

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

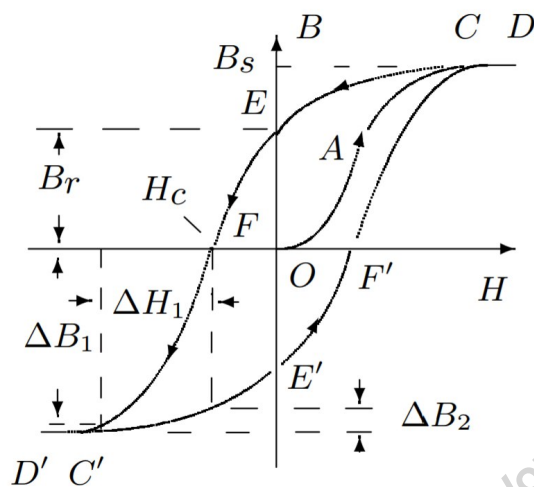


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

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

Индукция \vec{B} в образце состоит из индукции, связанной с намагничивающим полем \vec{H} , 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 μ_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*.

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

1.1 Измерение магнитной индукции в образцах.

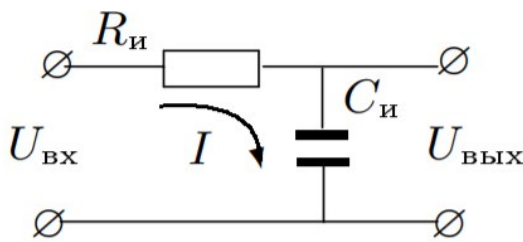
Магнитную индукцию удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при изменении магнитного потока Φ в катушке, намотанной на образец:

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

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

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

Рис. 2: Интегрирующая RC-цепь

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 Ω - 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 $U_{\text{и}}$ ($U_{\text{вх}}$), 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).

