

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3.4.5

Петля Гистерезиса (динамический метод)

Сифат Мд Абдуллах Ал Хасиб
Факультет физической и квантовой электроники
Группа Б04-105

8 декабря 2022 г.

1 Введение

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

В работе используются: автотрансформатор, понижающий трансформатор, интегрирующая цепочка, амперметр, вольтметр, электронный осциллограф, делитель напряжения, тороидальные образцы с двумя обмотками.

2 Теоретические сведения

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.

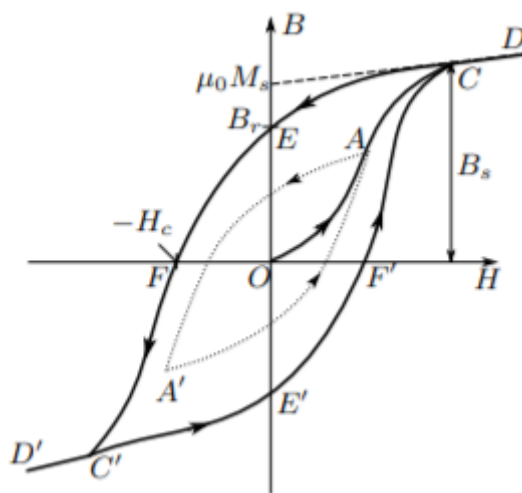


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

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. 1.

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. 1). 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. 1), 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

$$|B| = \frac{1}{SN} \int \mathcal{E} dt. \quad (1)$$

Для интегрирования в работе используется интегрирующая RC -цепочка (рис. 2). «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 1) сопротивление источника мало по сравнению с $R_{\text{и}}$, 2) выходное сопротивление (сопротивление на входе осциллографа), напротив, велико: $R_{\text{вых}} \gg R_{\text{и}}$ и, наконец, 3) 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

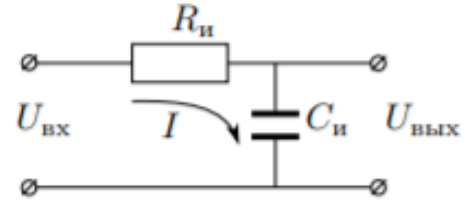


Рис. 2: Интегрирующая ячейка

$$U_{\text{вых}} = \frac{q}{C_{\text{и}}} = \frac{1}{C_{\text{и}}} \int_0^t I dt \approx \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \int_0^t U_{\text{вх}} dt, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{и}} = R_{\text{и}}C_{\text{и}}$ - постоянная времени RC - цепочки. Для индукции поля из (1) получаем

$$|B| = \frac{1}{SN} \int U_{\text{вх}} dt = \frac{\tau_{\text{и}}}{SN} U_{\text{вых}}. \quad (3)$$

Замечание. Уточним критерий применимости соотношения (2). 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:

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1/\omega_0 C}{\sqrt{R^2 + 1/(\omega_0 C)^2}}. \quad (4)$$

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

$$\tau \equiv RC \gg \frac{1}{\omega_0} \quad (5)$$

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

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \approx \frac{1}{\omega_0 \tau}. \quad (6)$$

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 Экспериментальная установка

Схема установки изображена на рис. 3. Напряжение сети (220 В, 50 Гц) с помощью трансформаторного блока Т, состоящего из регулировочного автотрансформатора и разделительного понижающего трансформатора, подаётся на намагничивающую обмотку N_0 исследуемого образца.

