

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  
2020 год

## 1 Цель работы

Исследование петлей 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

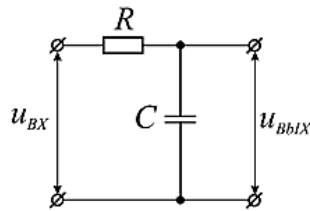
Магнитную индукцию удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при изменении магнитного потока  $\Phi$  в катушке, намотанной на образец:  $E = -\frac{d\Phi}{dt}$ .

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  $\Phi$  в формулу ЭДС, после интегрирования найдем:

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

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 ( $R \gg 1/\omega C$ ).



В данном случае  $I \approx U/R$ , а напряжение на емкости

$$U = qC = \frac{1}{C} \int I dt \approx \frac{1}{RC} \int U dt$$

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  $\Omega$  - частота сигнала.

Обозначив параметры интегрирующей ячейки через  $R, C, N$ , получим:

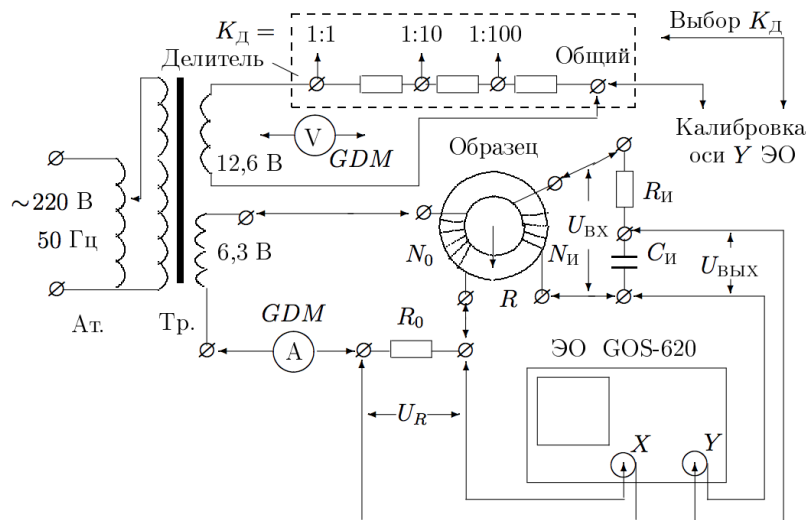
$$|B| = RCSNU$$

### 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  $N_i$  на вход интегрирующей  $NC$ -цепочки подается напряжение  $U_{BX}$ , пропорциональное производной  $B$ , а с выхода снимается напряжение  $U_{EX} = U_C$ , 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

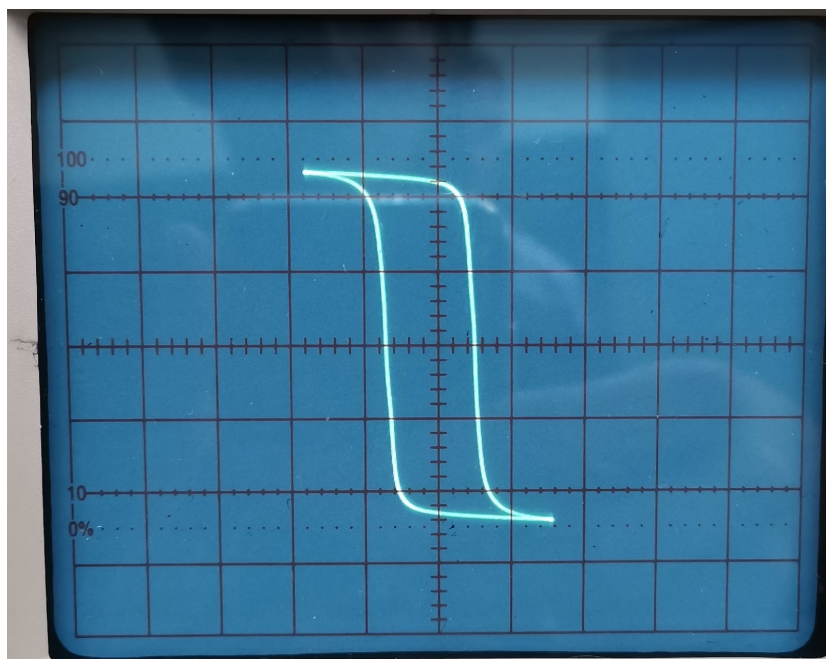
Соберем схему согласно рисунку выше, подготовим приборы к работе и включим схему в сеть. Подберем ток питания в намагничивающей обмотке и коэффициенты усиления ЭО, так, чтобы предельная петля гистерезиса занимала большую часть экрана, но при этом исчезли "усы". Проверим центровку вертикальных и горизонтальных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

