МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Лабораторная работа 3.4.5

Петля гистерезиса (динамический метод)

Выполнил:

Гисич Арсений

Б03-102

Долгопрудный

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 $\nu_0 = 50$ *Гц* с помощью электронного осциллографа.

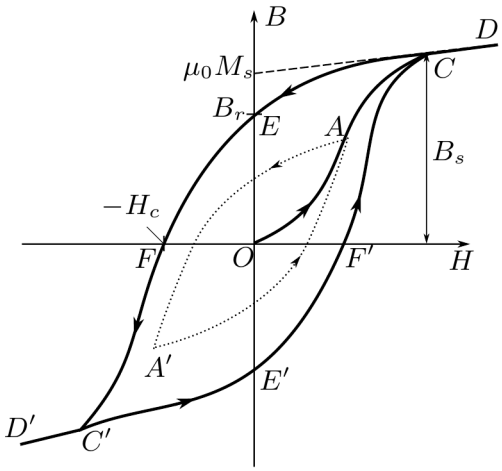

Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

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).

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 $R_{\text{и}}$ и конденсатор $C_{\text{и}}$. «Выходное» напряжение $U_{\text{вых}}(t)$ снимается с конденсатора. Предположим, что 1) сопротивление источника мало по сравнению с $R_{\text{и}}$, 2) выходное сопротивление (сопротивление на входе осциллографа), напротив, велико: $R_{\text{вых}} \gg R_{\text{и}}$ и, наконец, 3) сопротивление $R_{\text{и}}$ 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 = ($U_{\text{вх}}$ - $U_{\text{вых}}$)/$R_{\text{и}}$ $\approx U_{\text{вх}}/R_{\text{и}}$, и входное и выходное сопротивление связаны соотношением

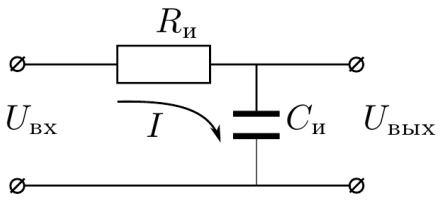

Рис. 2: Интегрирующая ячейка

$$U_{\text{вых}} = \frac{q}{C_{\text{и}}} = \frac{1}{C_{\text{и}}}\int\limits_0^t Idt \approx \frac{1}{\tau_{\text{и}}}\int\limits_0^t U_{\text{вх}}dt, \tag{1}$$

где $\tau_{\text{и}} = R_{\text{и}}C_{\text{и}}$ - постоянная времени RC - цепочки. Для индукции поля из (2) получаем

$$|B| = \frac{1}{SN}\int U_{\text{вх}}dt = \frac{\tau_{\text{и}}}{SN}U_{\text{вых}}. \tag{2}$$

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

$$\tau \equiv RC \gg \frac{1}{\omega_0}$$

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

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \approx \frac{1}{\omega_0\tau}.$$

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 $\omega > \omega_0$.

