

МОСКОВСКИЙ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3.4.5

Петля гистерезиса
(динамический метод)

Студент:

Павел СЕВЕРИЛОВ

671 группа



13 декабря 2017 г.

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

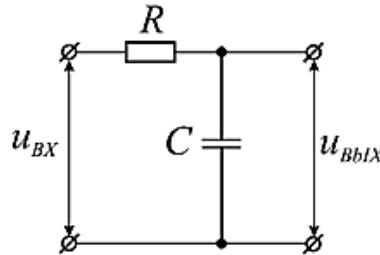
Магнитную индукцию удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при изменении магнитного потока Φ в катушке, намотанной на образец: $\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$.

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 Φ в формулу ЭДС, после интегрирования найдем:

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

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 ($U_{\text{вых}} \ll U_{\text{вх}}$).



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

$$U_{\text{вых}} = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I dt \approx \frac{1}{RC} \int U_{\text{вх}} dt$$

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:

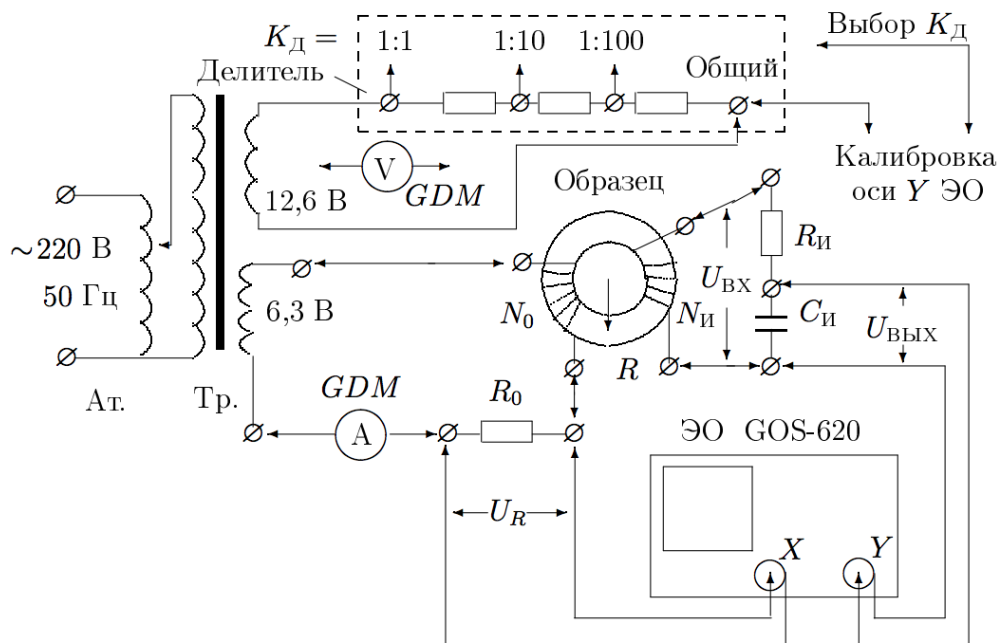
$$|B| = \frac{R_{\text{и}} C_{\text{и}}}{S N_{\text{и}}} U_{\text{вых}}$$

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_i на вход интегрирующей RC -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:

$$2U_{X,0} = 2x \cdot K_X; \quad 2U_{Y,0} = 2y \cdot K_Y; \quad H = \frac{IN_0}{2\pi R}$$

$$|B| = \frac{R_u C_u}{SN_u} U_{ex}$$

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

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

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

$$m_Y = 2\sqrt{2} U_{ef} / (2y)$$

Для измерения постоянной времени RC -цепочки:

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

4 Работа и измерения

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.

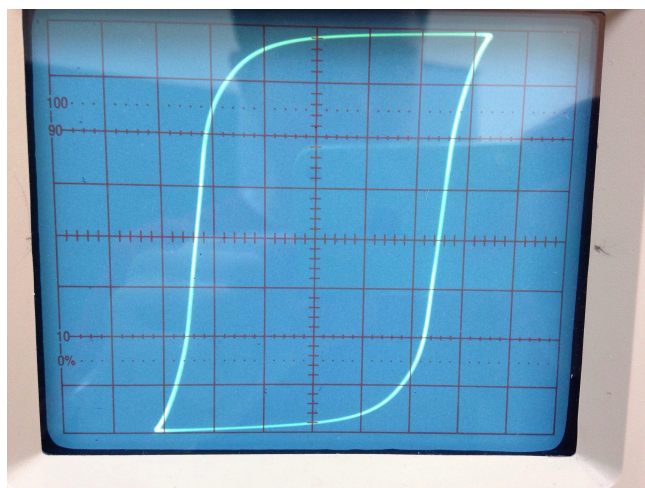
Для каждого материала зафиксируем предельную петлю и снимем начальную кривую намагничивания, плавно уменьшая ток до нуля и отмечая вершины наблюдаемых частных петель. Затем восстановим предельную петлю, измерим на экране двойные амплитуды для коэрцитивной силы $[2x(c)]$ и индукции насыщения $[2y(s)]$.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

