

МФТИ

Лабораторная работа

Петля Гистерезиса (динамический
метод)

Выполнил:
Солодилов Михаил
(Б01-306)

Введение

Цель работы: изучение петель гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных токах.

В работе используются: автотрансформатор, понижающий трансформатор, интегрирующая цепочка, амперметр, вольтметр, электронный осциллограф, делитель напряжения, тороидальные образцы с двумя обмотками (с сердечниками из феррита, пермаллоя и кремнистого железа).

Теоретическая справка

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 рисунок 1.

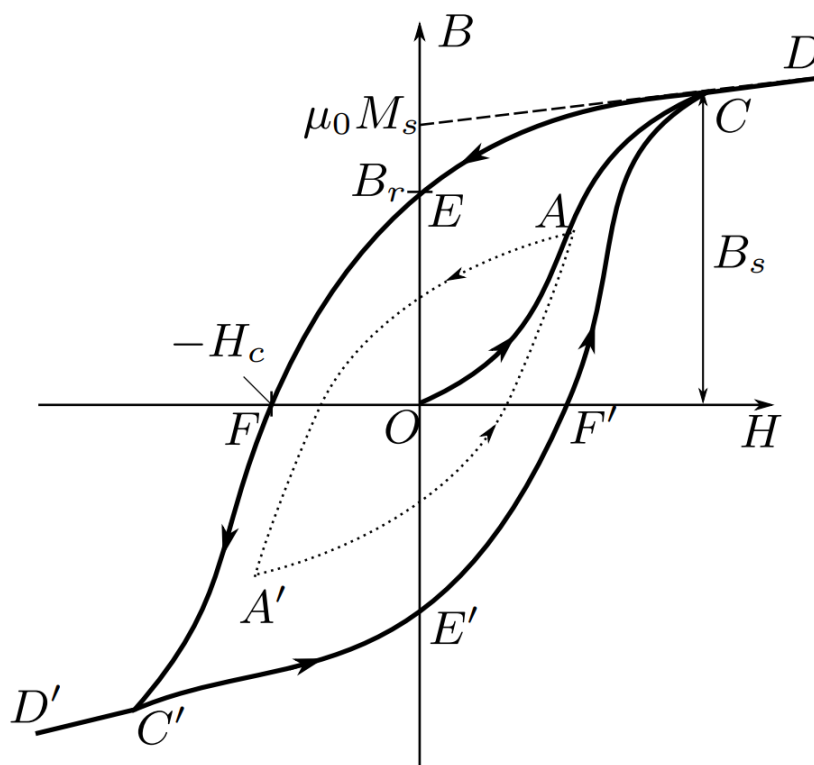


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

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 (например, петля AA' , обозначенная пунктиром на рисунке 1). Если амплитуда напряжённости достаточно велика, то образец будет периодически достигать *насыщения*, что на рисунке соответствует кривой $CERC'E'F'C'$ (*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 рисунке 1), лежат на *начальной кривой намагничивания* (OAC).

Измерение магнитной индукции. Магнитную индукцию B удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при измерении 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

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

Измерения напряжения с помощью осциллографа. Исследуемый сигнал подаётся на вход X : длина $2x$ горизонтальной черты, наблюдаемой на экране, характеризует удвоенную амплитуду сигнала.

Если известна чувствительность усилителя K_X в вольтах на деление шкалы экрана, то удвоенная амплитуда напряжения определяется произведением

$$2U_{X,0} = 2x \cdot K_X.$$

Напряжение, подаваемое на ось Y , измеряется аналогично.

Калибровку осей осциллографа (K_X и K_Y) 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 $K_{XI} = \frac{K_X}{R_0} \left[\frac{A}{\text{дел}} \right]$ и затем определить цену деления шкалы в $\frac{A}{m}$.

Зная чувствительность K_Y , можно рассчитать цену деления вертикальной шкалы ЭО в теслах.

Наличие в схеме амперметра и вольтметра позволяет провести *независимую калибровку* усилителей ЭО, т.е. проверить значения коэффициентов K_X и K_Y (ручки регулировки усиления ЭО могут быть сбиты).

