{ мВ/дел}$, $K_y = 5 \text{ мВ/дел}$, $I_{\text{эф}} = 141,4 \pm 1,4 \text{ мА}$, $U = 4,96 \pm 0,01 \text{ В}$. Результаты измерений:

$$2X_s = 87 \text{ мВ}$$

$$2Y_s = 23 \text{ мВ}$$

$$2X_c = 14 \text{ мВ}$$

$$2Y_r = 19 \text{ мВ}$$

По формулам (5) и (6) рассчитаем амплитуду H_{max} колебаний напряжённости поля в тороиде, соответствующую состоянию насыщения (предельная петля), индукцию насыщения образца B_s , коэрцитивное поле H_c и остаточную индукцию B_r . Полученные значения:

$$H_{max} = 581,8 \pm 9,1 \text{ А/м}$$

$$B_s = 1,00 \pm 0,12 \text{ Тл}$$

$$H_c = 86,4 \pm 0,5 \text{ А/м}$$

$$B_r = 0,4 \pm 0,03 \text{ Тл}$$

Результаты измерения начальной кривой намагничивания представлены на графике 5.

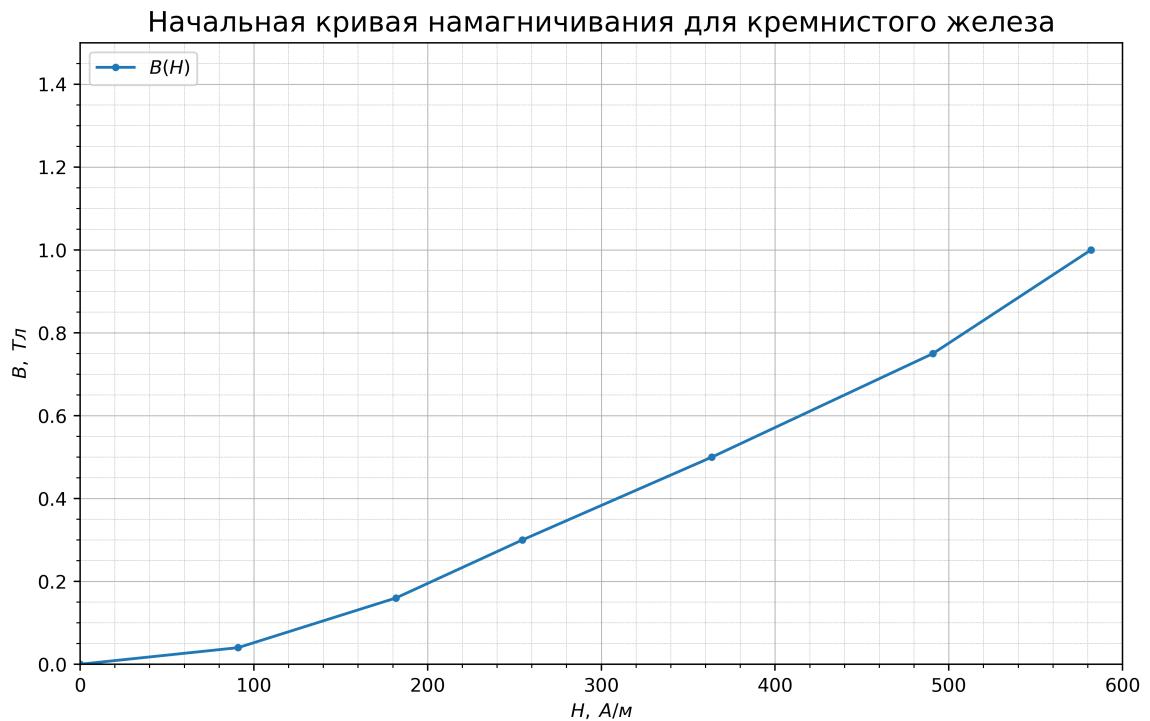


Рис. 5: Начальная кривая намагничивания для кремнистого железа в координатах $B(H)$

Начальное и максимальное значения дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\partial u\phi}$ совпадают и равны $\mu_{\partial u\phi} = 2500 \pm 300$.

4.2 Пермаллой

Измерения проводились при следующих параметрах: $K_x = 10 \text{ мВ/дел}$, $K_y = 20 \text{ мВ/дел}$, $I_{\text{эф}} = 168,3 \pm 1 \text{ мА}$, $U = 5,13 \pm 0,01 \text{ В}$. Результаты измерений:

$$2X_s = 90 \pm 10 \text{ мВ}$$

$$2Y_s = 160 \pm 10 \text{ мВ}$$

$$2X_c = 84 \pm 5 \text{ мВ}$$

$$2Y_r = 152 \pm 10 \text{ мВ}$$

По формулам (5) и (6) рассчитаем амплитуду H_{max} колебаний напряжённости поля в тороиде, соответствующую состоянию насыщения (предельная петля), индукцию насыщения образца B_s , коэрцитивное поле H_c и остаточную индукцию B_r . Полученные значения:

$$H_{max} = 30,6 \pm 2,6 \text{ А/м}$$

$$B_s = 1,8 \pm 0,1 \text{ Тл}$$

$$H_c = 28,9 \pm 2,5 \text{ А/м}$$

$$B_r = 1,7 \pm 0,1 \text{ Тл}$$

Результаты измерения начальной кривой намагничивания представлены на графике 6.



Рис. 6: Начальная кривая намагничивания для пермаллоя в координатах $B(H)$

Начальное значение дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}} = 30000 \pm 5000$. Максимальное значение равно $\mu_{\text{диф}} = 334225 \pm 60000$.