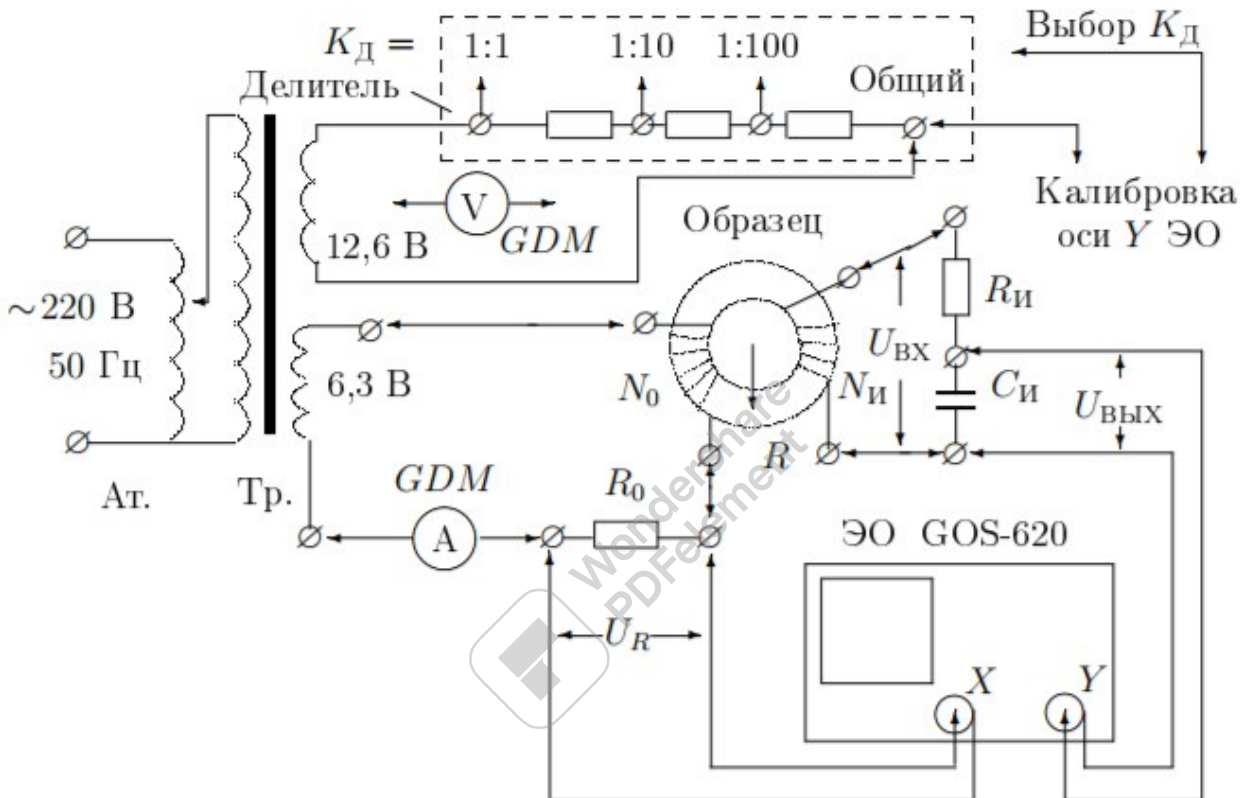


Рис. 3: Схема установки для исследования намагничивания образцов

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

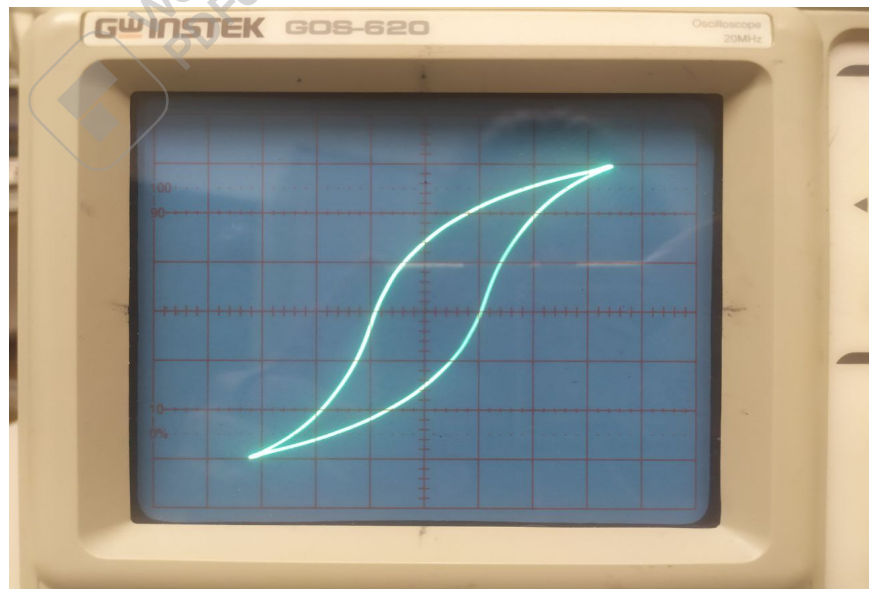
1. Параметры установки: $R_{\text{и}} = 20 \text{ кОм}$, $C_{\text{и}} = 20 \text{ мкФ}$, $R_0 = 0.3 \text{ Ом}$
2. Погрешности измерений: $\sigma_V = 0.005 \cdot V + 15$ единиц младшего разряда
 $\sigma_{\text{ЭО}} = 0.1 \text{ дел}$; $\sigma_I = 0.005 \cdot I + 15$ единиц младшего разряда
3. Параметры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

$$K_x = 0,029 \pm 0,002 \text{ Ом/дел} ; K_y = 0,047 \pm 0,003 \text{ Ом/дел}$$

$$\sigma_{K_x} = K_x \sqrt{\left(\frac{\sigma_{I_{\text{ЭФ}}}}{I_{\text{ЭФ}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{2x}}{2x}\right)^2} ; \sigma_{K_y} = K_y \sqrt{\left(\frac{\sigma_{U_{\text{ЭФ}}}}{U_{\text{ЭФ}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{2y}}{2y}\right)^2}$$

По полученным коэффициентам рассчитаем H и B :

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

А также коэрцитивное поле H_c и остаточную намагниченность B_r :