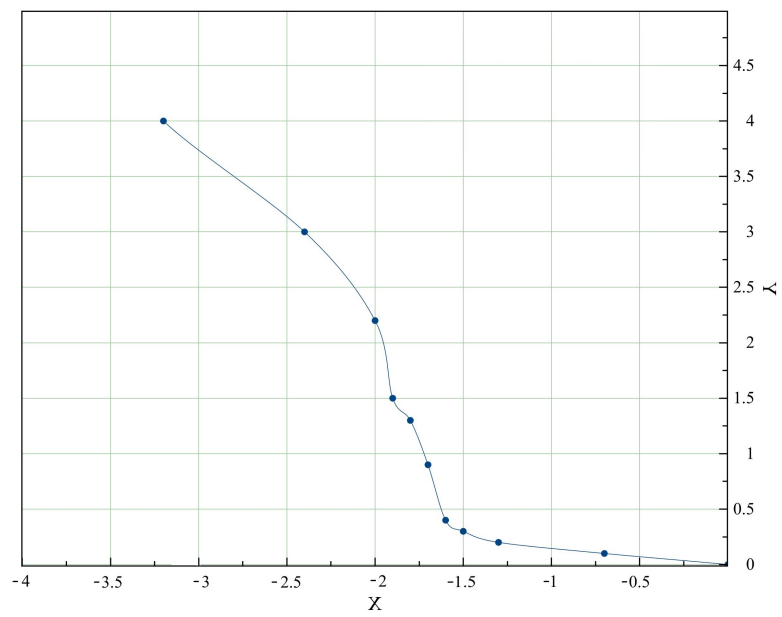
Параметры схемы:  $R_0 = 0,3 \text{ Ом}$ ,  $R_u = 20 \text{ кОм}$ ,  $C_u = 20 \text{ мкФ}$ . Представим фотографии трех предельных петель гистерезиса для трех различных тороидов:

Таблица 1: Результаты измерений

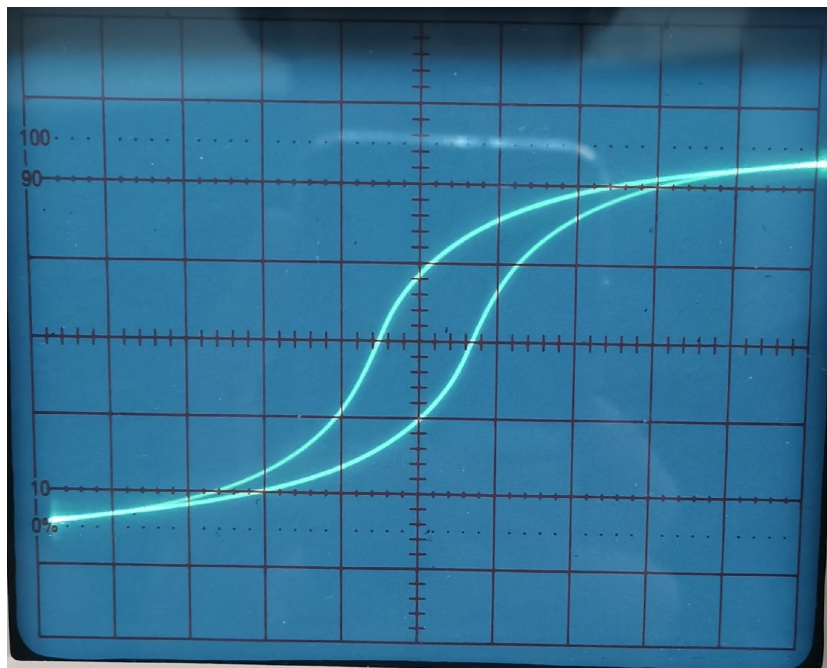
	Пермаллой	Феррит	Кремнистое железо
$K_X$ , мВ/дел	100	20	50
$K_Y$ , мВ/дел	100	20	50
$I_{ef}$ , мА	255	210	650
$2\pi R$ , см	24	25	10
$N_0$ , витков	35	40	40
$N_L$ , витков	220	400	400
$S$ , °	3,8	3,0	1,2
Коэрц. сила $2x(c)$ , дел.	0,6	0,6	1,6
Индукц нас. $2y(s)$ , дел.	4,4	2	3,0



