



Московский Физико-Технический Институт
(национальный исследовательский университет)

Отчет по эксперименту

Петля гистерезиса (динамический метод)

Работа №3.4.5; дата: 04.11.22

Семестр: 3

Выполнил:
Кошелев Александр

Группа:
Б05-105

1. Аннотация

Цель работы:

Изучение петель гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных полях.

Схема установки:

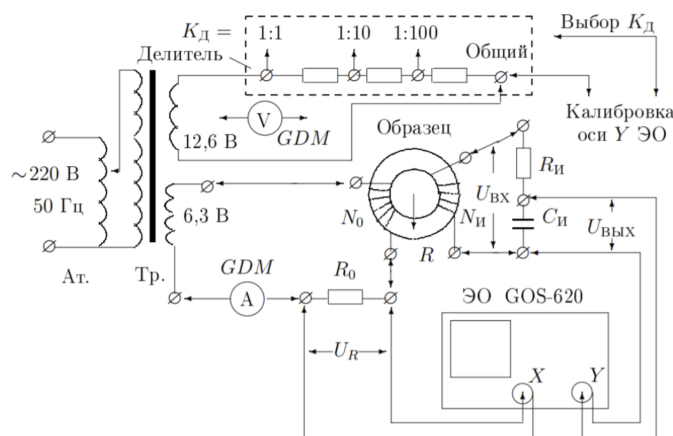


Рис. 1: Схема установки

Схема установки изображена на рисунке. Напряжение сети с помощью трансформаторного блока T , состоящего из регулировочного автотрансформатора и разделительного понижающего трансформатора, подаётся на намагничивающую обмотку N_0 исследуемого образца.

В цепь намагничивающей катушки, на которую подаётся некоторое напряжение U_0 , последовательно включено сопротивление R_0 . Напряжение на R_0 , равное $U_R = I_0 R_0$, 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 обмотки N_i на вход RC -цепочки подаётся напряжение U_i ($U_{вх}$), пропорциональное производной dB/dt . С интегрирующей ёмкости C_i снимается напряжение $U_{и}$ ($U_{вых}$), пропорциональное величине B , и подаётся на вход Y осциллографа.

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.

В работе используются:

Автотрансформатор, понижающий трансформатор, интегрирующая цепочка, амперметр, вольтметр, электронный осциллограф, делитель напряжения, тороидальные образцы с двумя обмотками.

2. Теоретические сведения

Петля гистерезиса

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.

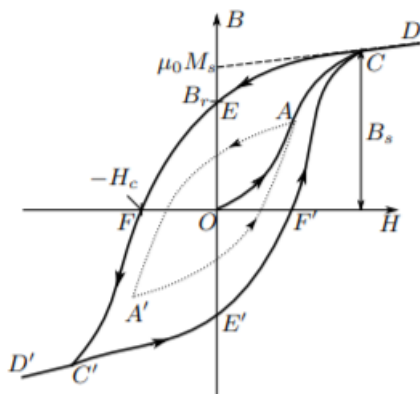


Рис. 2: Петля гистерезиса ферромагнетика

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 типичного ферромагнетика иллюстрирует рис. 2.

Если к ферромагнитному образцу прикладывать переменное внешнее магнитное поле, то его состояние на плоскости $B-H$ будет изменяться по замкнутой кривой — петле гистерезиса. Размер петли определяется максимальным значением напряжённости H в цикле (например, петля AA' , обозначенная пунктиром на рис. 2). 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. 2), 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

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

Для интегрирования в работе используется интегрирующая RC -цепочка.

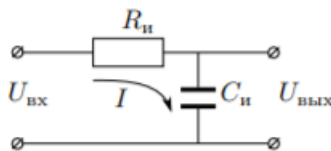


Рис. 3: Интегрирующая ячейка

«Входное» напряжение от источника $U_{\text{вх}}(t)$ подаётся на последовательно соединённые резистор $R_{\text{и}}$ и конденсатор $C_{\text{и}}$. «Выходное» напряжение $U_{\text{вых}}(t)$ снимается с конденсатора. Предположим, что сопротивление источника мало по сравнению с $R_{\text{и}}$; выходное сопротивление (сопротивление на входе осциллографа), напротив, велико: $R_{\text{вых}} \gg R_{\text{и}}$ и, наконец, сопротивление $R_{\text{и}}$ 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 $I = (U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}})/R_{\text{и}} \approx U_{\text{вх}}/R_{\text{и}}$, и входное и выходное сопротивление связаны соотношением

$$U_{\text{БЫХ}} = \frac{q}{C_{\text{и}}} = \frac{1}{C_{\text{и}}} \int_0^t I dt \approx \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \int_0^t U_{\text{БХ}} dt$$

где $\tau_{\text{и}} = R_{\text{и}}C_{\text{и}}$ - постоянная времени RC - цепочки. Для индукции поля из получаем

$$|B| = \frac{1}{SN} \int U_{\text{вх}} dt = \frac{\tau_{\text{и}}}{SN} U_{\text{вых}}.$$

Уточним критерий применимости. 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:

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

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

$$\tau \equiv RC \gg \frac{1}{\omega_0}$$

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

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \approx \frac{1}{\omega_0 \tau}$$

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 $\omega > \omega_0$.