3 Методика измерений

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

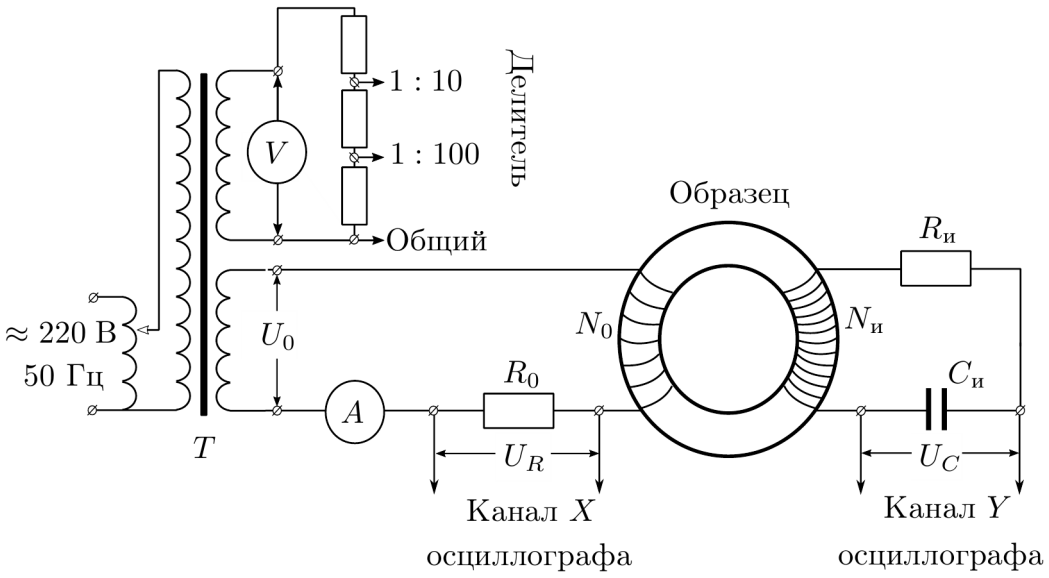

Рис. 3: Схема установки для исследования намагничивания образцов

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 A. Для измерения магнитной индукции B с измерительной обмотки $N_и$ на вход RC-цепочки подаётся напряжение $U_и$ ($U_{вх}$), пропорциональное производной dB/dt. С интегрирующей ёмкости $C_и$ снимается напряжение U_C ($U_{вых}$), 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. Чтобы придать этой кривой количественный смысл, необходимо установить масштабы изображения, т. е. провести калибровку каналов X и Y осциллографа.

4 Используемое оборудование

1. автотрансформатор;
2. понижающий трансформатор;
3. интегрирующая цепочка;
4. амперметр;
5. вольтметр;
6. электронный осциллограф;
7. делитель напряжения;
8. тороидальные образцы с двумя обмотками.

5 Результаты измерений и обработка данных

Параметры установки:

$R_0 = 0,2\ Ом$

$R_u = 20\ кОм$

$C_u = 20\ мкФ$

	Кремнистое железо	Пермаллой	Феррит
N_0, витков	20	15	45
N_U, витков	200	300	400
S, $см^2$	2	0,66	3,0
$2\pi R$, 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

$$2U_{x0} = 2x \cdot K_x.$$

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 $K_{xI} = \frac{K_x}{R_0}$ [А/дел], а затем по формуле

$$H = \frac{IN_0}{2\pi R} = \frac{K_x N_0}{2\pi R R_0} \tag{3}$$

определить цену деления шкалы в [А/м].

Использую формулу

$$B = \frac{R_u C_u U_{вых}}{S N_U} \tag{4}$$

можно рассчитать цену деления вертикальной шкалы в [Тл].

5.1 Кремнистое железо

Измерения проводились при следующих параметрах:

$K_x = 0,2\ В/дел$

$K_y = 50\ мВ/дел$

$I_{эф} = 2,13 \pm 0,01\ А$

$U = 4,96 \pm 0,01\ В$

Результаты измерений:

$2X_s = 1,28 \pm 0,02\ В$

$2Y_s = 200 \pm 10\ мВ$

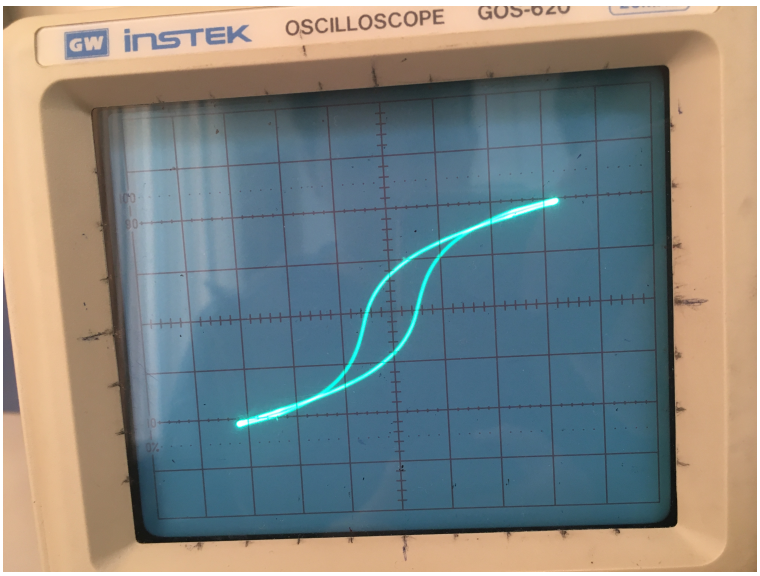

Рис. 4: Предельная петля гистерезиса кремнистого железа

$2X_c = 190 \pm 10$ *мВ*

$2Y_r = 80 \pm 5$ *мВ*

По формулам (3) и (4) 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:

$H_{max} = 581,8 \pm 9,1$ *А/м*

$B_s = 1,00 \pm 0,12$ *Тл*

$H_c = 86,4 \pm 0,5$ *А/м*

$B_r = 0,4 \pm 0,03$ *Тл*

Результаты измерения начальной кривой намагничивания представлены на графике 5.

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

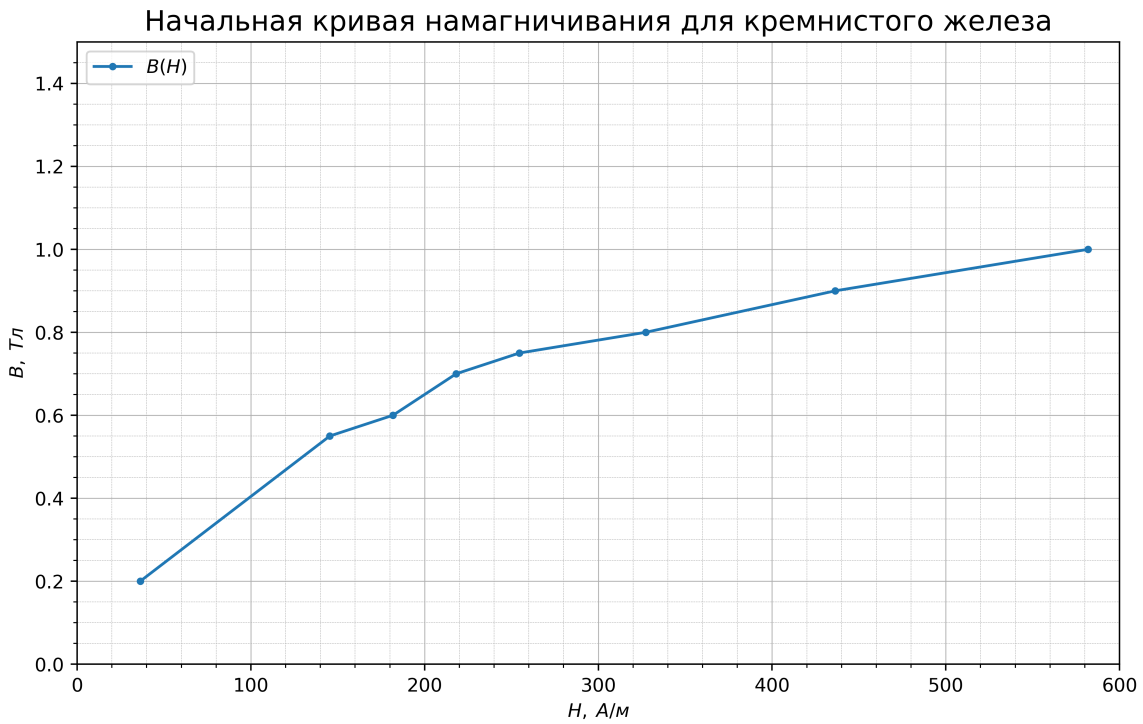

Рис. 5: Начальная кривая намагничивания для кремнистого железа в координатах $B(H)$

5.2 Пермаллой

Измерения проводились при следующих параметрах:

$K_x = 50\ мВ/дел$

$K_y = 50\ мВ/дел$

$I_{эф} = 202 \pm 1\ мА$

$U = 5,13 \pm 0,01\ В$

Результаты измерений:

$2X_s = 115 \pm 10\ мВ$

$2Y_s = 180 \pm 10\ мВ$

$2X_c = 90 \pm 5\ мВ$

$2Y_r = 165 \pm 10\ мВ$

По формулам (3) и (4) 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:

$H_{max} = 30,6 \pm 2,6\ А/м$

$B_s = 1,8 \pm 0,1\ Тл$

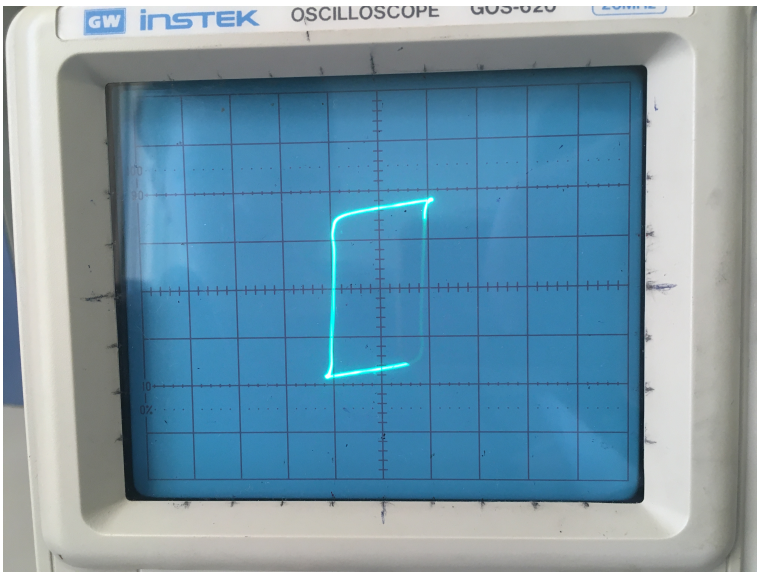

Рис. 6: Предельная петля гистерезиса пермаллоя

$H_c = 23,9 \pm 2,5\ A/м$

$B_r = 1,7 \pm 0,1\ Тл$

Результаты измерения начальной кривой намагничивания представлены на графике 7.