Проверка калибровки горизонтальной оси ЭО с помощью амперметра проводится при закороченной обмотке N_0 . Эта обмотка с помещённым в неё ферромагнитным образцом является нелинейным элементом, так что ток в ней не имеет синусоидальной формы, и это не позволяет связать амплитуду тока с показаниями амперметра.

При закороченной обмотке N_0 амперметр A измеряет эффективное значение синусоидального тока $I_{\text{эф}}$, текущего через известное сопротивление R_0 . Сигнал с этого сопротивления подаётся на вход X ЭО. Измерив $2x$ – длину горизонтальной прямой на экране, можно рассчитать m_X – чувствительность канала X :

$$m_X = \frac{2\sqrt{2}R_0I_{\text{эф}}}{2x} \left[\frac{B}{\text{дел}} \right].$$

Проверка калибровки вертикальной оси ЭО с помощью вольтметра. Сигнал с обмотки 12,6 В понижающего трансформатора (2) подаётся на делитель напряжения. Часть этого напряжения снимается с делителя с коэффициентом деления K_d ($\frac{1}{10}$ или $\frac{1}{100}$) и подаётся на вход Y ЭО (вместо напряжения U_C). Мультиметр V измеряет напряжение $U_{\text{эф}}$ на этих же клеммах делителя. Измерив $2y$ – длину вертикальной прямой на экране, можно рассчитать чувствительность канала Y :

$$m_Y = \frac{2\sqrt{2}R_0U_{\text{эф}}}{2x} \left[\frac{B}{\text{дел}} \right].$$

При этом тороид должен быть отключен, так как несинусоидальный ток нагрузки в первичной обмотке тороида приводит к искажению формы кривой напряжения и на обмотке трансформатора, питающей делитель.

Постоянную времени RC-цепочки можно определить экспериментально. С обмотки 6,3 В на вход интегрирующей цепочки подаётся синусоидальное напряжения $U_{\text{вх}}$. На вход Y осциллографа поочередно подаются сигналы со входа ($U_{\text{вх}}$) и выхода ($U_{\text{вых}}$) RC-цепочки. Измерив амплитуды этих сигналов с помощью осциллографа, можно рассчитать постоянную времени $\tau = RC$. Тогда

$$RC = \frac{U_{\text{вх}}}{\Omega U_{\text{вых}}}.$$

Ход работы

I. Петля гистерезиса на экране ЭО

Соберём схему согласно 2 и подготовим приборы к работе. Подберём ток питания в намагничивающей обмотке с помощью реостата и коэффициенты усиления ЭО так, чтобы предельная петля гистерезиса

занимала большую часть экрана. Получив предельную петлю, уменьшим ток до исчезновения на ней "усов" – почти горизонтальных участков по краям. Отцентрируем вертикальный и горизонтальный лучи.

Для каждого образца сделаем фотографию предельной петли так, чтобы по ней можно было с хорошей точностью восстановить форму последней. Сфотографируем кривую при ещё двух различных значениях тока при его уменьшении, и полученные оттуда координаты концов частных петель используем для проведения кривой. Эта кривая будет проходить в непосредственной близости от начальной кривой намагничивания. Кривая намагничивания и предельная петля для каждого из образцов показаны на рисунках 3, 4 и 5. Кривые проведены с помощью кубических сплайнов.

Рассчитаем цену деления ЭО для петли в $\frac{A}{m}$ для оси X по формуле

$$H = \frac{N_0 K_X}{2\pi R R_0}$$

и в Тл для оси Y

$$B = \frac{R_{\text{и}} C_{\text{и}} K_Y}{S N_{\text{и}}}.$$

Измерим по предельной петле двойные амплитуды для коэрцитивной силы $[2x(c)]$ и индукции насыщения $[2y(s)]$. Все измеренные и рассчитанные значения, равно как и параметры образца (N_0 , $N_{\text{и}}$, S и $2\pi R$), значения коэффициентов усиления K_X и K_Y и ток $I_{\text{эф}}$ в намагничивающей обмотке для каждого образца занесём в сводную таблицу 1. Занесём туда также вычисленную из наклона кривых намагничивания дифференциальную магнитную проницаемость $\mu_{\text{диф}}$ вблизи нуля и справочные величины для образцов.

