

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа физики и исследований им. Ландау

# Отчёт о выполнении лабораторной работы №3.4.5

Петля Гистерезиса (динамический метод)

Автор:  
Сенокосов Арсений Олегович  
Б02-012

Долгопрудный  
10 декабря 2021 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  $\mu$ , 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.

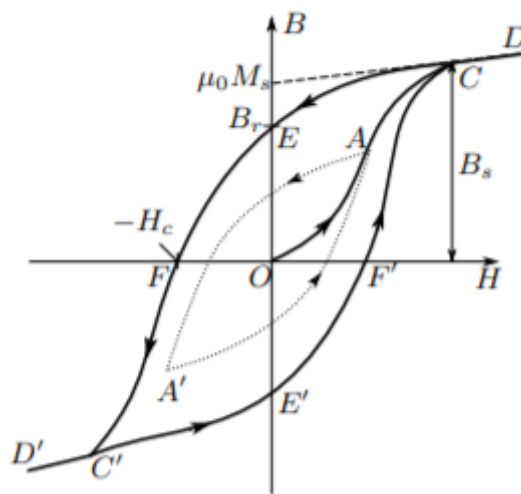


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

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  $\Phi$  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

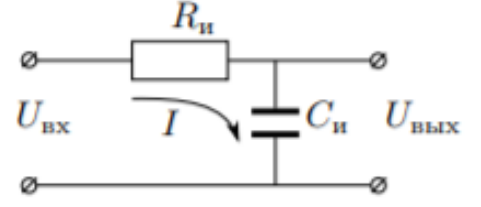


Рис. 2: Интегрирующая ячейка

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

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  $\omega_0$ . 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  $\omega_0$  — 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.

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 Х 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  $N_{\text{и}}$  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

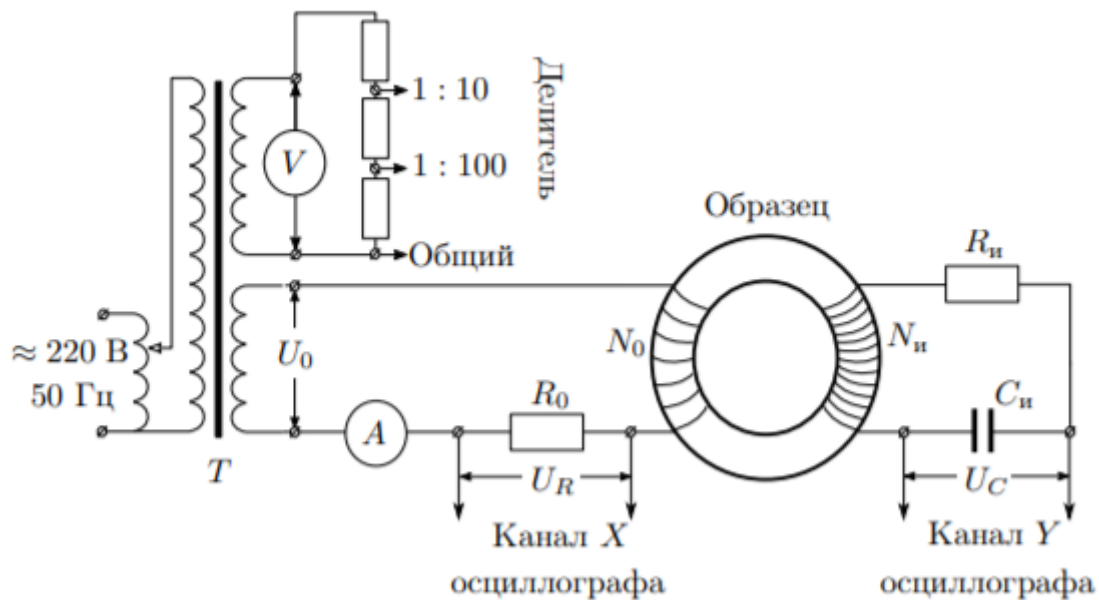


Рис. 3: Схема установки для исследования намагничивания образцов

$B$  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 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	$N_0$	$N_n$	$S^2$ , см <sup>2</sup>	$2\pi R$ , 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 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  $H = IN_0/(2\pi R)$ ,  $I = K_x/R_0$ ;  $B = R_n C_n U_{\text{вых}}/(S N_n)$ , 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	$I_{эфф}$ , мА	$H$ , А·м <sup>-1</sup> / дел	$B$ , Тл/дел
Феррит	215	14,5	0,07
Пермаллой	165	13,7	0,88
Крем. железо	238	103,3	0,40

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	$\sigma_{H_c}$ , А/м	$B_s$ , Тл	$\sigma_{B_s}$ , 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

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.

