

Московский физико-технический университет  
Факультет радиотехники и кибернетики

Лабораторная работа № 3.4.5

Общая физика: электричество и магнетизм

# **Петля гистерезиса (динамический метод)**

Работу выполнил:

**Милославов Глеб, группа Б01-103**

г. Долгопрудный  
2022 год

**Цель работы:** изучение петель гистерезиса ферромагнитных материалов с помощью осциллографа.

**Оборудование:** автотрансформатор, понижающий трансформатор, амперметр и вольтметр (мультиметры), резистор, делитель напряжения, интегрирующая цепочка, электронный осциллограф, тороидальные образцы с двумя обмотками..

## 1 Теоретическое введение

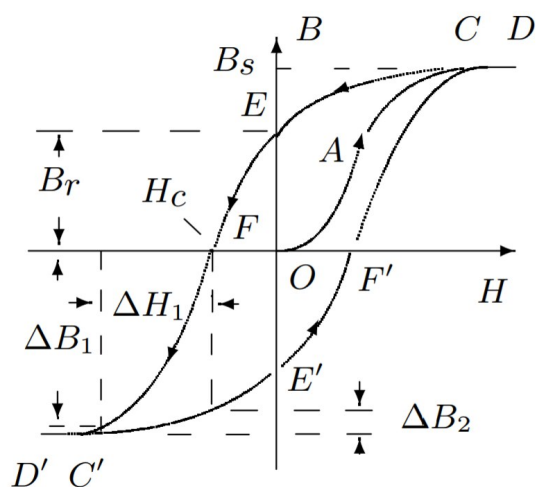


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

Магнитная индукция  $\vec{B}$  и напряженность магнитного поля  $\vec{H}$  в ферромагнитном материале неоднозначно связаны между собой: индукция зависит не только от напряженности, но и от предыстории образца. Связь между индукцией и напряженностью поля типичного ферромагнетика иллюстрирует рис. 1. Если к размагниченному образцу начинают прикладывать магнитное поле, то его намагничивание следует кривой  $OACD$ , выходящей из

начала координат. Эту кривую называют *основной кривой намагничивания*.

Индукция  $\vec{B}$  в образце состоит из индукции, связанной с намагничивающим полем  $\vec{B}$ , и индукции, создаваемой самим намагниченным образцом. В системе СИ эта связь имеет вид

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}),$$

где  $\vec{M}$  - *намагниченность* - магнитный момент единичного объема образца, а  $\mu_0$  - магнитная постоянная.

Намагнитим образец до насыщения - до точки D. Соответствующее значение индукции  $B_s$  называют индукцией насыщения. При уменьшении поля  $H$  до нуля зависимость  $B(H)$  имеет вид кривой  $DCE$ , и при нулевом поле индукция имеет конечное ненулевое значение. Это остаточная индукция  $B_r$ . Чтобы размагнитить образец, то есть перевести его в состояние F, необходимо приложить "обратное" магнитное поле  $H_c$ , которое называют коэрцитивной силой.

Замкнутая кривая  $DEFD'E'F'D$ , возникающая при циклическом перемагничивании образца, намагниченного до насыщения, называется *предельной петлей гистерезиса*.

## 1.1 Измерение магнитной индукции в образцах.

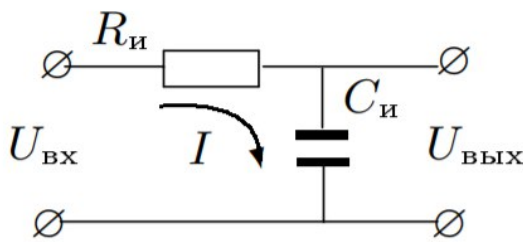
Магнитную индукцию удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при изменении магнитного потока  $\Phi$  в катушке, намотанной на образец:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Тогда отсюда и из формулы  $\Phi = BSN_{\text{и}}$  получаем:

$$|B| = \frac{1}{SN_{\text{и}}} \int \mathcal{E} dt.$$

Для интегрирования сигнала применяют интегрирующие схемы (рис. 2).