4.3 Феррит

Измерения проводились при следующих параметрах: $K_x = 5 \text{ мВ/дел}$, $K_y = 5 \text{ мВ/дел}$, $I_{\text{эф}} = 27 \pm 1 \text{ мА}$, $U = 5, 11 \pm 0, 01 \text{ В}$. Результаты измерений:

$$2X_s = 15 \pm 10 \text{ мВ}$$

$$2Y_s = 25 \pm 5 \text{ мВ}$$

$$2X_c = 10 \pm 2 \text{ мВ}$$

$$2Y_r = 14, 5 \pm 5 \text{ мВ}$$

По формулам (5) и (6) рассчитаем амплитуду H_{max} колебаний напряжённости поля в тороиде, соответствующую состоянию насыщения (предельная петля), индукцию насыщения образца B_s , коэрцитивное поле H_c и остаточную индукцию B_r . Полученные значения:

$$H_{max} = 45, 0 \pm 4, 5 \text{ А/м}$$

$$B_s = 0, 16 \pm 0, 01 \text{ Тл}$$

$$H_c = 30, 0 \pm 0, 9 \text{ А/м}$$

$$B_r = 0, 09 \pm 0, 01 \text{ Тл}$$

Результаты измерения начальной кривой намагничивания представлены на графике 7.



Рис. 7: Начальная кривая намагничивания для феррита в координатах $B(H)$

Начальное и максимальное значения дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\partial u\phi}$ совпадают и равны $\mu_{\partial u\phi} = 6000 \pm 500$.

4.4 Проверка калибровки осциллографа

Для $K_x = 5 \text{ мВ/дел}$:

$$m_x = \frac{2\sqrt{2} \cdot 0,2 \cdot 0,086}{10} = 48,6 \pm 0,5 \text{ мВ/дел.}$$

Для $K_x = 10 \text{ мВ/дел}$:

$$m_x = \frac{2\sqrt{2} \cdot 0,2 \cdot 0,102}{6} = 9,8 \pm 0,1 \text{ мВ/дел.}$$

Для $K_y = 20 \text{ мВ/дел}$:

$$m_y = 2\sqrt{2} \cdot \frac{U_{\phi}}{2y} = \frac{2\sqrt{2} \cdot 0,054}{8} = 19 \pm 1 \text{ мВ/дел.}$$

Для $K_y = 5 \text{ мВ/дел}$:

$$m_y = \frac{2\sqrt{2} \cdot 0,01}{6} = 4,95 \pm 0,05 \text{ мВ/дел.}$$

Калибровка выполнена с достаточной точностью.

4.5 Определение параметров RC -ячейки

С помощью формул (3) и (4) определим теоретически и экспериментально значение τ_c

$K_x = 1 \text{ В/дел}, x = 4,5 \pm 1 \text{ дел}, U_{ex} = 2x \cdot K_x = 9 \pm 2 \text{ В};$

$K_y = 5 \text{ мВ/дел}, y = 7 \pm 1 \text{ дел}, U_{ey} = 2y \cdot K_y = 0,07 \pm 0,013 \text{ В.}$

$$\tau_{\text{эксп}} = \frac{U_{ex}}{\omega U_{ey}} = 0,42 \pm 0,05 \text{ с.}$$

$$\tau_{\text{теор}} = R_u C_u = 0,4 \text{ с.}$$

5 Обсуждение результатов и выводы

В данной работе были исследованы предельные петли гистерезиса и начальные кривые намагничивания для 3 ферромагнитных образцов. Были определены магнитные характеристики материалов, а также некоторые параметры установки. Результаты измерений в сравнении с табличными значениями представлены в таб. 2.

	Ампл.	Кремнистое железо	Пермаллой	Феррит
эксп табл	H_c , А/м	$86,4 \pm 0,5$	$28,9 \pm 2,5$	$30,0 \pm 0,9$
		100	11–40	20
эксп табл	B_s , Тл	$1 \pm 0,12$	$1,8 \pm 0,1$	$0,16 \pm 0,01$
		2	1,5	0,15
эксп табл	$\mu_{\text{диф}}$	2500 ± 300	30000 ± 5000	6000 ± 500
		20000	8000–35000	10000

Таблица 2: Сравнение полученных значений с табличными

Многие полученные значения существенно отличаются от табличных. Это может быть связано с несовершенством методики измерений, а также расположением элементов установки друг относительно друга. Например, очень большие отклонения полученных значений $\mu_{\text{диф}}$ могут быть связаны с невозможностью достаточно точно промерить кривую намагничивания. Однако, удалось оценочно определить некоторые магнитные параметры и получить примерные кривые намагничивания.

Также в данной работе была проверена калибровка осциллографа и определена постоянная времени τ RC -цепочки. По результатам измерений было получено, что калибровка осциллографа выполнена с достаточной точностью. Значение τ , рассчитанное экспериментально, согласуется с рассчитанным теоретически в рамках погрешности.

Выводы: в ходе данной работы удалось экспериментально гистерезиса для нескольких образцов ферромагнетиков. Были вычислены верные по порядку значения магнитной проницаемости, коэрцитивного поля и остаточной индукции для материалов образцов. Проверено, что осциллограф даёт достаточную точность для измерения параметров петли гистерезиса. Установлено, что применённая в работе экспериментальная установка даёт недостаточную точность для количественного измерения характеристик ферромагнетиков, но даёт качественно про наблюдать явление гистерезиса.