

Московский физико-технический университет
Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий

Лабораторная работа № 3.4.5

Петля гистерезиса (динамический метод)

Работу выполнил:
Шурыгин Антон
Б01-909

г. Долгопрудный

1 Цель работы

Исследование петель гистерезиса ферромагнитных материалов с помощью осциллографа.

В работе используются: понижающий трансформатор, реостат, амперметр и вольтметр (мультиметры), резистор, делитель напряжения, интегрирующая цепочка, электронный осциллограф, тороидальные образцы с двумя обмотками.

2 Теоретическая часть

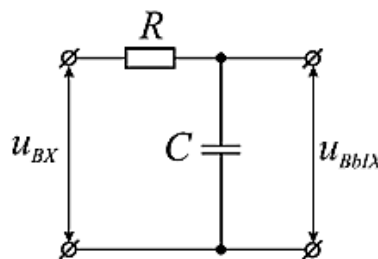
Магнитную индукцию удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при изменении магнитного потока Φ , $\varepsilon = -d\Phi/dt$.

Пусть катушка плотно обхватывает образец, и индукция \mathbf{B} в образце однородна. Тогда $\Phi = BSN$, где N - число витков в измерительной катушке, а S - число витков. Подставим Φ в формулу ЭДС, после интегрирования найдем:

$$|B| = \frac{1}{SN} \int \varepsilon dt$$

Таким образом, для определения B нужно проинтегрировать сигнал, наведенный меняющимся магнитным полем на измерительную катушку, намотанную на образец.

Для интегрирования сигнала применяют интегрирующие схемы. На рис.1 изображена простейшая из них. При этом сопротивление R заметно превышает сопротивление конденсатора ($U_{\text{ВЫХ}} \ll U_{\text{ВХ}}$).



В данном случае $I \approx U_{\text{ВХ}}/R$, а напряжение на емкости

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int Idt \approx \frac{1}{RC} \int U_{\text{ВХ}} dt$$

Чем больше постоянная времени $\tau = RC$ превосходит характерное время процесса, тем этот вывод ближе к истине. Для синусоидальных напряжений $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}}/RC\Omega$, где Ω - частота сигнала.

Обозначив параметры интегрирующей ячейки через $R_{\text{и}}, C_{\text{и}}, N_{\text{и}}$, получим:

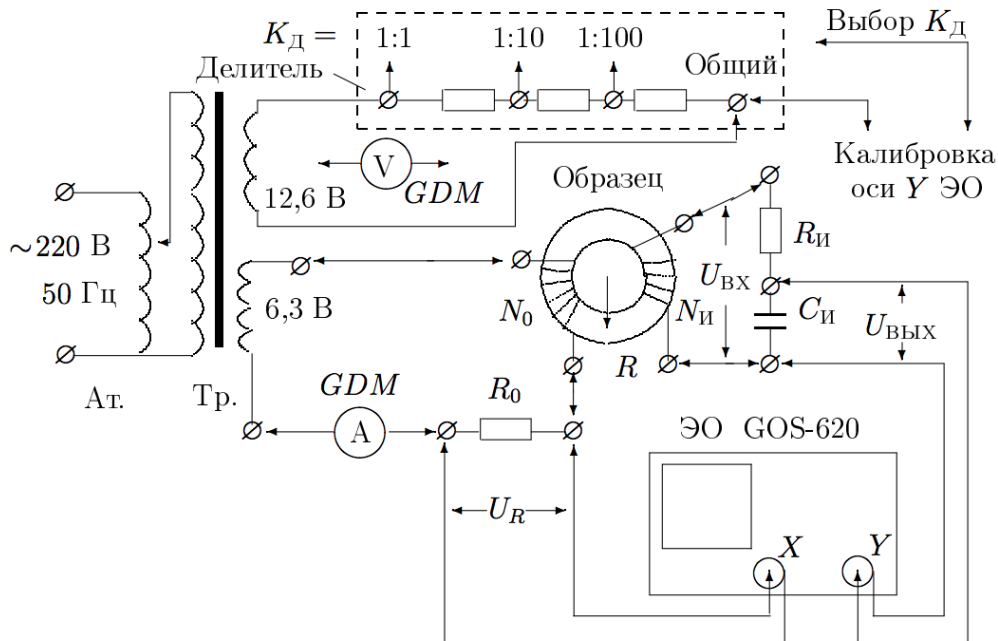
$$|B| = \frac{R_{\text{и}} C_{\text{и}}}{S N_{\text{и}}} U_{\text{вых}}$$