Источником погрешностей в финальных ответах служат погрешности чувствительности каналов осциллографа и погрешности определения размеров по экранной сетке осциллографа. В погрешность магнитной проницаемости вносит вклад также неточность определения её по угловому коэффициенту касательной к графику. Опустим вычисление погрешностей ввиду его громоздкости, и приведём их непосредственно в таблице для последних трёх строк.

Таблица 1: Параметры образцов из (А) пермаллоя, (В) феррита и (С) кремнистого железа

	А	В	С
N_0	35	40	40
$N_{\text{и}}$	220	400	400
S , см ²	3,8	3,0	1,2
$2\pi R$, см	24	25	10
$I_{\text{эф}}$, А	0,158	0,119	0,455
K_X , $\frac{mB}{\text{дел}}$	20,0	20,0	50,0
K_Y , $\frac{mB}{\text{дел}}$	100,0	10,0	50,0
H , $\frac{A}{m}$	9,72	10,67	66,7
B , Тл	0,478	0,033	0,417
$2x(c)$	2,37	0,61	0,73
$2y(s)$	1,86	1,64	1,54
H_c , $\frac{A}{m}$	$3,89 \pm 0,15$	$8,20 \pm 0,23$	$8,01 \pm 0,18$
B_s , Тл	$1,01 \pm 0,09$	$0,26 \pm 0,04$	$1,93 \pm 0,21$
$\mu_{\text{диф}}$, 10^3	$7,6 \pm 0,6$	$1,2 \pm 0,2$	$1,6 \pm 0,3$
H_{c0} , $\frac{A}{m}$	4,00	8,00	8,00
B_{s0} , Тл	1,08	0,25	2,00
$\mu_{\text{диф}0}$, 10^3	8,00	1,00	1,50

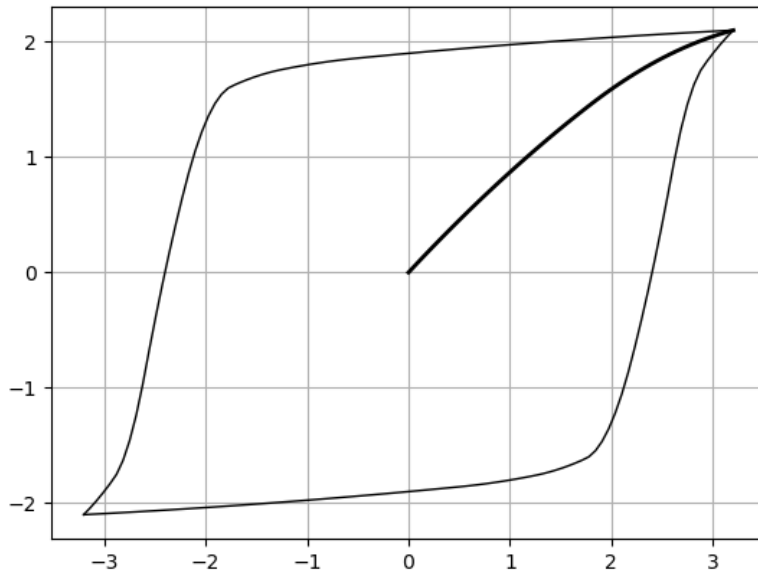


Рис. 3: Предельная петля гистерезиса и начальная кривая намагничивания для образца из пермаллоя. Восстановлено по точкам, снятым с экрана ЭО, с помощью кубических сплайнов