Если выходной сигнал намного меньше входного ( $U_{\text{вых}} \ll U_{\text{вх}}$ ), ток в цепи пропорционален входному напряжению:  $I \simeq \frac{U_{\text{вх}}}{R}$ , а напряжение на емкости

Рис. 2: Интегрирующая RC-цепь

$$U_{\text{вых}} \simeq \frac{1}{RC} \int U_{\text{вх}} dt.$$

Этот вывод тем ближе к истине, чем больше постоянная  $\tau = RC$  превосходит характерное время процесса (например, его период). Для синусоидальных напряжений

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

где  $\Omega$  - частота сигнала.

В итоге, обозначив параметры интегрирующей цепи через  $R_{\text{и}}$  и  $C_{\text{и}}$ , получаем

$$|B| = \frac{1}{SN_{\text{и}}} \int U_{\text{вх}} dt = \frac{R_{\text{и}}C_{\text{и}}}{SN_{\text{и}}} U_{\text{вых}}.$$

## 2 Экспериментальная установка.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 3.

Действующее значение переменного тока в обмотке N0 измеряется амперметром А (мультиметром GDM). Последовательно с амперметром включено сопротивление  $R_0$ , напряжение с которого подается на вход X электронного осциллографа (ЭО). Это напряжение пропорционально току в обмотке  $N_0$ , а следовательно и напряженности H магнитного поля в образце.

Для измерения магнитной индукции B с измерительной обмотки  $N_{\text{и}}$  на вход интегрирующей RC -цепочки подается напряжение  $U_{\text{и}}$  ( $U_{\text{BX}}$ ), пропорциональное

производной  $\dot{B}$ , а с выхода снимается напряжение  $U_C(U_{\text{ВЫХ}})$ , пропорциональное величине  $B$ , и подается 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  $Y$  ЭО. Для этого, во-первых, надо узнать, каким напряжениям (или токам) соответствуют амплитуды сигналов, видимых на экране, и во-вторых, каким значениям  $B$  и  $H$  соответствуют эти напряжения (или токи).