Параметры схемы: $R_0 = 0,3 \text{ Ом}$; $R_u = 20 \text{ кОм}$ $C_u = 20 \text{ мкФ}$

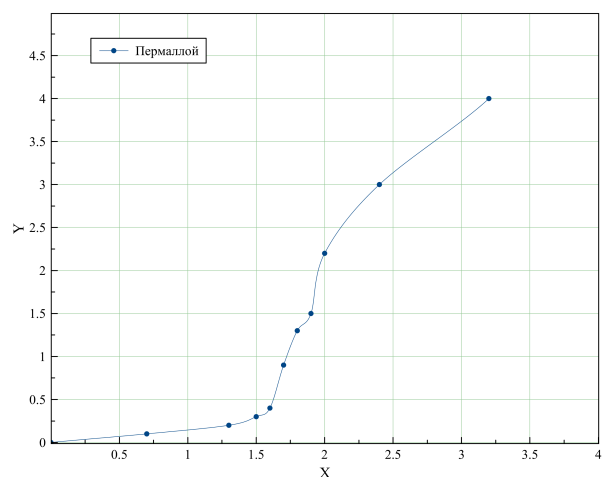
	Пермаллой	Феррит	Кремнистое железо
K_X , мВ/дел	20	10	20
K_Y , мВ/дел	50	10	50
I_{ef} , мА	234,5	117	234
$2\pi R$, см	24	25	10
N_0 , витков	35	40	40
N_U , витков	220	400	400
S , см ²	3,8	3,0	1,2
$2x(c)$, делений	6,6	7	10
$2y(s)$, делений	8	6	5,2

