

Отчёт по лабораторной работе 3.6.1.

Петля гистерезиса (динамический метод).

Работу выполнил Громов Артём
ЛФИ Б02-006

Долгопрудный, 2021 г.

1. Аннотация

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.

Ферромагнитные материалы часто применяются в трансформаторах, дросселях, машинах переменного тока, то есть в устройствах, где они подвергаются периодическому перемагничиванию, — поэтому изучение магнитных характеристик ферромагнетиков в переменных полях представляет большой практический интерес. 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.

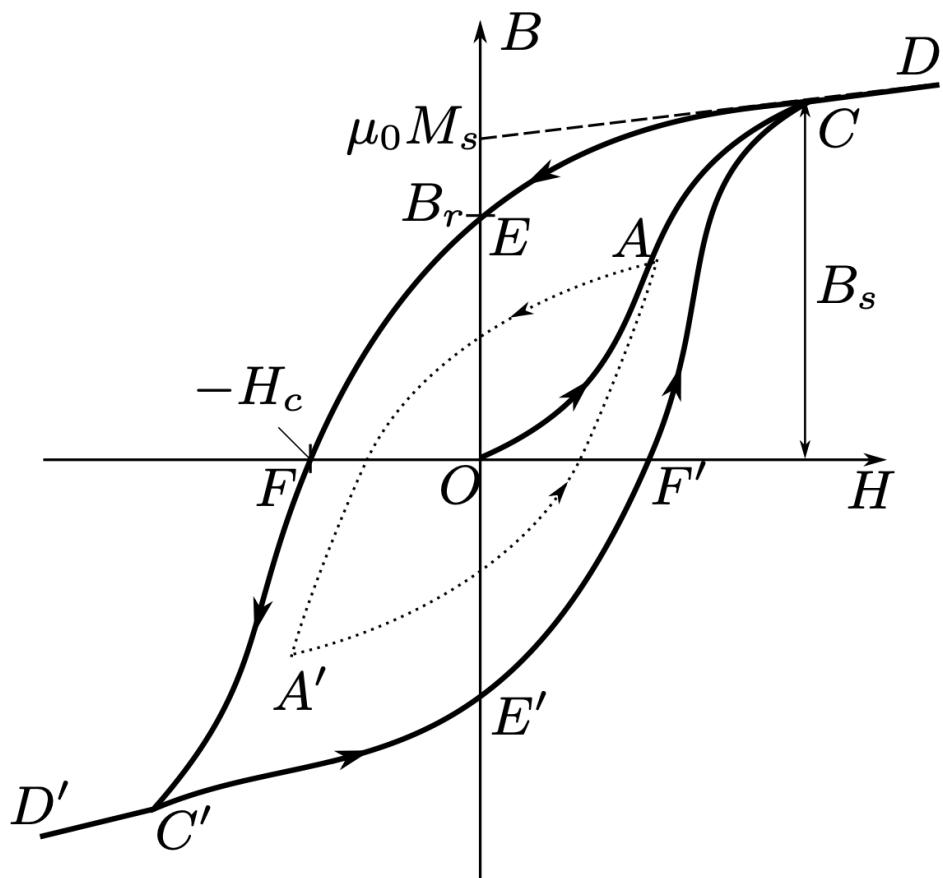


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика.

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 для типичного ферромагнетика иллюстрирует рис. 1.

Если к ферромагнитному образцу прикладывать переменное внешнее магнитное поле, то его состояние на плоскости $H - B$ будет изменяться по замкнутой кривой — *петле*

гистерезиса. Размер петли определяется максимальным значением напряжённости H в цикле (напр., 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 имеем

$$|B| = \frac{1}{SN} \int \varepsilon dt. \quad (1)$$

Таким образом, для определения B нужно проинтегрировать сигнал, наведённый меняющимся магнитным полем в измерительной катушке, намотанной на образец.