II. Проверка калибровки оси X ЭО с помощью амперметра

Отключим намагничивающую обмотку N_0 от цепи, соединив оба провода, идущих к обмотке, на одной из её клемм. С помощью R_1 подберём такой ток через сопротивление R_0 , при котором горизонтальная прямая занимает большую часть экрана ЭО для рабочего коэффициента $K_X = 50,0 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$. Ток через амперметр при этом равен $I_{\text{эф}} = (0,583 \pm 0,004) \text{ А}$, сопротивление $R_0 = 0,3 \Omega$, а горизонтальная прямая на экране занимает $(10,0 \pm 0,1)$ дел (здесь погрешность определения размер прямой на экране осциллографа равна половине цены малых делений экранной сетки, то есть 0,1 дел, а погрешность мультиметра GDM равна $0,005I + 15$ ед. мл. разряда). Тогда чувствительность канала равна $m_X = (49,5 \pm 0,6) \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$, откуда можно заключить, что $m_X = K_X$ в пределах погрешности $\epsilon_X = 1,3 \%$.

III. Проверка калибровки оси Y ЭО с помощью вольтметра

Соединим вход Y ЭО с клеммами делителя " $\frac{1}{100}$ —земля". Не меняя рабочего коэффициента $K_Y = 50,0 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$, подберём с помощью потенциометра R_2 напряжение, при котором вертикальная прямая занимает почти весь экран. Подключим вольтметр V к тем же точкам делителя и измерим эффективное значение напряжения. Получим $U = (0,145 \pm 0,003) \text{ В}$ и длину вертикальной прямой $(8,0 \pm 0,1)$ дел, откуда $m_Y = (50,4 \pm 1,0) \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$, откуда можно заключить, что $m_Y = K_Y$ в пределах погрешности $\epsilon_Y = 2,0 \%$.

IV. Определение τ — постоянной времени RC -цепочки

Для определения напряжений на входе и выходе интегрирующей ячейки соединим вход ячейки с обмоткой 6,3 В трансформатора. Подключим Y -вход ЭО ко входу интегрирующей ячейки и отключим X -вход ЭО. Установим чувствительность $K_Y = 2,00 \frac{\text{В}}{\text{дел}}$ и подберём с помощью реостата такой ток, при котором вертикальная прямая занимает большую часть экрана, и определим входное напряжение на RC -цепочке как $U_{\text{вх}} = 2y \cdot K_Y = (16,0 \pm 0,2) \text{ В}$.

Теперь, не изменяя тока, переключим Y -вход ЭО к выходу ячейки (конденсатору C), установим $K_Y = 20,0 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$ и аналогичным образом определим напряжение $U_{\text{вых}} = (124,0 \pm 2,0) \text{ мВ}$.

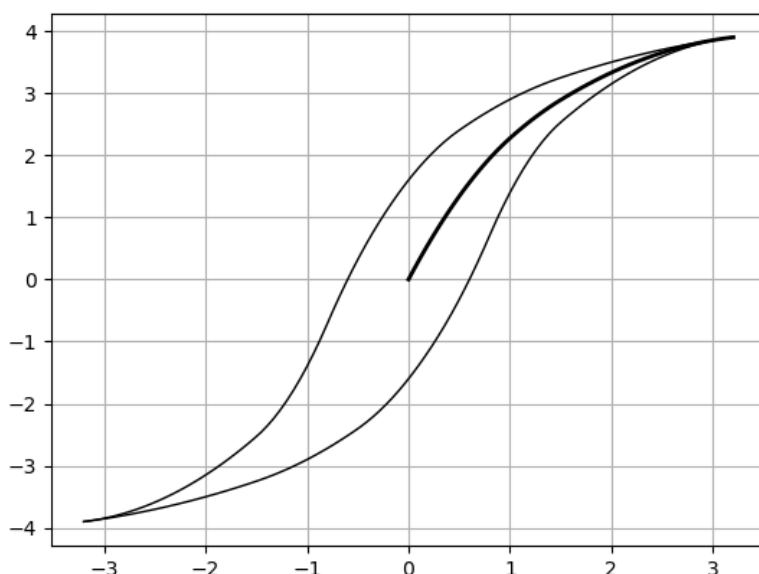


Рис. 4: Предельная петля гистерезиса и начальная кривая намагничивания для образца из феррита. Восстановлено по точкам, снятым с экрана ЭО, с помощью кубических сплайнов

Рассчитаем постоянную времени, получим $\tau = (0,408 \pm 0,008)$ с. Ту же величину через указанные на установке параметры $R_{\text{и}} = 20$ к Ω , $C_{\text{и}} = 20$ мкФ найдём как $\tau = 0,400$ с. Видим, что полученные значения совпадают в пределах погрешности.