Таблица 1: Данные для трех ферромагнетиков

Пермаллой

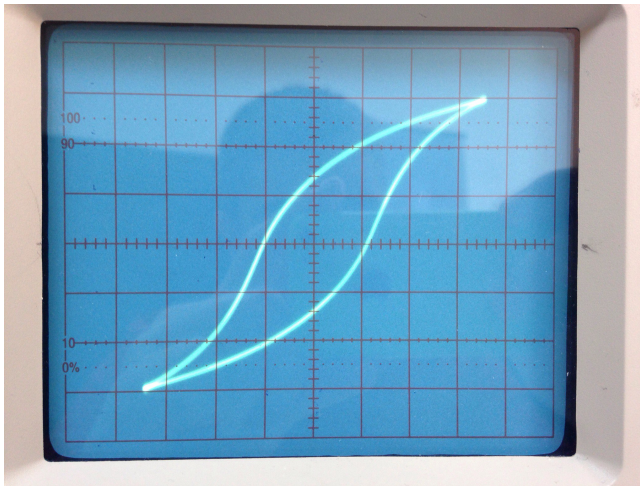


предельная петля

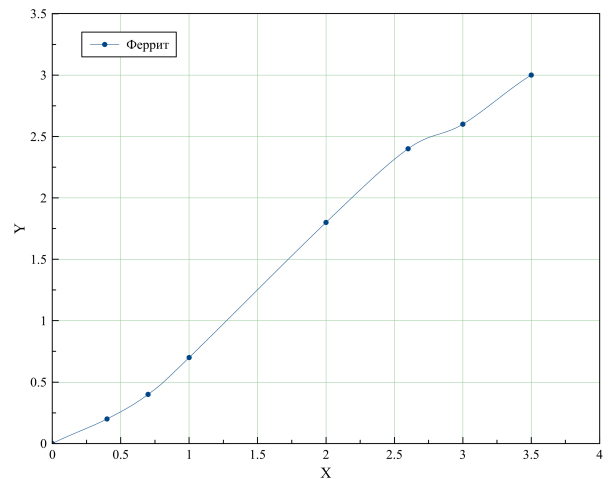


начальная кривая

Феррит

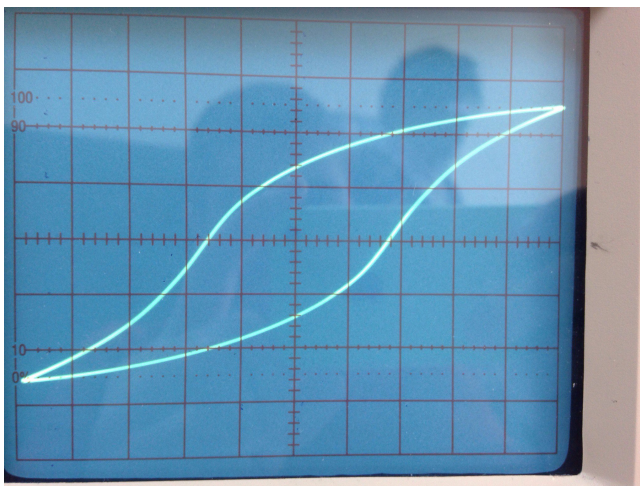


предельная петля

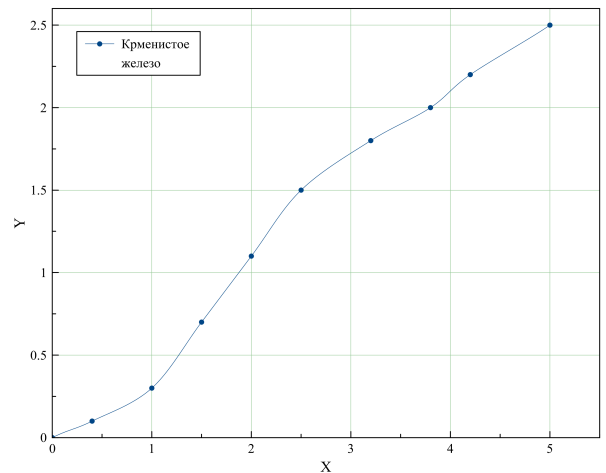


начальная кривая

Кремнистое железо



предельная петля



начальная кривая

2. Проверка калибровки оси X ЭО с помощью амперметра

Отключим намагничивающую обмотку N_0 от цепи; подберем такой ток через R_0 (с помощью реостата), при котором горизонтальная прямая занимает большую часть экрана; рассчитаем чувствительность канала m_x по формуле и сравним с K_X . $2x = 10$ делений.

$$m_x = \frac{2R_0\sqrt{2}I_{ef}}{(2x)}$$

- Пермаллой: $m_x = 19.0 \text{ мВ} \approx K_X$
- Феррит: $m_x = 9.93 \text{ мВ} \approx K_X$
- Кремнистое железо: $m_x = 19.86 \text{ мВ} \approx K_X$

3. Проверка калибровки оси Y ЭО с помощью вольтметра

Разберем цепь тороида; подберем (с помощью реостата) напряжение, при котором вертикальная прямая занимает большую часть экрана; измерим двойную амплитуду сигнала; определим эффективное значение напряжения. $2y = 8$ делений.

$$m_y = \frac{2\sqrt{2}U_{ef}}{(2y)}$$

- $K_Y = 20 \text{ мВ/дел}; U_{ef} = 139 \text{ мВ} \Rightarrow m_y = 49.1 \approx K_Y$
- $K_Y = 10 \text{ мВ/дел}; U_{ef} = 27.3 \text{ мВ} \Rightarrow m_y = 9.7 \approx K_Y$

4. Определение τ - постоянной времени RC-цепочки

Определим напряжения на входе и выходе интегрирующей ячейки: подключим Y-вход и отключим X-вход; установим чувствительность $K_Y \approx n \text{ В/дел}$; 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

- $K_Y = 50 \text{ мВ/дел}; 2y = 8; U_{in} = 2y \cdot K_Y = 400 \text{ мВ}$
- $K_Y = 50 \text{ мВ/дел}; 2y = 0.4; U_{ex} = 2y \cdot K_Y = 20 \text{ мВ}$

Имеем $\Omega = 50 \text{ Гц}; \tau = R_u C_u = 400 \text{ мс}$

$$\tau = RC = \frac{U_{in}}{\Omega U_{ex}} = 400 \text{ мс}$$

5. Дифференциальная магнитная проницаемость

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

$$\mu_{dif} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH},$$

где μ_0 - магнитная постоянная ($\mu_0 \approx 1,256 \text{ Н/А}^2$), 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

$$H = IN_0/(2\pi R); B = R_u C_u U_{ex}/(SN_u); U_{ex} = y \cdot K_Y$$

Результаты занесем в итоговую таблицу.

	Кремнистое железо	Пермаллой	Феррит
$H_c, \text{ А/м}$	90.6 ± 8.4	34.2 ± 3.1	18.8 ± 1.7
$B_s, \text{ Тл}$	1.09 ± 0.03	0.96 ± 0.03	0.10 ± 0.01
$\mu_{\text{диф}}^{\text{max}}, 10^3$	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 $\mu_{\text{диф}}^{\text{max}}$ для Пермаллоя – магнитная проницаемость достаточно меньше табличного значения, вследствие чего, скорее всего не совпало и значения для H_c . Такое отклонение можно связать 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.