Для интегрирования в работе используется интегрирующая RC -цепочка (рис. 2). «Входное» напряжение от источника $U_{\text{вх}}(t)$ подаётся на последовательно соединённые $U_{\text{вх}}$ 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 $I = (U_{\text{вых}} - U_{\text{вх}}) / R_i \approx U_{\text{вх}} / R_i$, и входное и выходное сопротивление связаны соотношением

$$U_{\text{вых}} = \frac{q}{C_i} = \frac{1}{C_i} \int_0^t I dt \approx \frac{1}{\tau_i} \int_0^t U_{\text{вх}} dt. \quad (2)$$

где $\tau_i = R_i C_i$ — постоянная времени RC -цепочки. Для индукции поля из (1) получаем

$$|B| = \frac{1}{SN} \int U_{\text{вх}} dt = \frac{\tau_i}{SN} U_{\text{вх}}, \quad (3)$$

Замечание. Уточним критерий применимости соотношения (2). 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:

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

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

$$\tau \equiv RC \gg \frac{1}{\omega_0} \quad (4)$$

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

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \approx \frac{1}{\omega_0 \tau}. \quad (5)$$

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 $\omega > \omega_0$.

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.

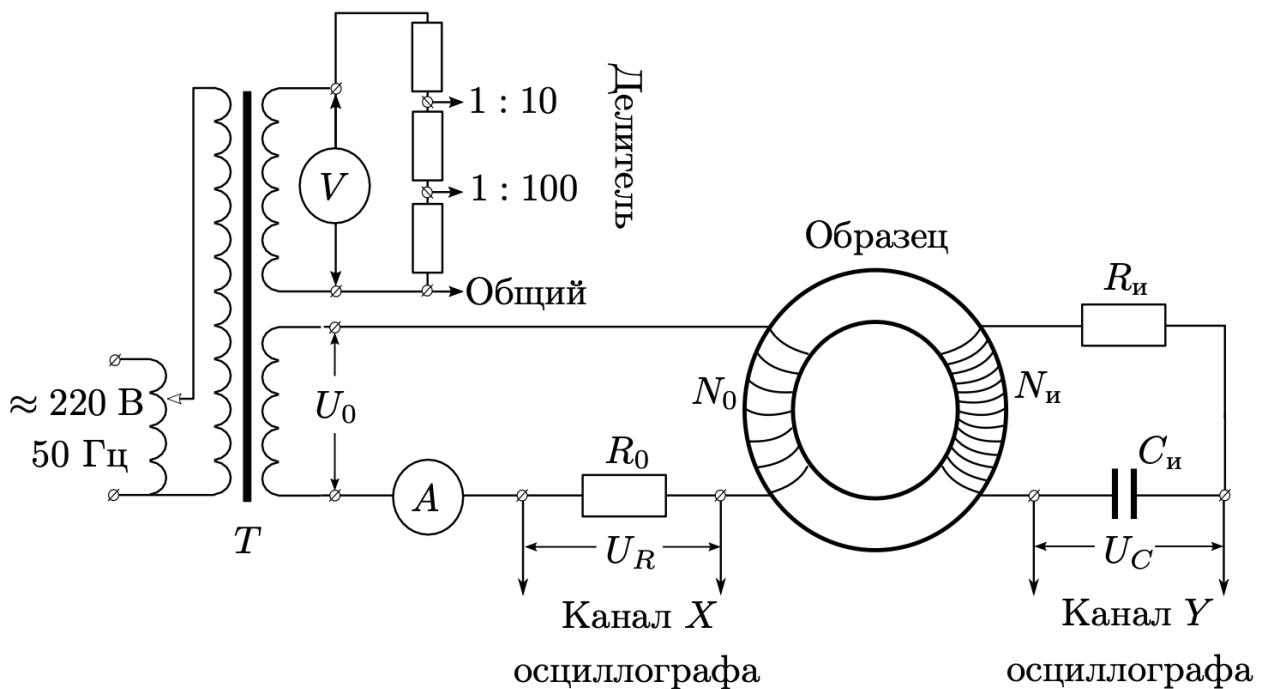


Рис. 3: Схема установки для исследования намагничивания образцов.

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 A .

Для измерения магнитной индукции B с измерительной обмоткой 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 (3).

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.

Калибровка осциллографа. Калибровка канала X осциллографа производится с помощью амперметра A . Предварительно необходимо закоротить обмотку N_0 (так как

катушка с ферромагнитным образцом является нелинейным элементом, ток в ней не имеет синусоидальной формы, поэтому связать амплитуду тока с показаниями амперметра можно лишь с довольно большой погрешностью). При закороченной обмотке N_0 показания эффективного тока, умноженные на $2\sqrt{2}$, дадут значение удвоенной амплитуды тока, подаваемого на ось X , соответствующего ширине горизонтальной развёртки на экране (осциллограф должен работать в режиме $X - Y$).