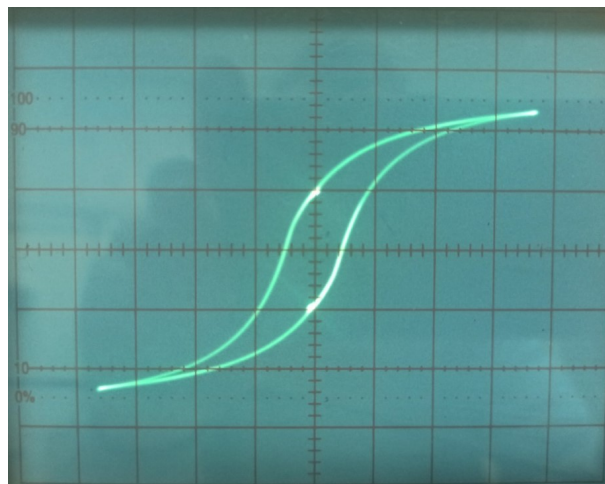


Рис. 4: Предельная петля гистерезиса феррита

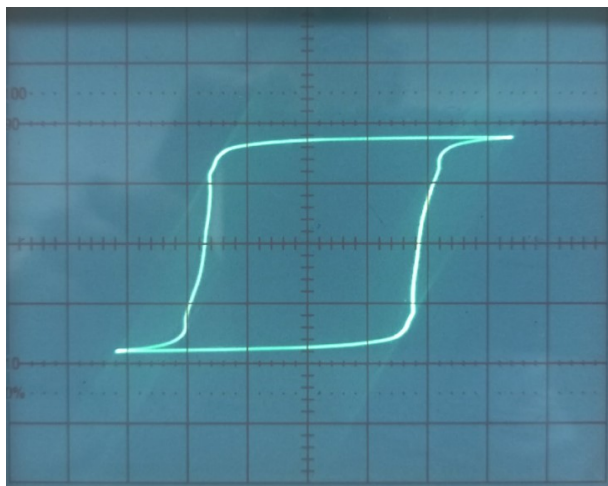


Рис. 5: Предельная петля гистерезиса пермаллоя

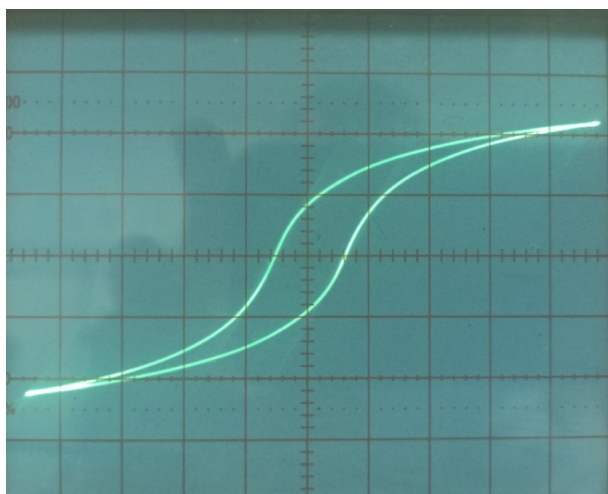


Рис. 6: Предельная петля гистерезиса для кремнистого железа

## 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  $m_x = 0,097$  В/дел.

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

Так как  $m_x \approx K_x$ , 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  $m_y = 0,048$  В/дел.

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

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

## 4.3 Проверка применимости теоретических выкладок

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

#### 4.4 Обсуждение результатов и 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.