3 Экспериментальная установка

Ток в обмотке N_0 измеряется мультиметром А. Напряжение с сопротивления R_0 , включенного последовательно с обмоткой N_0 , подается на вход X электронного осциллографа (ЭО). Это напряжение пропорционально току в обмотке N_0 , а следовательно, и напряженности H магнитного поля в образце.

Для измерения магнитной индукции B с измерительной обмотки $N_{\text{и}}$ на вход интегрирующей NC -цепочки подается напряжение $U_{\text{ВХ}}$, пропорциональное производной B , а с выхода снимается напряжение $U_{\text{ЕХ}} = U_C$, пропорциональное B и подается на вход Y .

Замкнутая кривая, возникающая на экране, воспроизводит в некотором масштабе (различном для X и Y) петлю гистерезиса. Необходимо провести калибровку каналов X и Y ЭО и установить масштабы изображения. Для этого надо узнать, каким напряжениям (или токам) соответствуют амплитуды сигналов, видимых на экране, и каким значениям B и H соответствуют напряжения (или токи).



Для измерения напряжения с помощью осциллографа:

$$2U_{X,0} = 2x \cdot K_X; \quad 2U_{Y,0} = 2y \cdot K_Y; \quad (1)$$

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

$$|B| = \frac{R_u \cdot C_u}{SN_u} U_{ex} \quad (3)$$

Проверка калибровки горизонтальной оси ЭО с помощью амперметра: (при закороченной обмотке N_0)

$$m_X = 2R_0\sqrt{2}I_{ef}/(2x) \quad (4)$$

Проверка калибровки вертикальной оси ЭО с помощью вольтметра: (при отключенном тороиде)

$$m_X = 2R_0\sqrt{2}I_{ef}/(2x) \quad (5)$$

Для измерения постоянной времени RC -цепочки:

$$\tau = RC = \frac{U_{in}}{\Omega U_{ex}} \quad (6)$$

4 Ход работы

4.1 Петля гистерезиса на экране ЭО

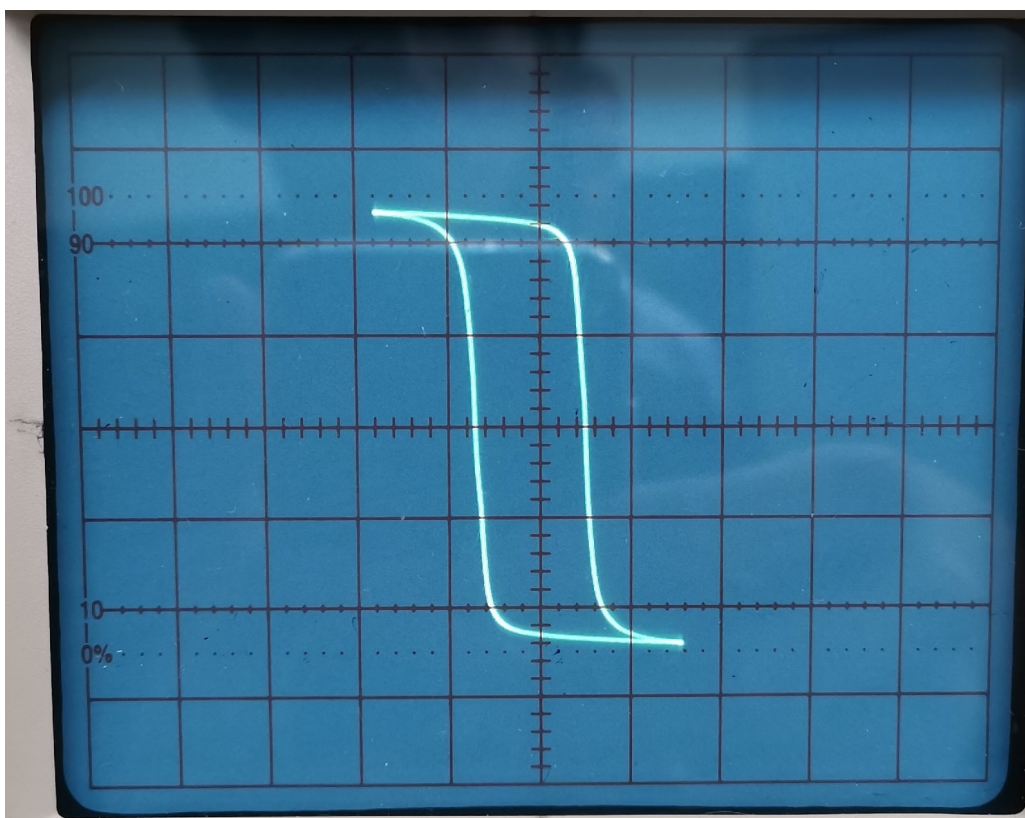
Соберем схему согласно рисунку выше, подготовим приборы к работе и включим схему в сеть. Подберем ток питания в намагничивающей обмотке и коэффициенты усиления ЭО, так, чтобы предельная петля гистерезиса занимала большую часть экрана, но при этом исчезли "усы". Проверим центровку вертикальных и горизонтальных лучей.