Калибровка вертикальной оси Y , как правило, не нужна (переключатель масштабов осциллографа откалиброван при изготовлении — при условии, что ручка плавной регулировки находится в положении калибровки). Тем не менее, она может проводиться с помощью сигнала, снимаемого через делитель напряжения со второй катушки понижающего трансформатора (рис. 3). Вольтметр V может достаточно точно измерить эффективное напряжение, подаваемое на вход осциллографа. После этого можно сравнить показания осциллографа и вольтметра.

Измерение параметров интегрирующей ячейки. Постоянную времени RC -цепочки можно определить экспериментально. С обмотки U_0 на вход интегрирующей цепочки подаётся синусоидальное напряжение с частотой цепи $\nu_0 = \omega_0/2\pi = 50$ Гц. На вход Y осциллографа или цифрового вольтметра поочерёдно подаются сигналы со входа ($U_{\text{вх}} = U_0$) и выхода ($U_{\text{вых}} = U_C$) RC -цепочки. Измерив амплитуды этих сигналов, можно рассчитать постоянную времени $\tau_i = R_i C_i$ по формуле (5). Кроме того, сопротивление и ёмкость можно независимым образом измерить цифровым мультиметром.

3. Результаты измерений и обработка данных

Запишем параметры установки: $R_0 = 0.3$ Ом, $R_i = 20$ кОм, $C_i = 20$ мкФ.

3.1. Исследования образца феррита.

Исследуемый образец обладает следующими параметрами: $N_0 = 40$ витков, $N_i = 400$ витков, $S = 3.0$ см², $2\pi R = 25$ см.

Определим значения коэффициентов для преобразования показаний осциллографа. Для этого воспользуемся следующими формулами:

$$K_x = 2\sqrt{2}R_0I/(2x), \quad (6)$$

$$K_y = 2\sqrt{2}U_{\text{вых}}/(2y). \quad (7)$$

Необходимые данные и результаты занесём в таблицу 1.

Таблица 1.
Определение коэффициентов калибровки

I , мА	$2x$, дел	K_x , мВ/дел	$U_{\text{вых}}$, мВ	$2y$, дел	K_y , мВ/дел
179.4 ± 0.1	8 ± 0.1	19.0 ± 0.2	34.3 ± 0.1	5 ± 0.1	19.4 ± 0.4

Используя полученные коэффициенты, найдём значения H_s , B_s , H_c , B_r . Для этого воспользуемся следующими формулами:

$$H = X \cdot \frac{K_x N_0}{2\pi R R_0}, \quad (8)$$

$$B = Y \cdot \frac{K_y R_i C_i}{S N_i}. \quad (9)$$

Необходимы данные и полученные результаты занесём в таблицу 2.

Таблица 2.
Определение коэффициентов калибровки

$2X_s$, дел	H_s , А/м	$2Y_s$, дел	B_s , мТ	$2X_c$, дел	H_c , А/м	$2Y_r$, дел	B_r , мТ
8 ± 0.1	40.6 ± 0.5	4.5 ± 0.1	142 ± 3	1.3 ± 0.1	6.6 ± 0.1	1.9 ± 0.1	61 ± 1

При разных значениях токов запишем значения координат точек A и A' и построим график в координатах X и Y .