3. Ход работы

Измерение петель гистерезиса

Соберем схему согласно схеме установки. Подберем ток питания в намагничивающей обмотке с помощью автотрансформатора и коэффициенты усиления ЭО таким образом, чтобы предельная петля гистерезиса занимала большую часть экрана. Приведем характерные значения катушек разных материалов в таблице.

Материал	N_0	$N_{\text{и}}$	S^2 , см ²	$2\pi R$, см
Феррит	40	400	3,0	25,0
Пермаллой	20	300	0,8	13,3
Крем. железо	25	250	2,0	11,0

Табл. 1: Характеристики катушек

Для каждого образца получим передельные петли гистерезиса, по коэффициентам усиления ЭО K_x и K_y рассчитаем масштабы, определим двойные амплитуды коэрцитивной силы $[2x(c)]$ и индукции насыщения $[2y(s)]$. Масштабы по осям X и Y рассчитаем по формулам $H = IN_0/(2\pi R)$, $I = K_x/R_0$; $B = R_{\text{и}}C_{\text{и}}U_{\text{вых}}/(SN_{\text{и}})$, где $U_{\text{вых}} = K_y$. Результаты измерений и вычислений занесём в таблицы.

Материал	$[2x(c)]$, дел	$[2y(s)]$, дел	K_x , мВ/дел	K_y , мВ/дел
Феррит	1,0	4,8	20	20
Пермаллой	3,6	3,6	20	50
Крем. железо	1,2	4,4	100	50

Табл. 2: Масштабы по осям

Материал	$I_{эфф}$, мА	H , $A \cdot m^{-1}$ / дел	B , Тл/дел
Феррит	215	14,5	0,07
Пермаллой	165	13,7	0,88
Крем. железо	238	103,3	0,40

Табл. 3: Результаты измерений

Теперь, зная масштабы по осям, можно определить значения коэрцитивной силы H_c и индукции насыщения B_s . Результаты также заносим в таблицу.

Материал	H_c , А/м	σ_{H_c} , А/м	B_s , Тл	σ_{B_s} , Тл
Феррит	7,27	0,76	0,16	0,01
Пермаллой	24,61	2,20	1,58	0,13
Крем. железо	61,98	7,30	0,88	0,06

Табл. 4: Результаты вычислений

Также приведём фотографии предельных петель гистерезиса.