Для каждого материала зафиксируем предельную петлю и снимем начальную кривую намагничивания, плавно уменьшая ток до нуля и отмечая вершины наблюдаемых частных петель. Затем восстановим предельную петлю, измерим на экране двойные амплитуды для коэрцитивной силы $[2x(c)]$ и индукции насыщения $[2y(s)]$. Запишем соответствующие значения K_x и K_y . Занесем полученные измерения в таблицу 1.

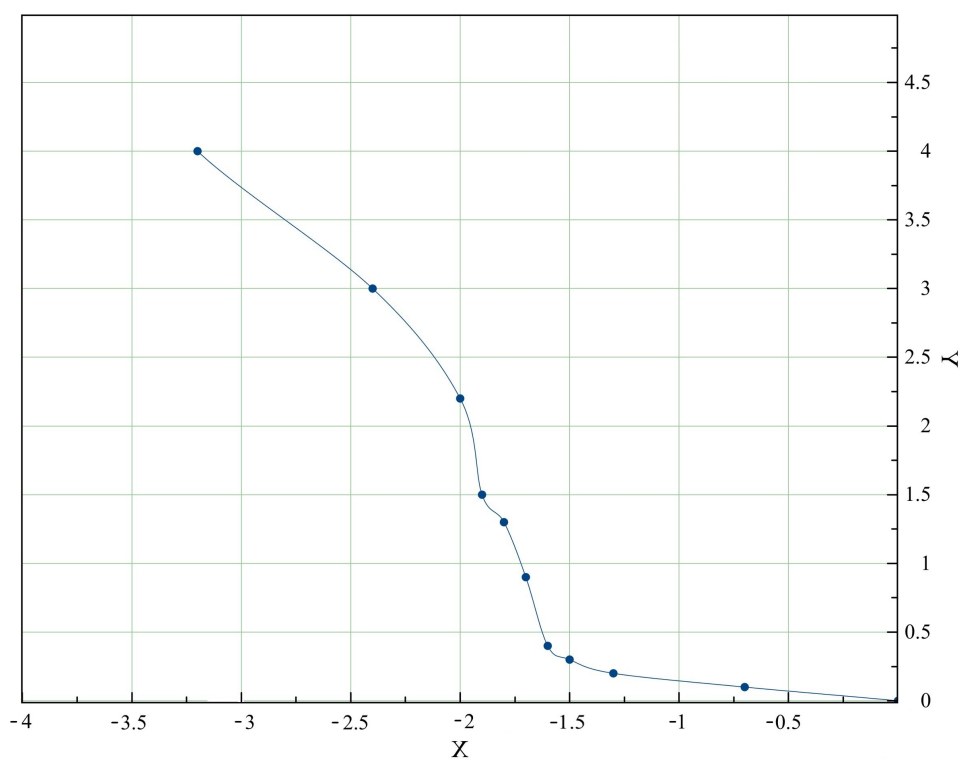
Таблица 1: Результаты измерений

	Пермаллой	Феррит	Кремнистое железо
K_X , мВ/дел	100	20	50
K_Y , мВ/дел	100	20	50
I_{ef} , мА	255	210	650
$2\pi R$, см	24	25	10
N_0 , витков	35	40	40
N_L , витков	220	400	400
S , 2	3,8	3,0	1,2
Коэрц. сила $2x(c)$, дел.	0,6	0,6	1,6
Индукц нас. $2y(s)$, дел.	4,4	2	3,0