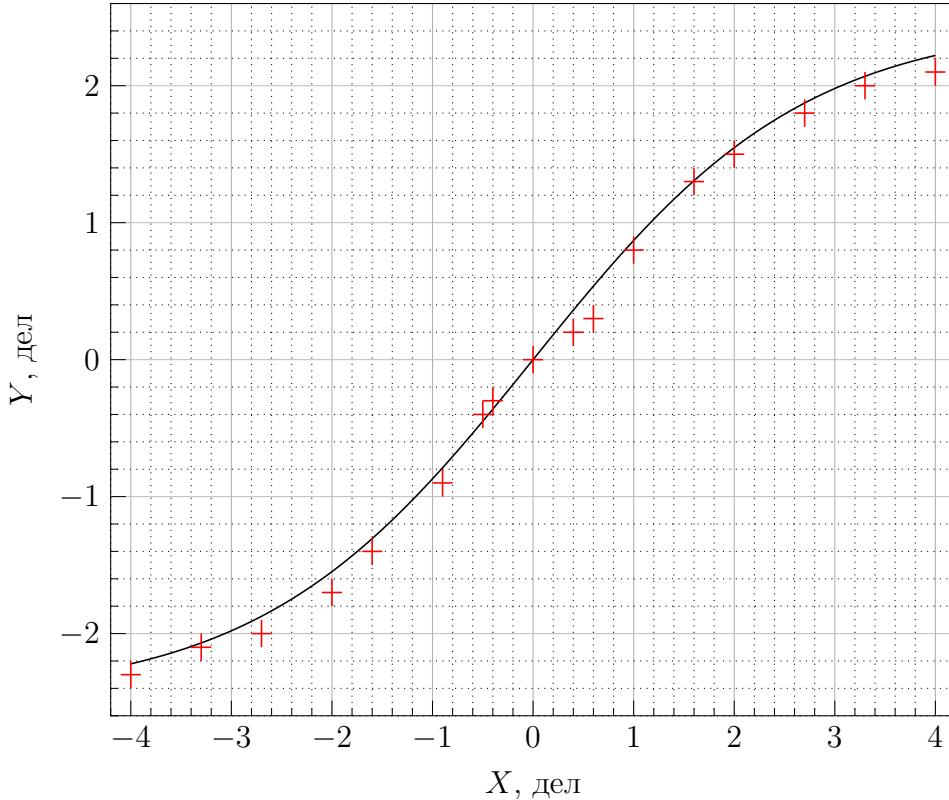


Рис. 4: Кривая начального намагничивания феррита.

Для аппроксимации воспользуемся следующей функцией: $y = A \tanh(Bx)$. В результате получим следующие значения: $A = 2.47 \pm 0.02$ дел, $B = 0.369 \pm 0.001$ дел $^{-1}$.

Из графика видно, что наибольшее значение намагничиваемости и начальное совпадают, поэтому $\mu_{\text{нач}} = \mu_{\text{max}} = (4.6 \pm 0.2) \cdot 10^3$.

3.2. Исследования образца пермаллоя.

Исследуемый образец обладает следующими параметрами: $N_0 = 35$ витков, $N_U = 220$ витков, $S = 3.8 \text{ см}^2$, $2\pi R = 24 \text{ см}$.

Определим значения коэффициентов для преобразования показаний осциллографа. Для этого воспользуемся формулами (6)-(7):

Необходимые данные и результаты занесём в таблицу 3.

Таблица 3.
Определение коэффициентов калибровки

I , мА	$2x$, дел	K_x , мВ/дел	$U_{\text{вых}}$, мВ	$2y$, дел	K_y , мВ/дел
452.0 ± 0.1	8 ± 0.1	48 ± 1	160.0 ± 0.1	4.8 ± 0.1	94 ± 2

Используя полученные коэффициенты, найдём значения H_s , B_s , H_c , B_r . Для этого воспользуемся формулами (8)-(9):

Необходимы данные и полученные результаты занесём в таблицу 4.

Таблица 4.
Определение коэффициентов калибровки

$2X_s$, дел	H_s , А/м	$2Y_s$, дел	B_s , мТ	$2X_c$, дел	H_c , А/м	$2Y_r$, дел	B_r , мТ
5 ± 0.1	58.26 ± 0.03	4.6 ± 0.1	1038 ± 2	2.2 ± 0.1	25.64 ± 0.02	4.4 ± 0.1	992 ± 2

При разных значениях токов запишем значения координат точек А и А' и построим график в координатах X и Y .