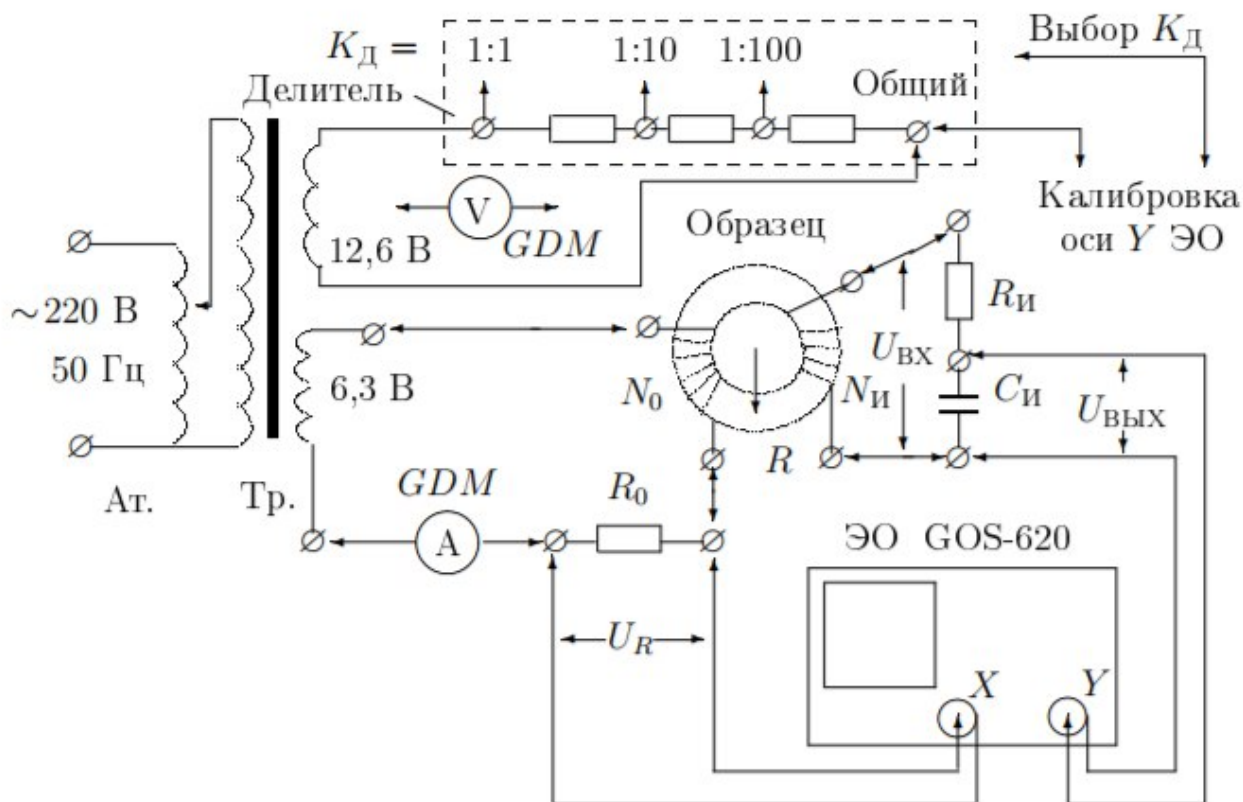


Рис. 3: Схема установки для исследования намагничивания образцов

Кривая, возникающая на экране, воспроизводит петлю гистерезиса. По формулам

$$H = \frac{IN_0}{2\pi R} ; \quad B = \frac{R_{\text{и}} C_{\text{и}} U_{\text{ВЫХ}}}{S N_{\text{и}}}$$

где  $I = K_X/R_0$ ,  $U_{\text{ВЫХ}} = K_Y$ , а  $K_X, K_Y$  – чувствительность усилителя ЭФ соответствующих шкал, полученные по результатам калибровки ЭО:

$$K_x = 2\sqrt{2}R_0 I_{\text{эф}}/2x ; \quad K_y = 2\sqrt{2}U_{\text{эф}}/2y$$

## 3 Ход работы

### 3.1 Параметры установки и образцов

1. Параметры установки:  $R_{\text{и}} = 20 \text{ кОм}$ ,  $C_{\text{и}} = 20 \text{ мкФ}$ ,  $R_0 = 0.3 \text{ Ом}$
2. Погрешности измерений:  $\sigma_V = 0.005 \cdot V + 15 \text{ единиц младшего разряда}$   
 $\sigma_{\text{ЭО}} = 0.1 \text{ дел}$ ;  $\sigma_I = 0.005 \cdot I + 15 \text{ единиц младшего разряда}$
3. Параметры образцов:

	Феррит 1000нм	Пермаллой	Кремнистое железо
$N_0$	40	40	40
$N_{\text{и}}$	400	200	400
$S, \text{ см}^2$	3.0	3.8	1.2
$2\pi R, \text{ см}$	25	24	10

### 3.2 Кремнистое железо

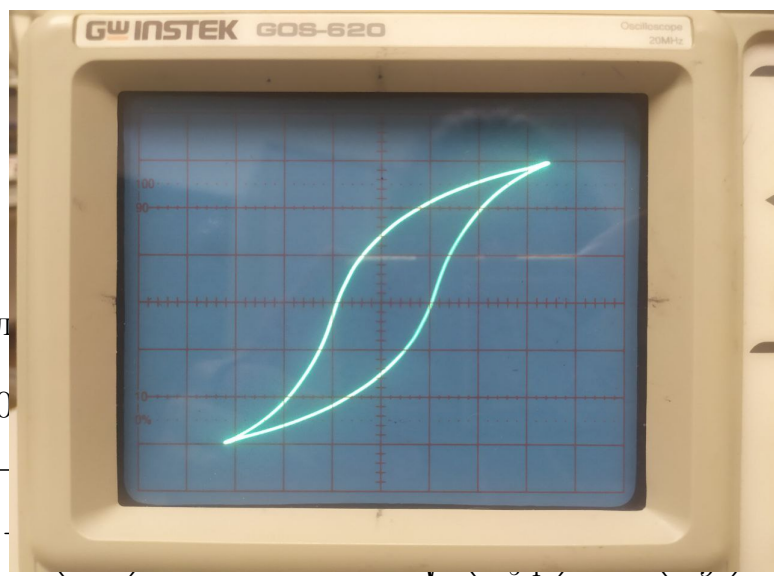
Занесём данные прямых измерений для кремнистого железа:

- $2X_s = 7,1 \text{ дел}$
- $2Y_s = 6,2 \text{ дел}$
- $2X_c = 1,0 \text{ дел}$
- $2Y_r = 3,0 \text{ дел}$
- $I_{\text{эф}} = 0,310 \text{ А}$
- $U_{\text{эф}} = 0,0564 \text{ В}$
- $2x = 9,0 \text{ дел}$
- $2y = 3,4 \text{ дел}$

Рассчитаем  $K_x$  и  $K_y$  и абсол

$$K_x = 0,029 \pm 0,00$$

$$\sigma_{K_x} = K_x \sqrt{\left(\frac{\sigma_{I_{\text{эф}}}}{I_{\text{эф}}}\right)^2}$$



По полученным коэффициентам рассчитаем  $H$  и  $B$ :

$$H = 38,9 \pm 2,3 \text{ А/м} \quad ; \quad B = 0,39 \pm 0,02 \text{ Тл}$$

А также коэрцитивное поле  $H_c$  и остаточную намагниченность  $B_r$ :

$$H_c = 19,5 \pm 1,2 \text{ А/м} \quad ; \quad B_r = 0,59 \pm 0,03 \text{ Тл}$$

Оценим  $\mu_{\text{нач}}$  и  $\mu_{\text{max}}$  по начальным кривым намагничивания:

$$\mu_{\text{нач}} \approx 900 \quad ; \quad \mu_{\text{max}} \approx 2800$$

### 3.3 Пермаллой

Занесём данные прямых измерений для пермаллоя:

- $2X_s = 6,9$  дел
- $2Y_s = 6,3$  дел
- $2X_c = 5,3$  дел
- $2Y_r = 5,6$  дел
- $I_{\text{эф}} = 0,143 \text{ А}$
- $U_{\text{эф}} = 0,0800 \text{ В}$
- $2x = 3,2$  дел
- $2y = 4,8$  дел

Рассчитаем  $K_x$  и  $K_y$ :