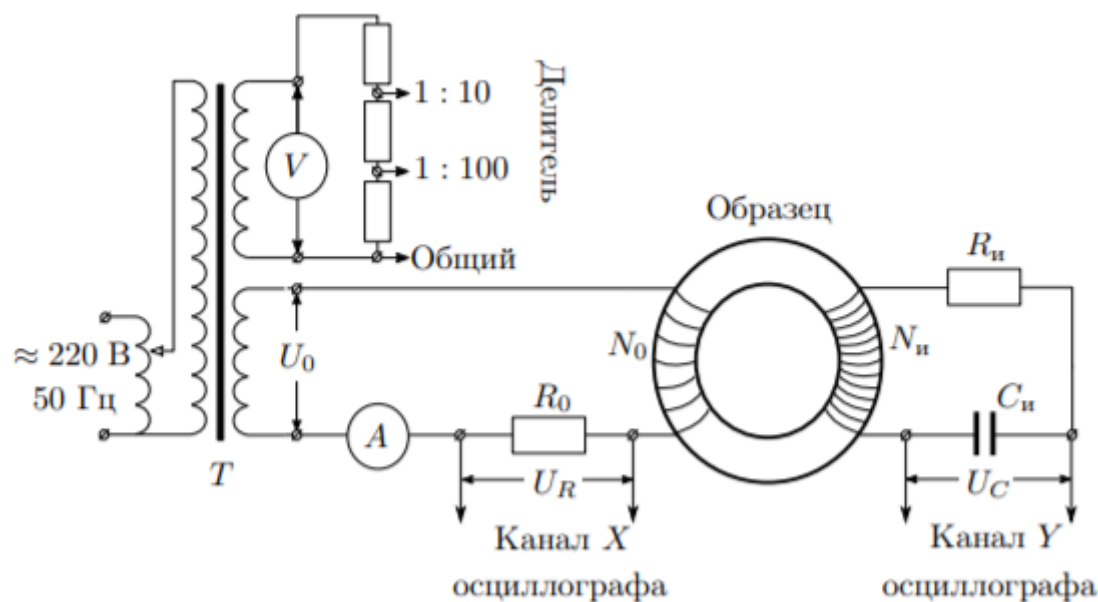


Рис. 3: Схема установки для исследования намагничивания образцов

В цепь намагничивающей катушки, на которую подаётся некоторое напряжение U_0 , последовательно включено сопротивление R_0 . Напряжение на R_0 , равное $U_R = R_0 I_0$, 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 А. 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_C ($U_{вых}$), пропорциональное величине B , и подаётся на вход Y осциллографа. Значение индукции поля B рассчитывается по формуле (3). 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.

4 Измерение петель гистерезиса

Соберем схему согласно рис. 3. 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 1.

Материал	N_0	N_i	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

Таблица 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 таблицу 2.

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

Материал	$I_{\text{эфф}}$, мА	H , А·м ⁻¹ / дел	B , Тл/дел
Феррит	208	15,1	0,04
Пермаллой	172	12,3	0,87
Крем. железо	223	101,8	0,38

Таблица 2: Результаты измерений

Теперь, зная масштабы по осям, можно определить значения коэрцитивной силы H_c и индукции насыщения B_s . Результаты заносим в таблицу 3.

Материал	H_c , А/м	σ_{H_c} , А/м	B_s , Тл	σ_{B_s} , Тл
Феррит	6,27	0,77	0,18	0,04
Пермаллой	23,61	2,03	1,42	0,24
Крем. железо	60,98	6,25	0,78	0,13

Таблица 3: Результаты вычислений

Также в следующую таблицу 4 занесём табличные данные для значений коэрцитивной силы H_c и индукции насыщения B_s .

Материал	H_c , А/м	B_s , Тл
Феррит	20	0,27
Пермаллой	11–40	1,51
Крем. железо	50–100	1,21

Таблица 4: Табличные данные

Сравнивая полученные данные с табличными можно утверждать, что они совпадают, по крайней мере по порядку величины. Также приведём фотографии предельных петель гистерезиса.