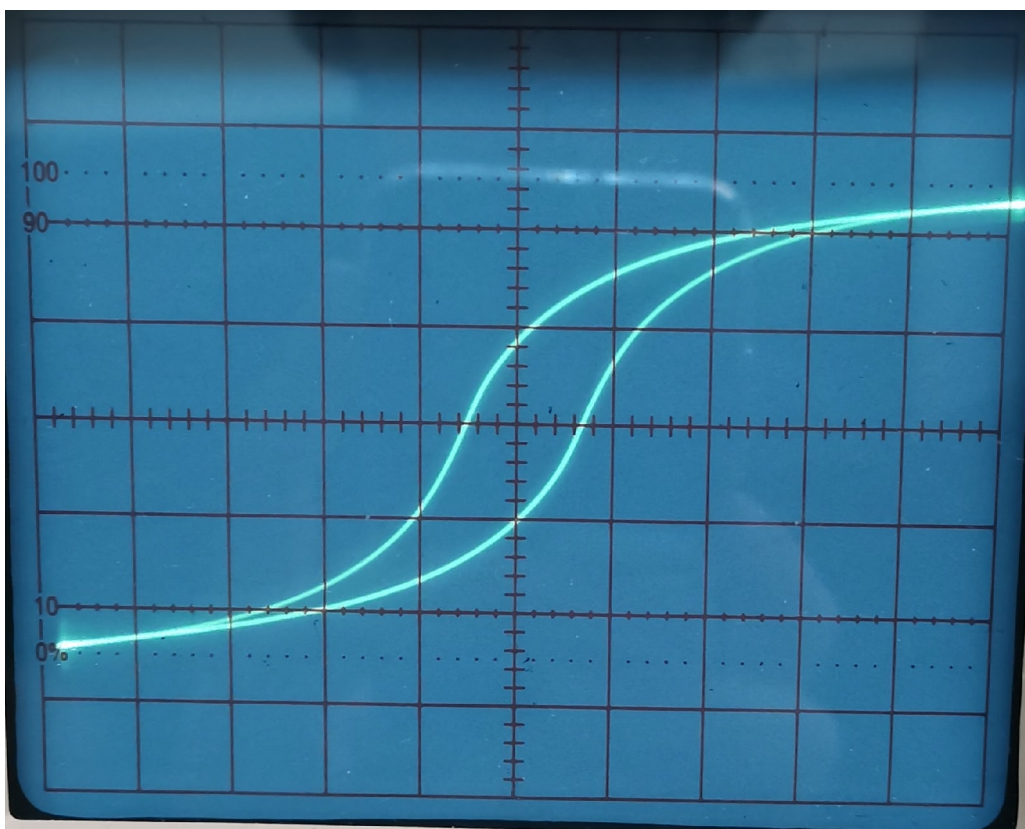
Параметры схемы: $R_0 = 0,3 \text{ Ом}$, $R_u = 20 \text{ kОм}$, $C_u = 20 \text{ мкФ}$. Представим фотографии трех предельных петель гистерезиса для трех различных тороидов:



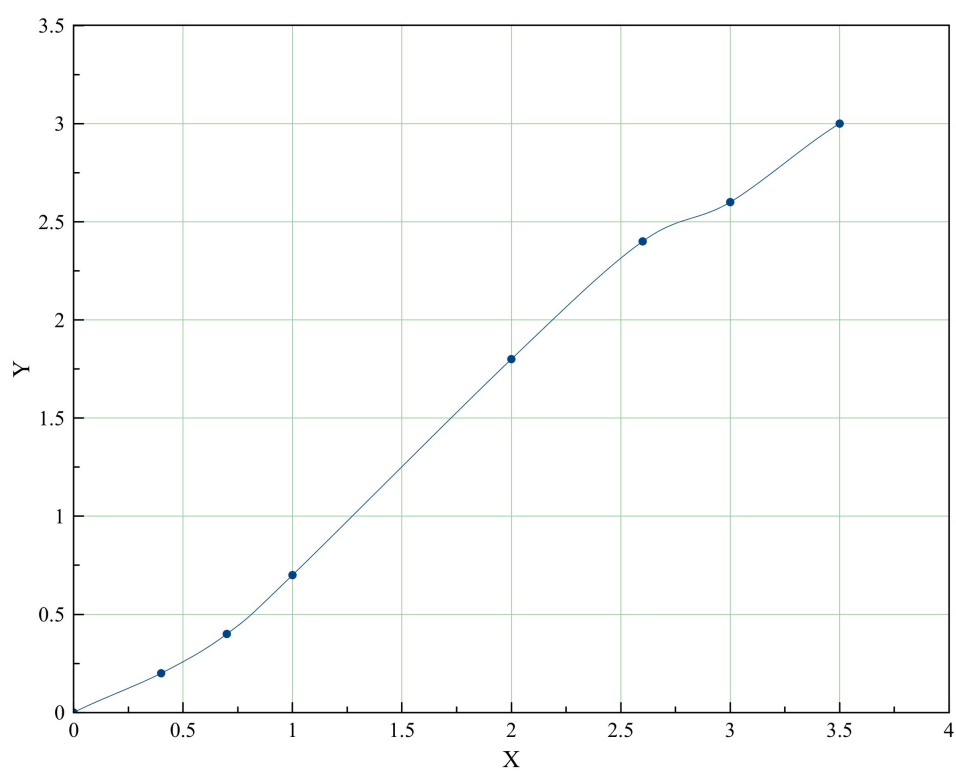
Предельная кривая. Пермаллой



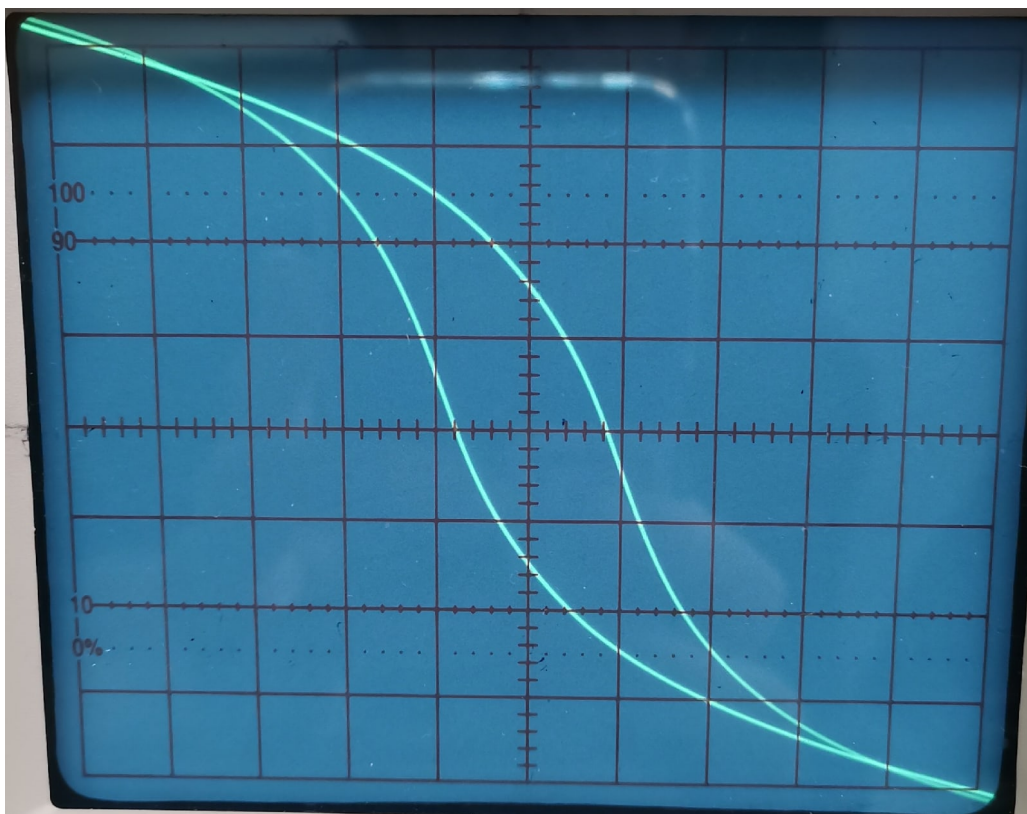
Начальная кривая. Пермаллой



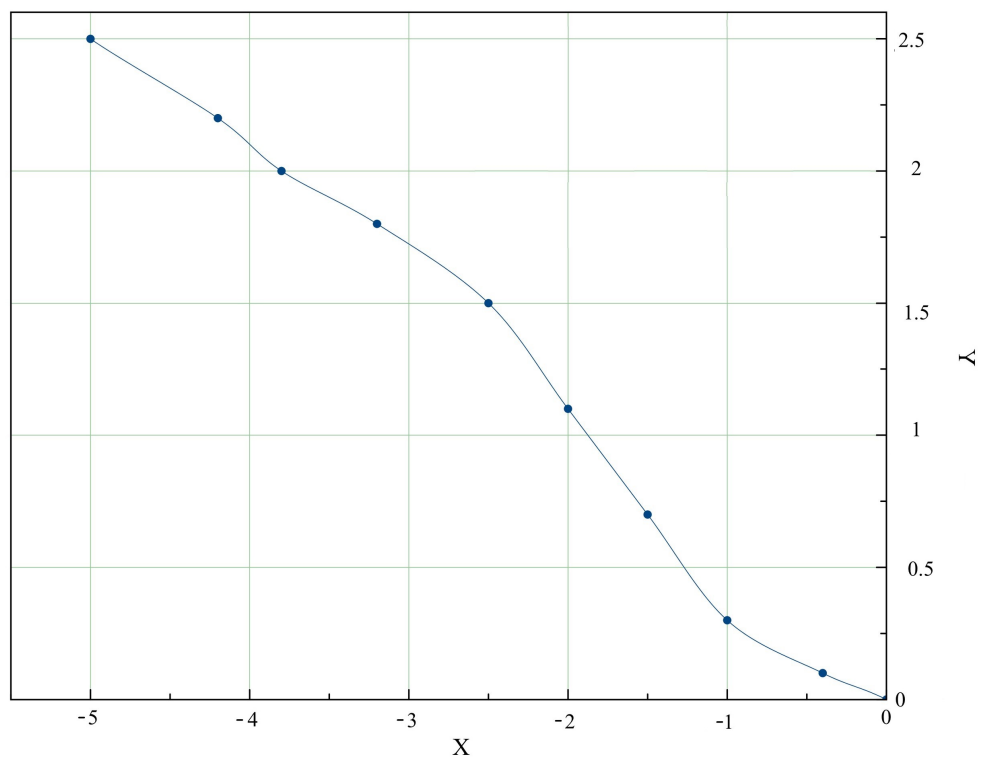
Предельная кривая. Феррит



Начальная кривая. Феррит



Предельная кривая. Кремнистое железо



Предельная кривая. Кремнистое железо

4.2 Проверка калибровки оси X ЭО с помощью амперметра

Отключим намагничивающую обмотку N_0 от цепи, подберем такой ток через R_0 с помощью автотрансформатора, при котором горизонтальная прямая занимает большую часть экрана. Рассчитаем чувствительность канала m_x по формуле и сравним с выбранным K_x .

Данные, полученные при измерении: $2x = 7.0$, $I_{ef} = 155$ мА, $R_0 = 0.3$ Ом, $K_x = 20$ мВ.

Расчет:

$$m_x = \frac{2R_0\sqrt{2}I_{ef}}{(2x)}$$
$$m_x = \frac{2 \cdot 0.3\sqrt{2} \cdot 155}{7.5} \approx 19,4$$

Калибровка проведена успешно.

4.3 Проверка калибровки оси Y ЭО с помощью вольтметра

Разберем цепь тороида; подберем с помощью автотрансформатора напряжение, при котором вертикальная прямая занимает большую часть экрана. Измерим двойную амплитуду сигнала. Определим эффективное значение напряжения.