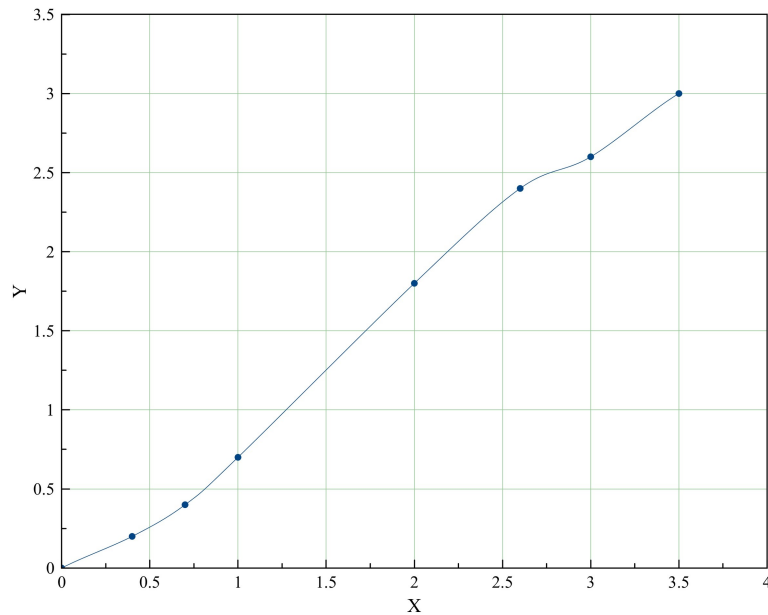
Предельная кривая. Пермаллой



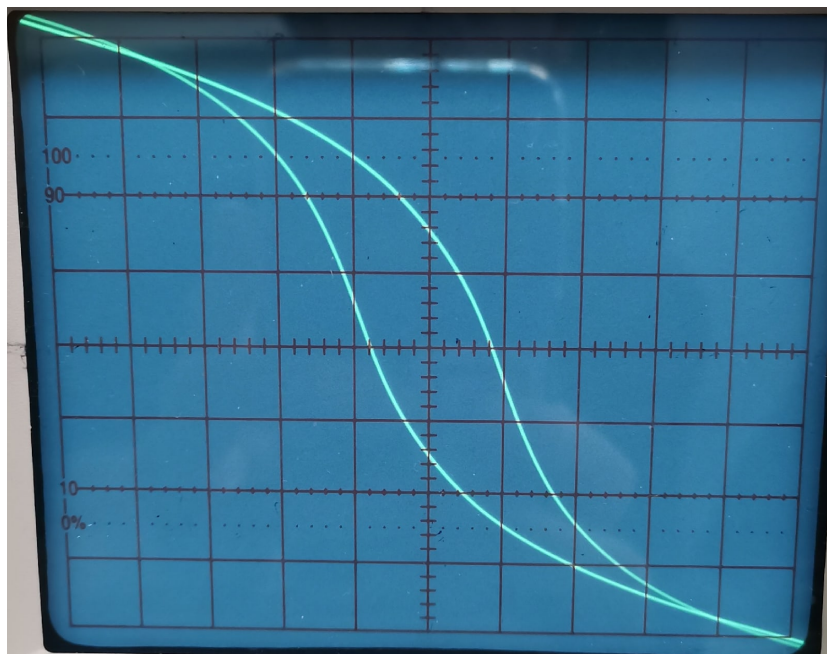
Начальная кривая. Пермаллой



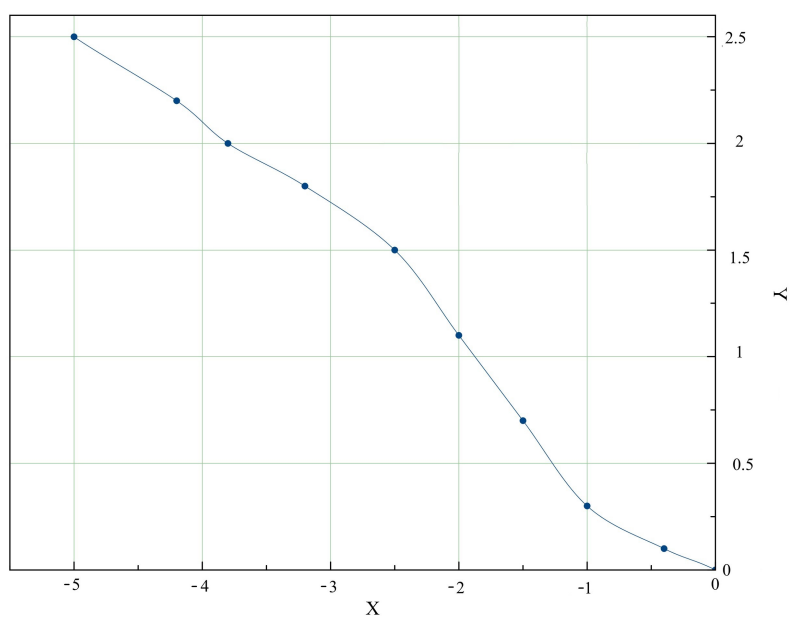
Предельная кривая. Феррит



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 $\tau$ - 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  $\tau$ .

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  $\mu_0$  - 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	$172.8 \pm 8.6$	$44.6 \pm 2.2$	$67.2 \pm 3.4$
$B_s$ , Тл	$1.25 \pm 0.06$	$0.20 \pm 0.01$	$0.080 \pm 0.004$
$\mu^{\max}$ , $10^3$	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  $\mu^{\max}$  для Пермаллоя – магнитная проницаемость достаточно меньше табличного значения, вследствие чего, скорее всего не совпало и значения для  $H_c$ . Такое отклонение можно связать с 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.