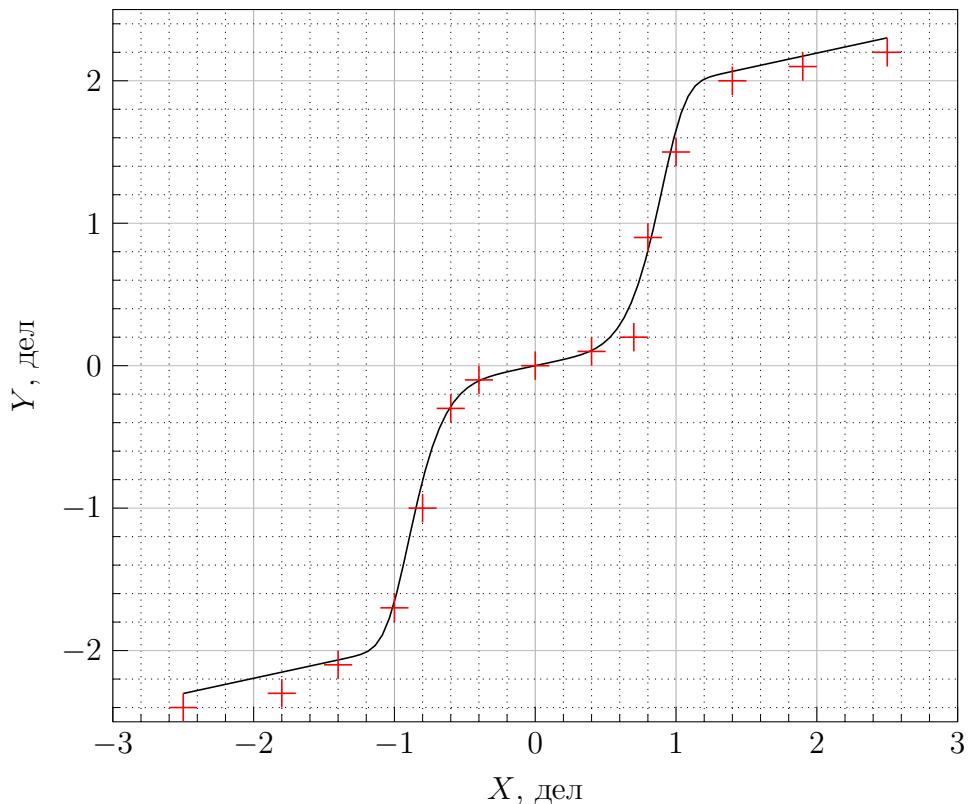


Рис. 5: Кривая начального намагничивания пермаллоя.

Для аппроксимации воспользуемся следующей функцией: $y = A \tanh(Bx^5) + Cx$. В результате получим следующие значения: $A = 1.77 \pm 0.03$ дел, $B = 1.15 \pm 0.02$ дел $^{-1}$, $C = 0.54 \pm 0.05$ дел $^{-1}$.

Дифференцируя, находим, что $\mu_{\text{нач}} = (3.2 \pm 0.3) \cdot 10^3$ и $\mu_{\text{max}} = (6.8 \pm 0.7) \cdot 10^4$.

3.3. Исследования образца кремнистого железа.

Исследуемый образец обладает следующими параметрами: $N_0 = 40$ витков, $N_U = 400$ витков, $S = 1.2 \text{ см}^2$, $2\pi R = 10 \text{ см}$.

Определим значения коэффициентов для преобразования показаний осциллографа. Для этого воспользуемся формулами (6)-(7):

Необходимые данные и результаты занесём в таблицу 3.

Таблица 5.
Определение коэффициентов калибровки

$I, \text{ мА}$	$2x, \text{ дел}$	$K_x, \text{ мВ/дел}$	$U_{\text{вых}}, \text{ мВ}$	$2y, \text{ дел}$	$K_y, \text{ В/дел}$
1327.0 ± 0.1	6 ± 0.1	0.188 ± 0.003	7.2 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.10 ± 0.05

Используя полученные коэффициенты, найдём значения H_s , B_s , H_c , B_r . Для этого воспользуемся формулами (8)-(9):

Необходимы данные и полученные результаты занесём в таблицу 4.

Таблица 6.
Определение коэффициентов калибровки

$2X_s, \text{ дел}$	$H_s, \text{ А/м}$	$2Y_s, \text{ дел}$	$B_s, \text{ Т}$	$2X_c, \text{ дел}$	$H_c, \text{ А/м}$	$2Y_r, \text{ дел}$	$B_r, \text{ Т}$
7 ± 0.1	876 ± 3	5.8 ± 0.1	2.5 ± 0.1	0.6 ± 0.1	75.1 ± 0.2	1.9 ± 0.1	0.89 ± 0.05

При разных значениях токов запишем значения координат точек A и A' и построим график в координатах X и Y.