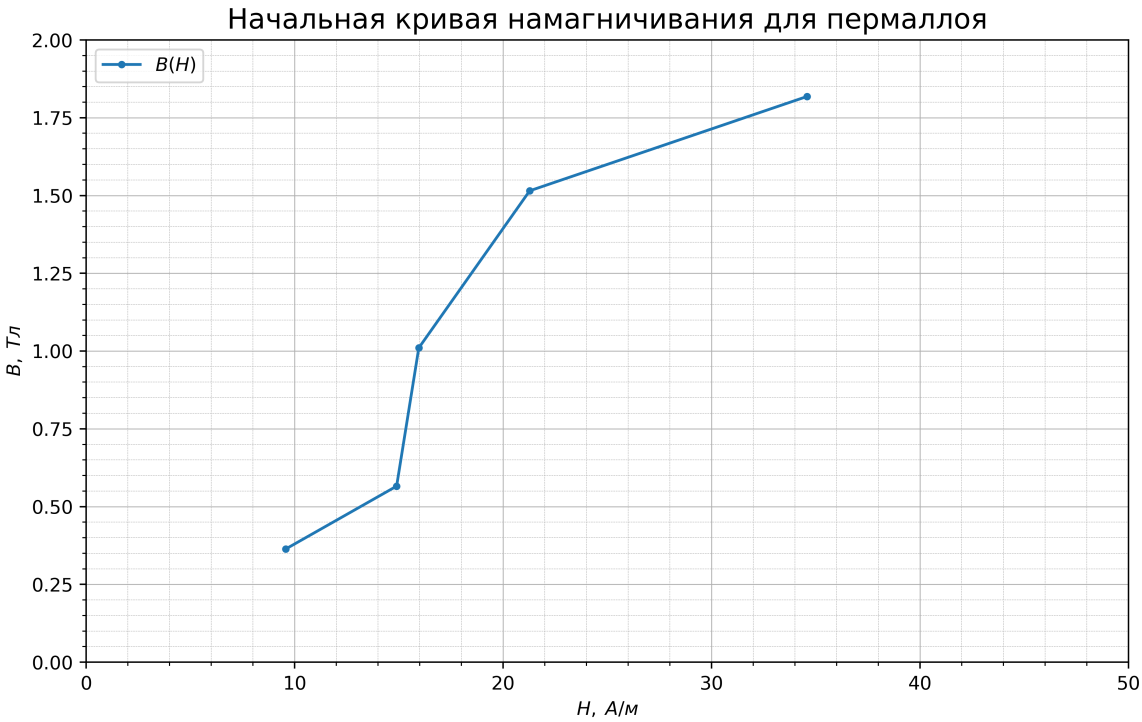

Рис. 7: Начальная кривая намагничивания для пермаллоя в координатах $B(H)$

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

5.3 Феррит

Измерения проводились при следующих параметрах:

$K_x = 20\ мВ/дел$

$K_y = 20\ мВ/дел$

$I_{эф} = 141 \pm 1\ мА$

$U = 5,11 \pm 0,01\ В$

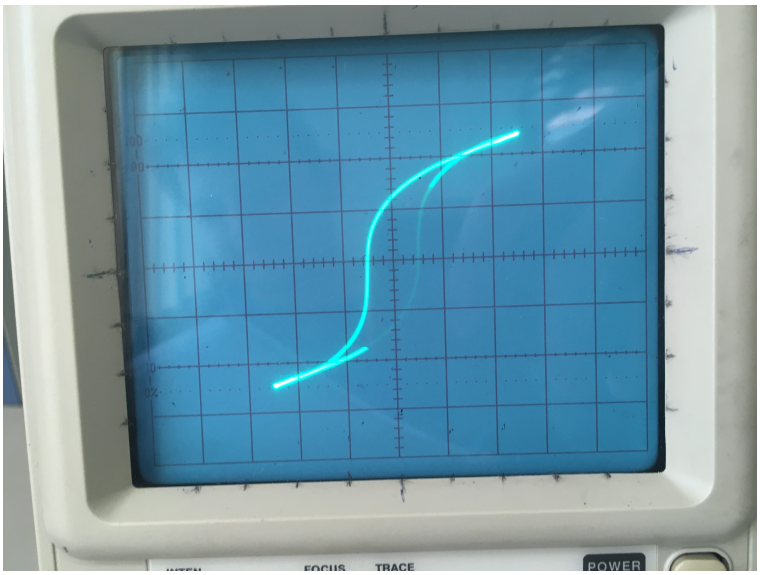

Рис. 8: Предельная петля гистерезиса феррита

Результаты измерений:

$2X_s = 100 \pm 10\ мВ$

$2Y_s = 96 \pm 5\ мВ$

$2X_c = 20 \pm 2\ мВ$

$2Y_r = 52 \pm 5\ мВ$

По формулам (3) и (4) 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:

$H_{max} = 45,0 \pm 4,5\ А/м$

$B_s = 0,16 \pm 0,01\ Тл$

$H_c = 9,0 \pm 0,9\ А/м$

$B_r = 0,09 \pm 0,01\ Тл$

Результаты измерения начальной кривой намагничивания представлены на графике 9.