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

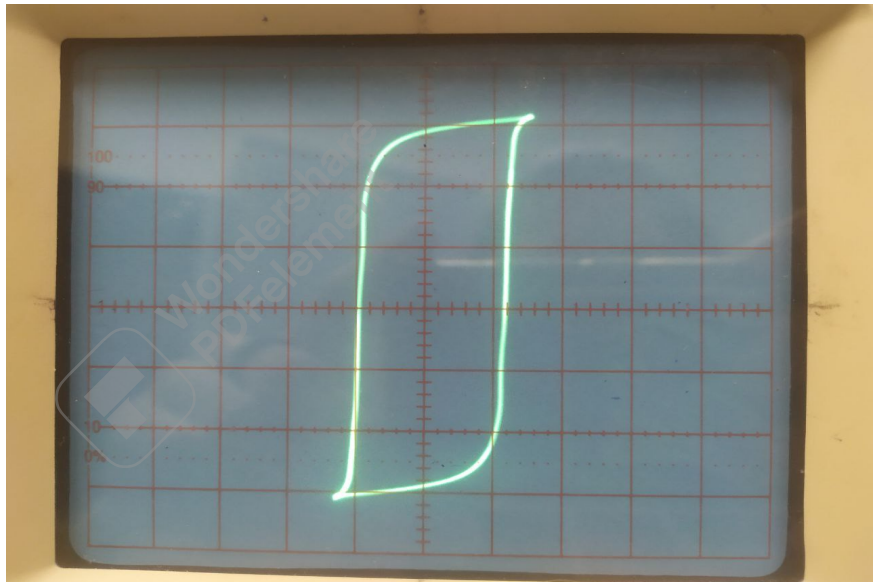
Оценим $\mu_{\text{нач}}$ и μ_{max} по начальным кривым намагничивания:

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

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 :

$$K_x = 0,038 \pm 0,005 \text{ Ом/дел} ; \quad K_y = 0,047 \pm 0,002 \text{ Ом/дел}$$

По полученным коэффициентам рассчитаем цену деления H и B :

$$H = 55,9 \pm 2,7 \text{ А/м} ; \quad B = 0,25 \pm 0,01 \text{ Тл}$$

А также коэрцитивное поле H_c и остаточную намагниченность B_r :

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

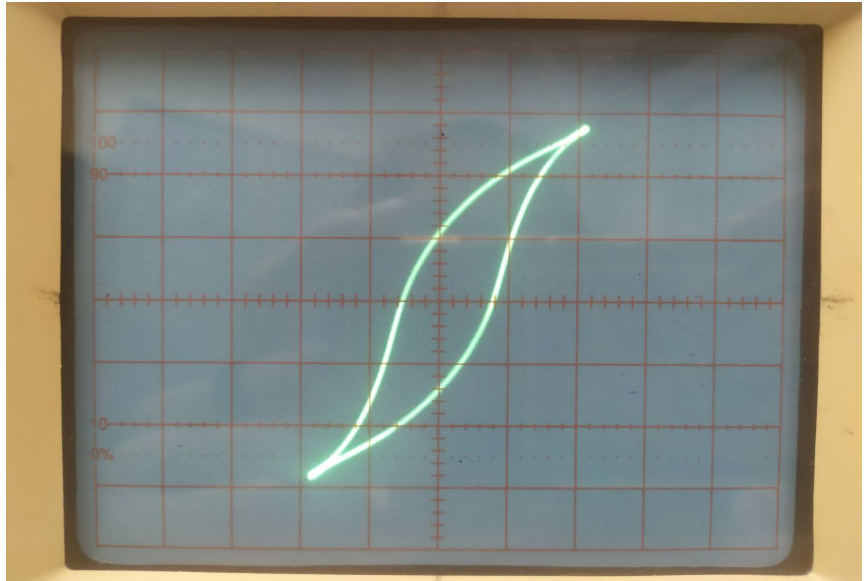
Оценим $\mu_{\text{нач}}$ и μ_{max} по начальным кривым намагничивания:

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

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 :

$$K_x = 0,008 \pm 0,001 \text{ Ом/дел} ; K_y = 0,006 \pm 0,001 \text{ Ом/дел}$$

По полученным коэффициентам рассчитаем цену деления H и B :

$$H = 4,3 \pm 0,5 \text{ А/м} ; B = 0,018 \pm 0,003 \text{ Тл}$$

А также коэрцитивное поле H_c и остаточную намагниченность B_r :

$$H_c = 5,4 \pm 0,7 \text{ А/м} ; B_r = 0,021 \pm 0,003 \text{ Тл}$$

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

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

3.5 Вывод

Подведём итоги в таблице ниже:

	Кремнистое железо		Пермаллой		Феррит 1000нм	
	Значение	σ	Значение	σ	Значение	σ
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	