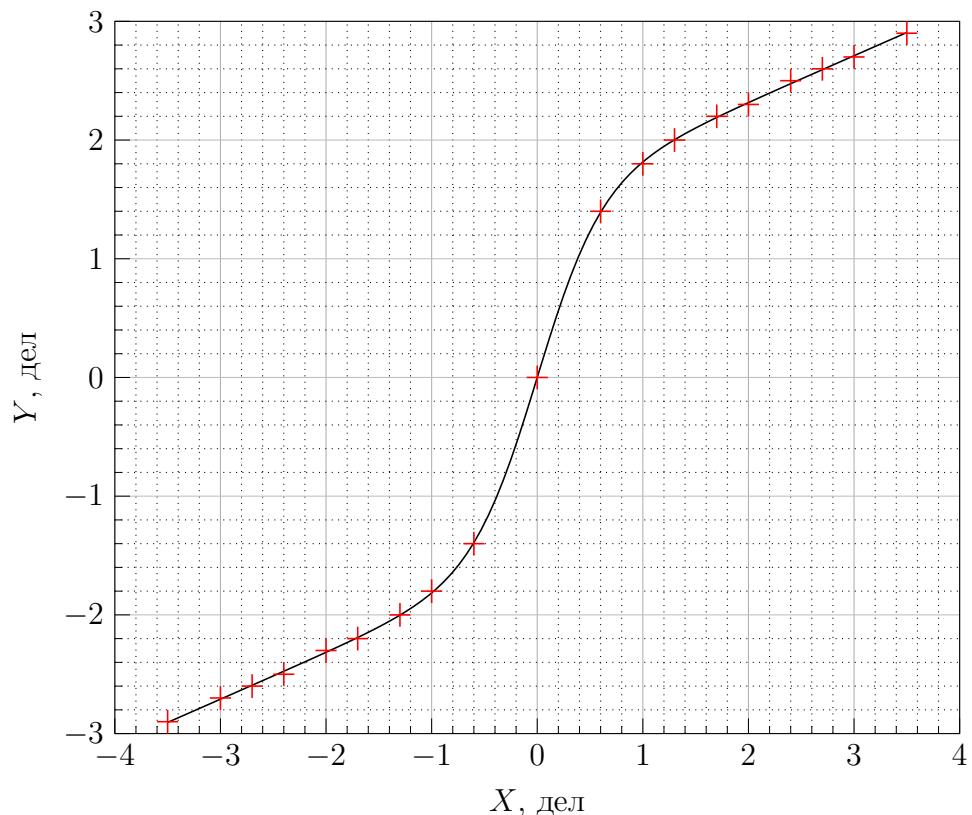


Рис. 6: Кривая начального намагничивания пермаллоя.

Для аппроксимации воспользуемся следующей функцией: $y = A \tanh(Bx) + Cx$. В результате получим следующие значения: $A = 1.538 \pm 0.0$ дел, $B = 1.631 \pm 0.001$ дел $^{-1}$, $C = 1.3677 \pm 0.0004$ дел $^{-1}$.

Из графика видно, что наибольшее значение намагничаемости и начальное совпадают, поэтому $\mu_{\text{нач}} = \mu_{\text{max}} = (7.8 \pm 0.8) \cdot 10^3$.

3.4. Вычисление временной константы

Вычислим временную константу и сравним со значением полученным из характеристик установки. Результаты занесём в таблицу 7.

Таблица 7.
Определение коэффициентов калибровки

$2Y_{\text{вх}}$, дел	$K_{\text{вх}}$, В/дел	$U_{\text{вх}}$, В	$2Y_{\text{вых}}$, дел	$K_{\text{вх}}$, В/дел	$U_{\text{вых}}$, мВ
6.0 ± 0.1	1	6.0 ± 0.1	4.8 ± 0.1	0.01	48 ± 1

Вычислим значение временной константы по следующей формуле:

$$\tau = \frac{U_{\text{вх}}}{2\pi\nu U_{\text{вых}}} \quad (10)$$

где $\nu = 50$ Гц. В итоге получим $\tau = 0.40 \pm 0.01$ с, что совпадает со значением из параметров установки $\tau = 0.4$ с.

4. Обсуждение результатов

В данной работе исследовались магнитные характеристики нескольких веществ. Результаты не очень сошлись с табличными (только по порядку величины). Наиболее трудной частью работы стало снятие показаний с осциллографа, так как прибор является довольно грубым (погрешность порядка 4%).

5. Вывод

В целом лабораторную работу стоит считать проделанной качественно, однако можно улучшить результаты при использовании более точного оборудования. Также особый интерес представляет исследования кривой начальной намагниченности кремнистого железа, так как в данной работе не был обнаружен максимум, но на него указывают справочные материалы.