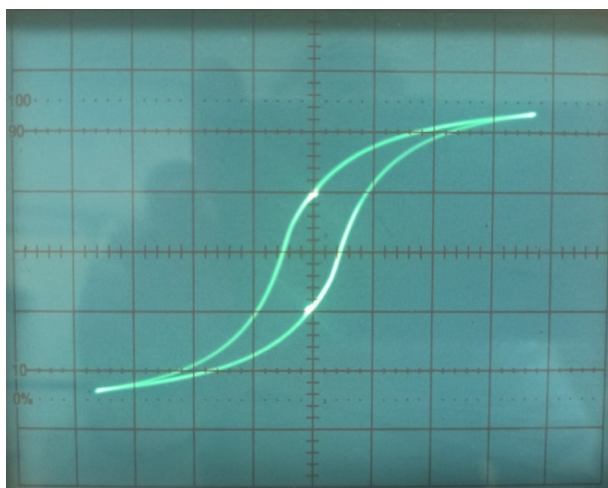


Рис. 4: Предельная петля гистерезиса феррита

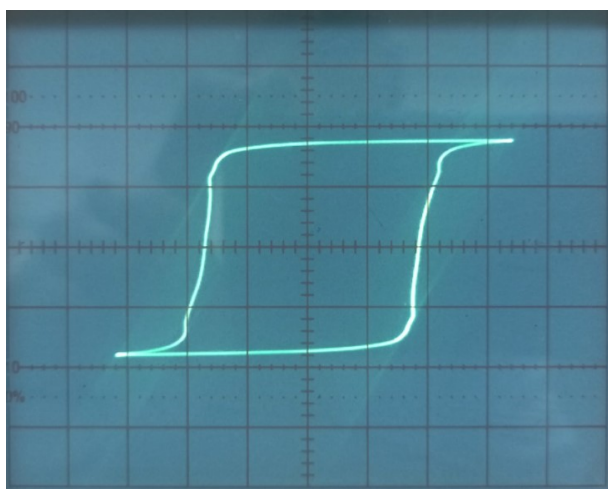


Рис. 5: Предельная петля гистерезиса пермаллоя

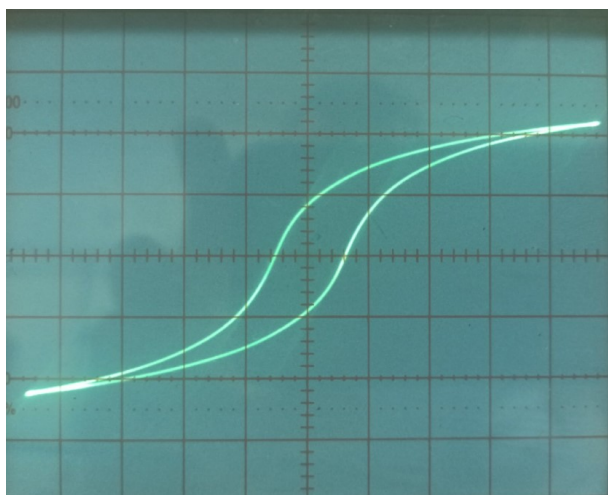


Рис. 6: Предельная петля гистерезиса для кремнистого железа

5 Проверка калибровки осциллографа

Проверим калибровку ЭО по оси Х. Отключим намагничивающую обмотку N_0 от цепи, соединив оба провода, идущих к обмотке, на одной ее клемме. С помощью автотрансформатора

подберем такой ток через R_0 , при котором горизонтальная прямая занимает большую часть экрана. При $K_x = 0,1$ В/дел рассчитаем чувствительность $m_x = 0,087$ В/дел.

Аналогичные действия проводим при $K_x = 0,02$ В/дел. Получаем $m_x = 0,023$ В/дел.

Так как $m_x \approx K_x$, ЭО откалиброван по оси X корректно.

Также необходимо проверить калибровку по оси Y. Для этого соединим вход Y ЭО с клеммам делителя "1:100 - земля". Не меняя рабочего коэффициента $K_y = 0,05$ В/дел, подберем с помощью трансформатора напряжение, при котором вертикальная прямая занимает большую часть экрана. Подключим вольтметр V к тем же клеммам делителя и, используя измеренное $U_{эф}$, рассчитаем чувствительность $m_y = 0,029$ В/дел.

Те же действия повторяем при $K_y = 0,02$ В/дел. Получаем $m_y = 0,014$ В/дел.

Так как $m_y \approx K_y$, ЭО откалиброван по оси Y корректно.

6 Проверка применимости теоретических выкладок

Проверим применимость формулы (2). 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 $U_{вх} = 2y \cdot K_y = 6,8$ дел $\cdot 2$ В/дел = 13,6 В. Не меняя тока, подключим Y-вход ЭО к выходу ячейки и аналогичным образом определим $U_{вых} = 2y \cdot K_y = 5,2$ дел $\cdot 0,02$ В/дел = 0,104 В. Рассчитаем $\tau = \frac{U_{вх}}{\omega U_{вых}} = \frac{13,6}{0,104 \cdot 2\pi \cdot 50} = 0,416$ с, где $\omega = 2\pi\nu$. По определению $\tau_{RC} = R_n C_n = 0,4$ с. Так как $\tau \approx \tau_{RC}$, то условия применимости нашей теории выполнены.

7 Выводы

В ходе выполнения данной лабораторной работы были исследованы петли гистерезиса для трех различных образцов и получены характерные величины для каждого образца, которые сошлись с табличными значениями по порядку величины. Кроме того, была проверена применимость используемого метода в условиях нашего эксперимента. В итоге было установлено, что условия применимости выполняются и метод является неплохим способом определения характерных параметров для ферромагнитных материалов.