$$K_x = 0,038 \pm 0,00$$

По полученным коэффициентам

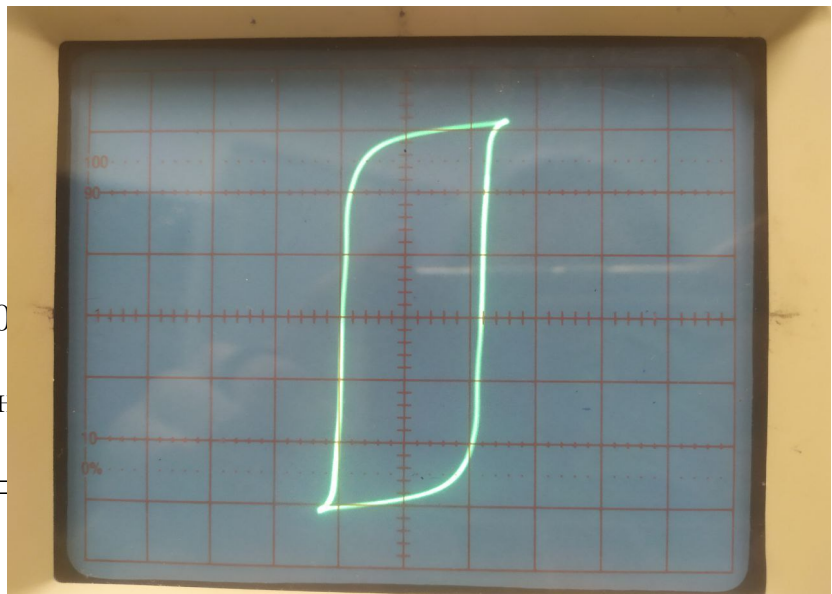
$$H = 55,9 \pm$$

А также коэрцитивное поле

$$H_c = 6,1 \pm 1,2 \text{ А/м} \quad ; \quad B_r = 0,70 \pm 0,03 \text{ Тл}$$

Оценим  $\mu_{\text{нач}}$  и  $\mu_{\text{max}}$  по начальным кривым намагничивания:

$$\mu_{\text{нач}} \approx 600 \quad ; \quad \mu_{\text{max}} \approx 17 \cdot 10^3$$



### 3.4 Феррит

Занесём данные прямых измерений для феррита:

- $2X_s = 3,6$  дел
- $2Y_s = 5,6$  дел
- $2X_c = 2,5$  дел
- $2Y_r = 2,3$  дел
- $I_{эф} = 0,078$  А
- $U_{эф} = 0,0098$  В
- $2x = 8,8$  дел
- $2y = 5,0$  дел

Рассчитаем  $K_x$  и  $K_y$ :

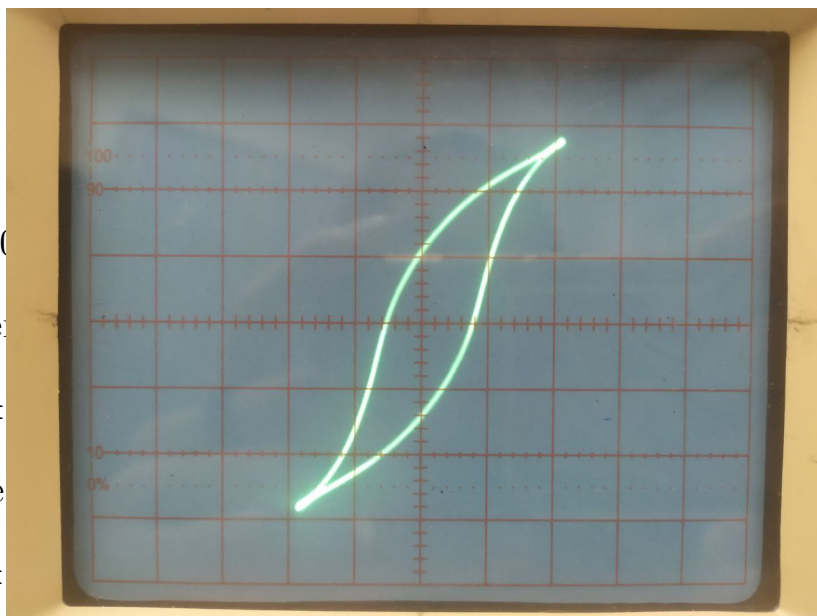
$$K_x = 0,008 \pm 0,00$$

По полученным коэффициентам:

$$H = 4,3 \pm$$

А также коэрцитивное поле

$$H_c = 5,4 \pm$$



Оценим  $\mu_{нач}$  и  $\mu_{max}$  по начальным кривым намагничивания:

$$\mu_{нач} \approx 2300 \quad ; \quad \mu_{max} \approx 8 \cdot 10^3$$

### 3.5 Вывод

Подведём итоги в таблице ниже:

	Кремнистое железо		Пермаллой		Феррит 1000нм	
	Значение	$\sigma$	Значение	$\sigma$	Значение	$\sigma$
$H_c$ , А/м	19,5	1,2	6,1	1,2	5,4	0,7
Табличное	12-40		4-5,6		4-1600	
$B_r$ , Тл	0,59	0,03	0,7	0,03	0,021	0,003
Табличное	1,95-2,01		1,05-1,6		0,1-0,4	