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

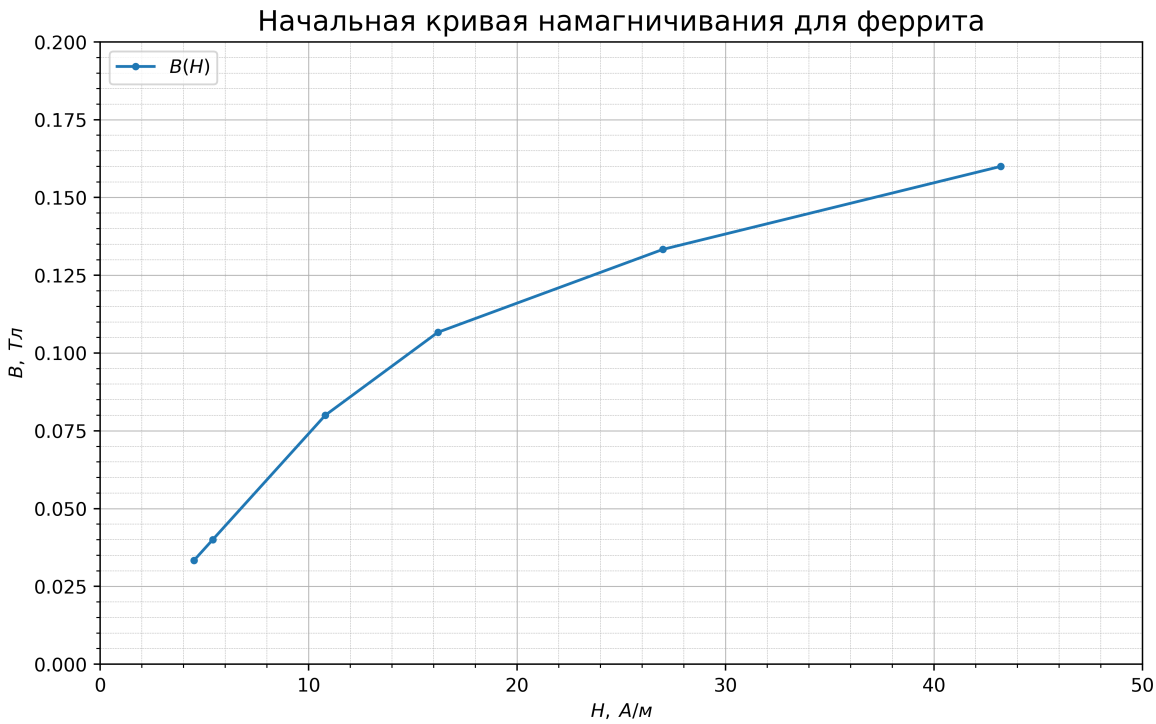

Рис. 9: Начальная кривая намагничивания для феррита в координатах $B(H)$

5.4 Проверка калибровки осциллографа

Для $K_x = 20$ *мВ/дел*:

$$m_x = 2\sqrt{2}R_0 \cdot \frac{I_{эф}}{2x} = \frac{2\sqrt{2} \cdot 0,2 \cdot 0,319}{46} = 19,6 \pm 0,5 \text{ мВ/дел}.$$

Для $K_x = 50$ *мВ/дел*:

$$m_x = \frac{2\sqrt{2} \cdot 0,2 \cdot 0,86}{10} = 48,6 \pm 0,5 \text{ мВ/дел}.$$

Для $K_x = 0,2$ *В/дел*:

$$m_x = \frac{2\sqrt{2} \cdot 0,2 \cdot 2,04}{6} = 0,19 \pm 0,01 \text{ В/дел}.$$

Для $K_y = 20$ *мВ/дел*:

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

Для $K_y = 50$ *мВ/дел*:

$$m_y = \frac{2\sqrt{2} \cdot 0,105}{6} = 49,5 \pm 0,5 \text{ мВ/дел}.$$

Калибровка выполнена с достаточной точностью.

5.5 Определение параметров RC-ячейки

$K_y = 2\ В/дел$

$2y = 6 \pm 1\ дел$

$U_{вх} = 2y \cdot K_y = 12 \pm 2\ В.$

$K_y = 20\ мВ/дел$

$2y = 4,6 \pm 1\ дел$

$U_{вых} = 2y \cdot K_y = 0,092 \pm 0,018\ В.$

$$\tau_{эксп} = \frac{U_{вх}}{\omega U_{вых}} = 0,42 \pm 0,01\ с.$$

$$\tau_{теор} = R_u C_u = 0,4\ с.$$

6 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	H_c, А/м	$86,4 \pm 0,5$	$23,9 \pm 2,5$	$9,0 \pm 0,9$
табл		100	11–40	20
эксп	B_s, Тл	$1 \pm 0,12$	$1,8 \pm 0,1$	$0,16 \pm 0,01$
табл		2	1,5	0,15
эксп	$\mu_{диф}$	2500 ± 300	30000 ± 5000	6000 ± 500
табл		20000	8000–35000	10000

Таблица 2: Сравнение полученных значений с табличными

Многие полученные значения существенно отличаются от табличных. Это может быть связано с несовершенством метода. Например, очень большие отклонения полученных значений $\mu_{диф}$ 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.