Данные, полученные при калибровке: $2y = 8$ делений, $U_{ef} = 0.13$ В, $K_y = 50$ мВ.

Расчеты:

$$m_y = \frac{2\sqrt{2}U_{ef}}{(2y)}$$
$$m_y = \frac{2\sqrt{2} \cdot 130}{8} \approx 46$$

Калибровка проведена успешно.

4.4 Определение τ - постоянной времени RC-цепочки

Определим напряжения на входе и выходе интегрирующей ячейки: подключим Y-вход и отключим X-вход; установим чувствительность $K_Y \approx n$

В/дел. подберем такой ток (с помощью реостата), при котором горизонтальная прямая занимает большую часть экрана. Определим входное напряжение на RC-цепочке. Переключим Y -вход ЭО к интегрирующей емкости и определим U_{ex} . Рассчитаем постоянную времени τ .

Напряжение на входе ячейки $U_{in} = 2$ В, напряжение на выходе ячейки $U_{out} = 12$ мВ, $\Omega = 50$ Гц.

С одной стороны:

$$\tau = R_u C_u = 400 \text{ msec}$$

С другой стороны:

$$\tau = RC = \frac{U_{in}}{\Omega U_{ex}} = 333 \text{ msec}$$

Таким образом, проверили справедливость формул () и (), т.е. выполнение $\tau = RC \approx \frac{U_{in}}{\Omega U_{ex}}$

4.5 Дифференциальная магнитная проницаемость

Вычислим максимальные значения дифференциальной магнитной проницаемости для каждого из трех образцов по формуле:

$$\mu_{dif} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \quad (7)$$

где μ_0 - магнитная постоянная ($\mu_0 \approx 1,256 \text{ H/A}^2$), а значение $\frac{dB}{dH}$ определим по графикам (максимальный наклон касательных к петлям гистерезиса, который достигается в точках с $B = 0$, т.к. эти точки находятся наиболее далеко от областей насыщения).

Также рассчитаем H_c, B_s по формулам (2), (3), учтя, что полученные значения необходимо домножить на число снятых делений.

Пусть $[2x(c)] = l_c$, $[2y(s)] = l_s$.

Также пусть $\sigma_R = 0.0005$ м, $\sigma_{l_c} = \frac{l_c}{10}$, аналогично $\sigma_{l_s} = \frac{l_s}{10}$, $\sigma_S = 2\sigma_r = 0.001$.

Погрешности $\sigma_{H_c} \sigma_{B_s}$ рассчитаем по формулам:

$$\sigma_{H_s} = H_s \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{l_c}}{l_c}\right)^2} \quad (8)$$

$$\sigma_{B_s} = B_s \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{l_s}}{l_s}\right)^2} \quad (9)$$

Результаты занесем в итоговую таблицу.

Таблица 2: Итоговые результаты

	Кремнистое железо	Пермаллой	Феррит
H_c , А/м	172.8 ± 8.6	44.6 ± 2.2	67.2 ± 3.4
B_s , Тл	1.25 ± 0.06	0.20 ± 0.01	0.080 ± 0.004
$\mu_{\text{дифф}}^{\text{max}} \cdot \frac{1}{1000}$	9.8	50	2.7

5 Вывод

Провели исследование петель гистерезиса трех ферромагнитных материалов (кремнистое железо, пермаллой и феррит). Для них мы построили начальные кривые гистерезиса для каждой из петель, нашли коэрцитивную силу и индукцию насыщения для каждого образца, оценили максимальные значения дифференциальной магнитной проницаемости для каждого образца, а также произвели калибровку осей ЭО и нашли постоянную RC -цепочки. Все экспериментально полученные результаты совпали с табличными кроме H_c и $\mu_{\text{дифф}}^{\text{max}}$ для Пермаллоя – магнитная проницаемость достаточно меньше табличного значения, вследствие чего, скорее всего не совпало и значения для H_c . Такое отклонение можно связать тем, что образец может быть довольно старым и изношенным, из-за чего у него и поменялись стандартные магнитные свойства. Полученные характеристики для данных материалов представляют практический интерес, т.к. часто используются в трансформаторах, дросселях, машинах переменного тока и пр.