Несложно заметить, что $R = 20,0$ к Ω , $\frac{1}{\Omega C} = 159,2$ Ω , потому условие $R \gg \frac{1}{\Omega C}$ выполняется.

Вывод

В данной работе были изучены петли гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных токах.

В первой части работы были получены предельные петли и начальные кривые намагничивания для образцов из пермаллоя, феррита и кремнистого железа. По точкам, снятым с экрана ЭО, с помощью кубических сплайнов восстановлены петли и кривые (см. рисунки 3, 4 и 5). Были рассчитаны цены деления ЭО для петель в $\frac{\text{А}}{\text{м}}$ для оси X и в Тл для оси Y , откуда были найдены коэрцитивная сила H_c , индукция насыщения B_s и дифференциальная магнитная проницаемость $\mu_{\text{диф}}$ образцов вблизи нуля (см. таблицу 1). Совпадение в пределах погрешности вычисленных значений со справочными для каждого из образцов говорит о хорошей точности используемого метода и корректности проведения эксперимента.

Во второй и третьей частях работы была проведена проверка калибровок осей ЭО с помощью вольтметра и амперметра. Для рабочих коэффициентов $K_X = 50 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$ и $K_Y = 50 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$ получены значения чувствительности каналов $m_X = (49,5 \pm 0,6) \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$ и $m_Y = (50,4 \pm 1,0) \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$ соответственно, что означает, что в пределах погрешностей чувствительности каналов равны указанным на осциллографе, что ещё раз подтверждает исправность работы ЭО.

В последней части работы была экспериментально проверена постоянная времени интегрирующей цепочки, которая получилась равной $\tau = (0,408 \pm 0,008)$ с, т.е. в пределах погрешности совпадающей с $\tau = 0,400$ с, рассчитанной по указанным на установке величинам. Также было подтверждено условие применимости приближений, в которых работает RC -цепочка. Полученный результат и его относительно невысокая погрешность подтверждают исправность работы цепочки.

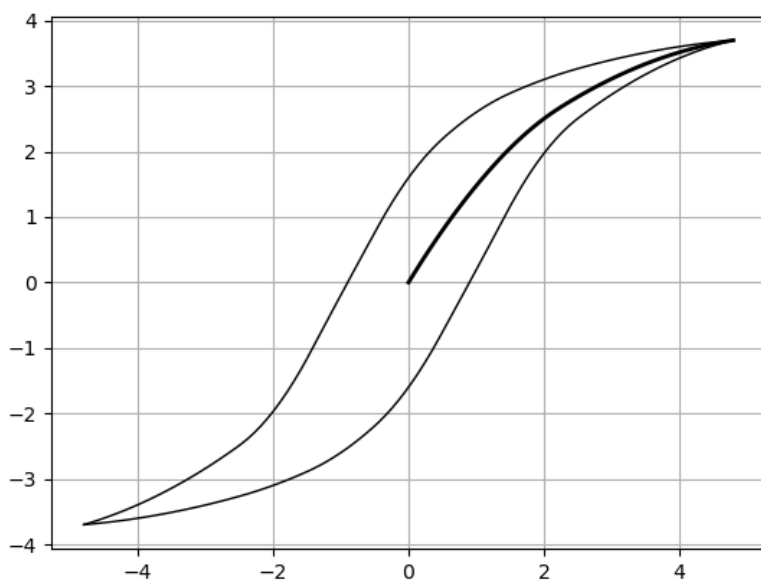


Рис. 5: Предельная петля гистерезиса и начальная кривая намагничивания для образца из кремнистого железа. Восстановлено по точкам, снятым с экрана ЭО, с помощью кубических сплайнов