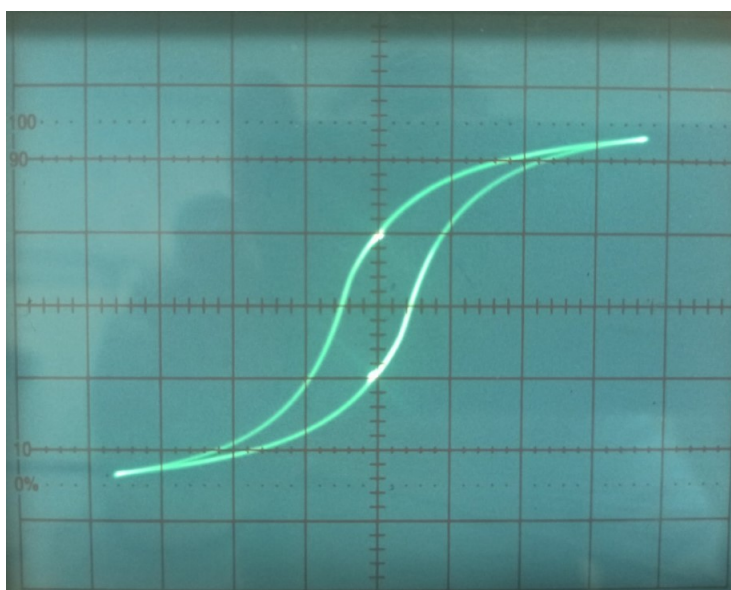


Рис. 4: Предельная петля гистерезиса феррита

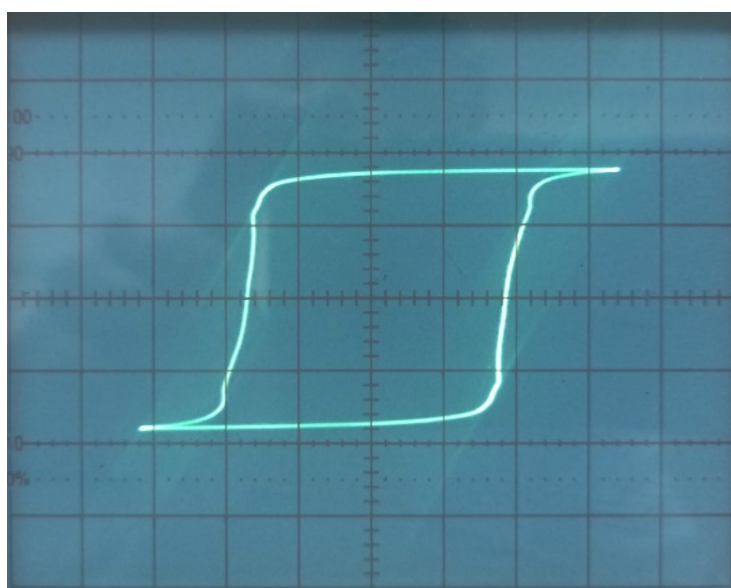


Рис. 5: Предельная петля гистерезиса пермаллоя

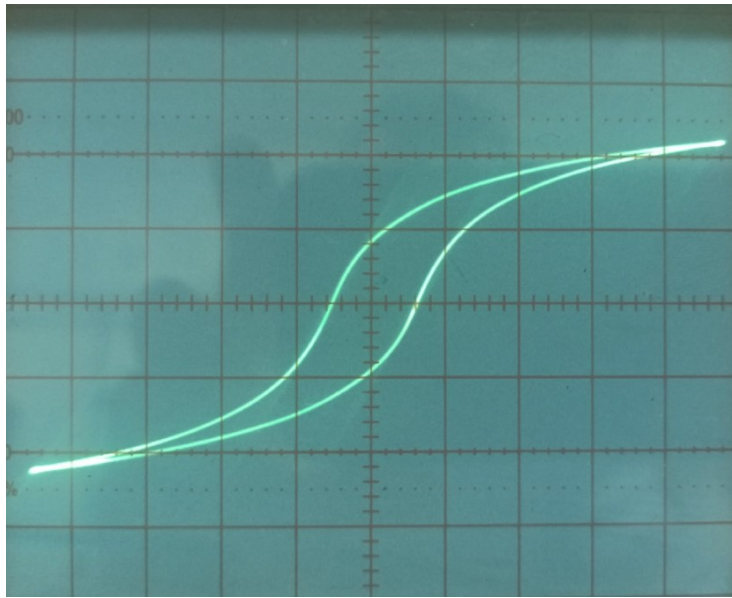


Рис. 6: Предельная петля гистерезиса кремнистого железа

В следующую таблицу занесём табличные данные для значений коэрцитивной силы H_c и индукции насыщения B_s .

Проверка применимости теоретической выкладки

Для этого рассчитаем τ – постоянную 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. Подберем такой ток, чтобы вертикальная прямая занимала большую часть экрана, и определим входное напряжение $U_{вх} = 2y \cdot K_y = 6,8 \text{ дел} \cdot 2 \text{ В/дел} = 13,6 \text{ В}$. Не меняя тока, подключим Y-вход ЭО к выходу ячейки и аналогичным образом определим $U_{вых} = 2y \cdot K_y = 5,2 \text{ дел} \cdot 0,02 \text{ В/дел} = 0,104 \text{ В}$. Рассчитаем $\tau = \frac{U_{вх}}{\omega U_{вых}} = \frac{13,6}{0,104 \cdot 2\pi \cdot 50} = 0,416 \text{ с}$, где $\omega = 2\pi\nu$. По определению $\tau_{RC} = R_{и}C_{и} = 0,4 \text{ с}$. Так как $\tau \approx \tau_{RC}$, то условия применимости нашей теории выполнены.

4. Выводы

В ходе выполнения данной лабораторной работы были исследованы петли гистерезиса для трех различных образцов и получены характерные величины для каждого образца, приведем сравнительную таблицу:

Материал	H_c , А/м	\tilde{H}_c , А/м	B_s , Тл	\tilde{B}_s , Тл
Феррит	7.27 ± 0.76	20	0.16 ± 0.01	0,27
Пермаллой	24.61 ± 2.20	11-40	1.58 ± 0.13	1.51
Крем. железо	61.98 ± 7.30	50-100	0.88 ± 0.06	1.21

Табл. 5: Сравнительная таблица