

Московский Физико-технический Институт
(Национальный исследовательский университет)

Отчет о выполнении работы 3.4.5

Петля гистерезиса (динамический метод)

Выполнили студентки 2 курса
ФБМФ, группа Б06-103
Попеску Полина
Фитэль Алёна

Долгопрудный, 2022 г.

где N_0 – число витков намагничивающей обмотки. напряженность магнитного поля в тороидальном образце зависит от R , поэтому при $r \ll R$ мы будем иметь достаточно однородную намагниченность образца.

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

$$|B| = \frac{1}{SN} \int \mathcal{E} dt. \quad (3)$$

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

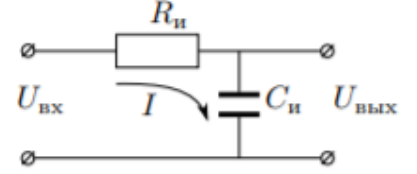


Рис. 2: Интегрирующая ячейка

$$U_{\text{вых}} = \frac{q}{C_{\text{и}}} = \frac{1}{C_{\text{и}}} \int_0^t I dt \approx \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \int_0^t U_{\text{вх}} dt, \quad (4)$$

где $\tau_{\text{и}} = R_{\text{и}}C_{\text{и}}$ - постоянная времени RC - цепочки. Для индукции поля из (3) получаем

$$|B| = \frac{1}{SN} \int U_{\text{вх}} dt = \frac{\tau_{\text{и}}}{SN} U_{\text{вых}}. \quad (5)$$

Замечание. Уточним критерий применимости соотношения (4). 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:

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1/\omega_0 C}{\sqrt{R^2 + 1/(\omega_0 C)^2}}. \quad (6)$$

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

$$\tau \equiv RC \gg \frac{1}{\omega_0} \quad (7)$$

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

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \approx \frac{1}{\omega_0 \tau}. \quad (8)$$

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

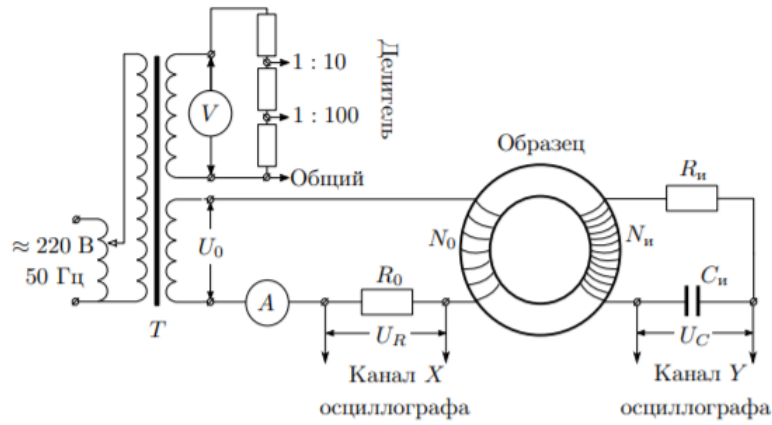


Рис. 3: Схема установки для исследования намагничивания образцов

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 $U_R = R_0 I_0$, 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 A . Для измерения магнитной индукции B с измерительной обмотки $N_{\text{и}}$ на вход RC -цепочки подаётся напряжение $U_{\text{и}}$ ($U_{\text{вх}}$), пропорциональное производной dB/dt . С интегрирующей ёмкости $C_{\text{и}}$ снимается напряжение U_C ($U_{\text{вых}}$), пропорциональное величине B , и подаётся на вход Y осциллографа. Значение индукции поля B рассчитывается по формуле (5). 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 Ход работы

4.1 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	$N_{\text{и}}$	$S^2, \text{см}^2$	$2\pi R, \text{см}$
Феррит	45	400	3,0	25,0
Пермаллой	15	300	0,66	14,1
Крем. железо	20	200	2,0	11,0

Таблица 1: Характеристики катушек

Для каждого образца получим предельные 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 $H = IN_0/(2\pi R)$, где $I = K_x/R_0$; $B = R_{\text{и}} C_{\text{и}} U_{\text{вых}}/(S N_{\text{и}})$, где $U_{\text{вых}} = K_y$. Результаты измерений и вычислений занесём в таблицы 2,3.

Материал	$[2x(c)], \text{ дел}$	$[2y(s)], \text{ дел}$	$K_x, \text{ мВ/дел}$	$K_y, \text{ мВ/дел}$
Феррит	3,1	2,1	20	20
Пермаллой	3,1	2,9	20	100
Крем. железо	1,2	2,0	20	100

Таблица 2: Результаты измерений

Материал	$I_{\text{эфф}}, \text{ мА}$	$H, \text{ А}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{дел}^{-1}$	$B, \text{ Тл/дел}$
Феррит	253	$9,3 \pm 0,9$	$0,067 \pm 0,007$
Пермаллой	152	10 ± 1	$0,095 \pm 0,001$
Крем. железо	1975	120 ± 10	$1,10 \pm 0,12$

Таблица 3: Результаты измерений и вычислений

Теперь, зная масштабы по осям, можно определить значения коэрцитивной силы H_c и индукции насыщения B_s . Результаты заносим в таблицу 4.

Материал	$H_c, \text{ А/м}$	$\sigma_{H_c}, \text{ А/м}$	$B_s, \text{ Тл}$	$\sigma_{B_s}, \text{ Тл}$
Феррит	14,4	0,8	0,143	0,005
Пермаллой	31,0	0,9	1,45	0,07
Крем. железо	69,5	1,3	1,43	0,05

Таблица 4: Результаты вычислений

Также в следующую таблицу 5 занесём табличные данные для значений коэрцитивной силы H_c и индукции насыщения B_s .

Материал	$H_c, \text{ А/м}$	$B_s, \text{ Тл}$
Феррит	20	0,27
Пермаллой	11–40	1,50–1,52
Крем. железо	80	2,0

Таблица 5: 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.4,5,6).

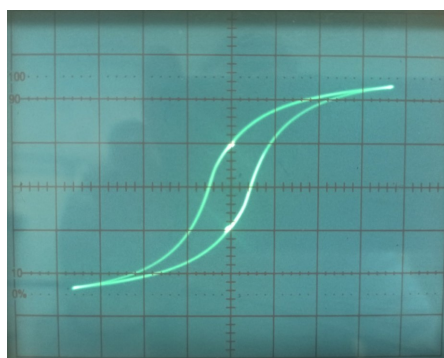


Рис. 4: Предельная петля гистерезиса феррита

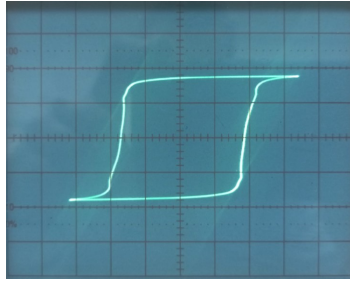


Рис. 5: Предельная петля гистерезиса пермаллоя

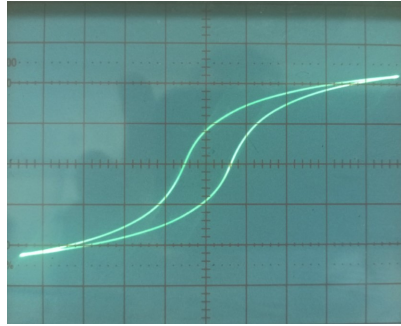


Рис. 6: Предельная петля гистерезиса для кремнистого железа

4.2 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 $k_x = 0,097$ В/дел.

Аналогичные действия проводим при $K_x = 0,02$ В/дел. Получаем $k_x = 0,019$ В/дел.

Так как $k_x \approx K_x$, ЭО откалиброван по оси Х 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 $k_y = 0,048$ В/дел.

Те же действия повторяем при $K_y = 0,02$ В/дел. Получаем $k_y = 0,017$ В/дел.

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

4.3 Проверка применимости теоретических выкладок

Проверим применимость формулы (4). 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 $U_{вх} = (0,20 \pm 0,02)$ В. Не меняя тока, подключим Y-вход ЭО к выходу ячейки и аналогичным образом определим $U_{вых} = (0,16 \pm 0,02)$ В. Рассчитаем $\tau = \frac{U_{вх}}{\omega U_{вых}} = (0,39 \pm 0,09)$ с, где $\omega = 2\pi\nu$. По определению $\tau_{RC} = R_{и}C_{и} = 0,4$ с. Так как $\tau \approx \tau_{RC}$, то условия применимости нашей теории выполнены.

4.4 Измерение начальной кривой намагничивания

Проведем измерение начальной кривой намагничивания. Для этого плавно уменьшая амплитуду тока намагничивания до нуля, фиксируем по экрану осциллографа положения крайних точек наблюдаемых петель. Эти вершины лежат на начальной кривой намагничивания. С помощью полученных таким образом графиков оценим максимальные значения дифференциальной магнитной проницаемости и сравним с табличными значениями:

Материал	$\mu_{dif}, \cdot 10^3$	$\sigma_{\mu_{dif}}, \cdot 10^3$	Табличное, $\cdot 10^3$
Феррит	9,0	0,5	10
Пермаллой	42	4	3,5-100
Крем. железо	8,8	0,8	7-40

Таблица 6: Значения дифференциальной магнитной проницаемости

5 Вывод

В данной работе изучались петли гистерезиса ферромагнетиков с помощью электродного осциллографа. По полученным данным рассчитывались коэрцитивная сила, индукция насыщения и дифференциальная магнитная проницаемость, совпавшие с табличными значениями в пределах погрешности и с учетом недостаточной информации о точном составе исследуемых сплавов металлов.