
**Московский Физико-Технический Институт
(государственный университет)**

**Отчёт о выполнении лабораторной
работы №3.4.5**
**Петля гистерезиса (динамический
метод)**

Баранников Андрей Б01-001

ФРКТ
Долгопрудный, 2021

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, торoidalные образцы с двумя обмотками..

1 Теоретическое введение

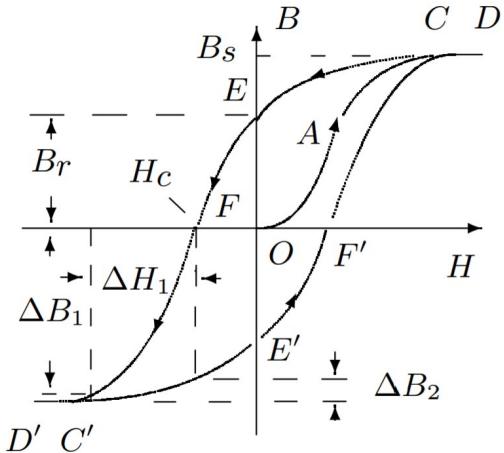


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

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 намагничающим 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} - *намагченность* - 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 $DEF'D'E'F'D$, возникающая при циклическом перемагничивании образца, намагниченного до насыщения, называется *пределной петлей гистерезиса*.

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 $\Phi = BSN_i$ получаем:

$$|B| = \frac{1}{SN_i} \int \mathcal{E} dt.$$

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

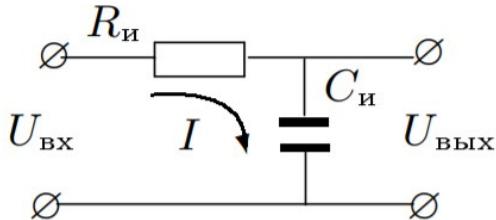


Рис. 2: Интегрирующая RC-цепь

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

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

Этот вывод тем ближе к истине, чем больше постоянная $\tau = RC$

превосходит характерное время процесса (например, его период). Для синусоидальных напряжений

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

где Ω - частота сигнала.

В итоге, обозначив параметры интегрирующей цепи через R_i и C_i , получаем

$$|B| = \frac{1}{SN_i} \int U_{\text{bx}} dt = \frac{R_i C_i}{SN_i} U_{\text{вых}}.$$

2 Экспериментальная установка.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 3.

Действующее значение переменного тока в обмотке N_0 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_i на вход интегрирующей RC-цепочки подается напряжение U_i (UBX), пропорциональное производной 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).

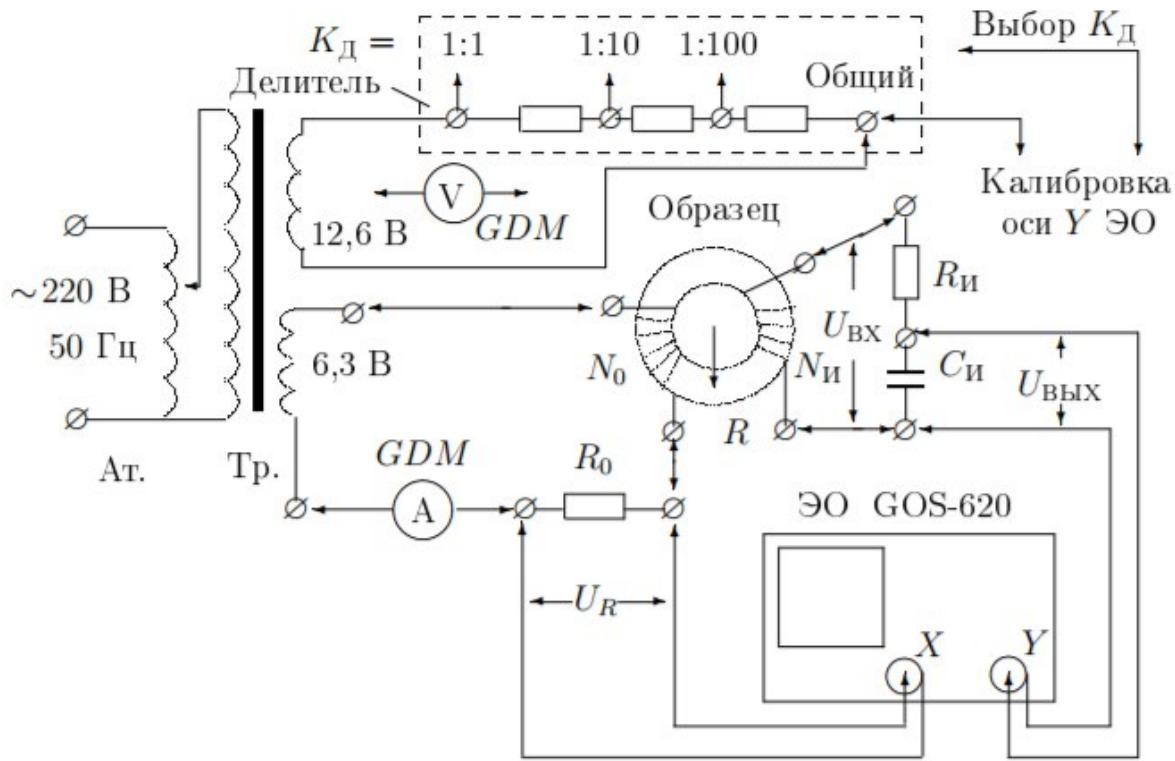


Рис. 3: Схема установки для исследования намагничивания образцов

3 Ход работы

1. Запишем данные установки:

$$R_0 = 0,2 \Omega \quad R_i = 20 \text{ к} \Omega \quad C_i = 20 \text{ мкФ}$$

Параметры тороидальных образцов:

- **Пермаллой (Fe – Ni НП50):** $N_0 = 15$ витков; $N_i = 300$ витков; $S = 0,66 \text{ см}^2$; $2\pi R = 14,1 \text{ см}$.
- **Феррит 1000нн:** $N_0 = 45$ витков; $N_i = 400$ витков; $S = 3,0 \text{ см}^2$; $2\pi R = 25 \text{ см}$.

2. Соберем схему (рис. 3) и настроим оборудование.

3. Для каждого образца сфотографируем предельную петлю. Запишем значения коэффициентов усиления K_x и K_y , ток I_{ϕ} . Измерим двойные амплитуды для коэрцитивной силы $2x(c)$ и индукции насыщения $2y(s)$. Результаты таковы:

- **Пермаллой:**

$$K_x = 10 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}, \quad K_y = 10 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}, \quad I_{\phi} = 226 \text{ мА}. \quad \text{При этом } 2x = 7 \text{ дел}, \quad 2y = 3,5 \text{ дел.}$$

- **Феррит:**

$$K_x = 20 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}, \quad K_y = 20 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}, \quad I_{\phi} = 92,6 \text{ мА}. \quad \text{При этом } 2x = 2,1 \text{ дел}, \quad 2y = 8 \text{ дел.}$$

4. Снимем для каждого образца начальную кривую намагничивания (табл. 1-3), плавно уменьшая ток до нуля и отмечая вершины частных петель. По этим данным построим эти кривые (рис. 4-6).

Таблица 1: Начальная кривая намагничивания для феррита

№	1	2	3	4	5	6
x , дел	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	0.95
y , дел	8	7	6	5	3.6	2

Таблица 2: Начальная кривая намагничивания для пермаллоя

№	1	2	3	4	5	6
x , дел	3.6	3.2	2.8	2.4	2.2	1.8
y , дел	6	6	4.2	2.2	1	0.2

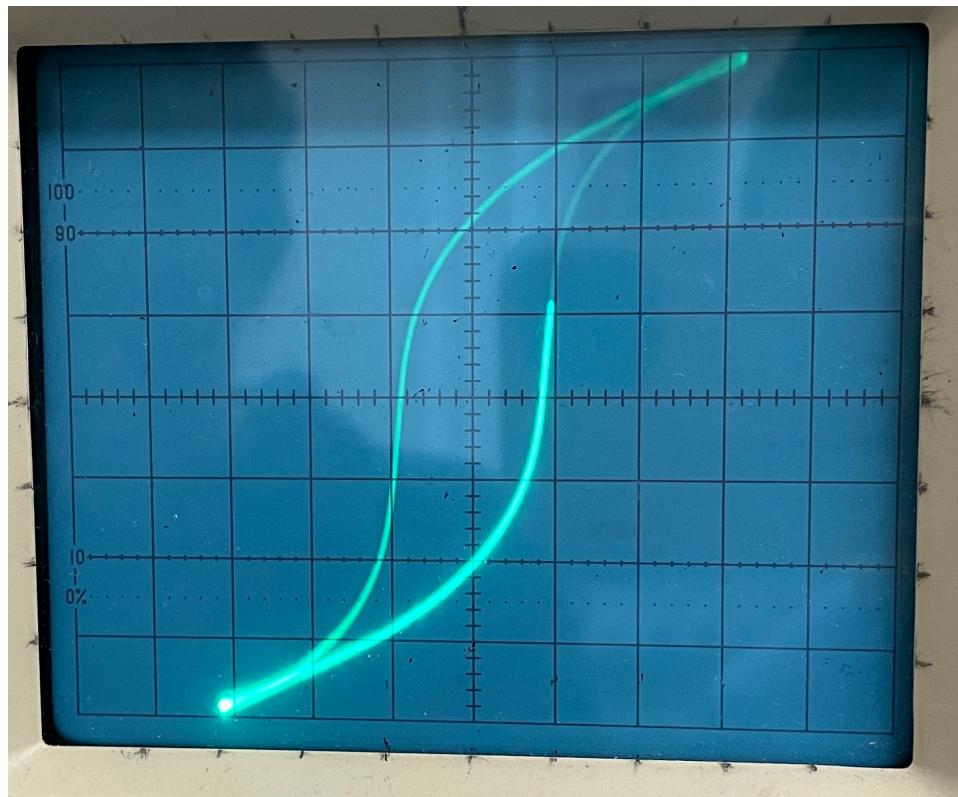


Рис. 4: Петля гистерезиса для феррита

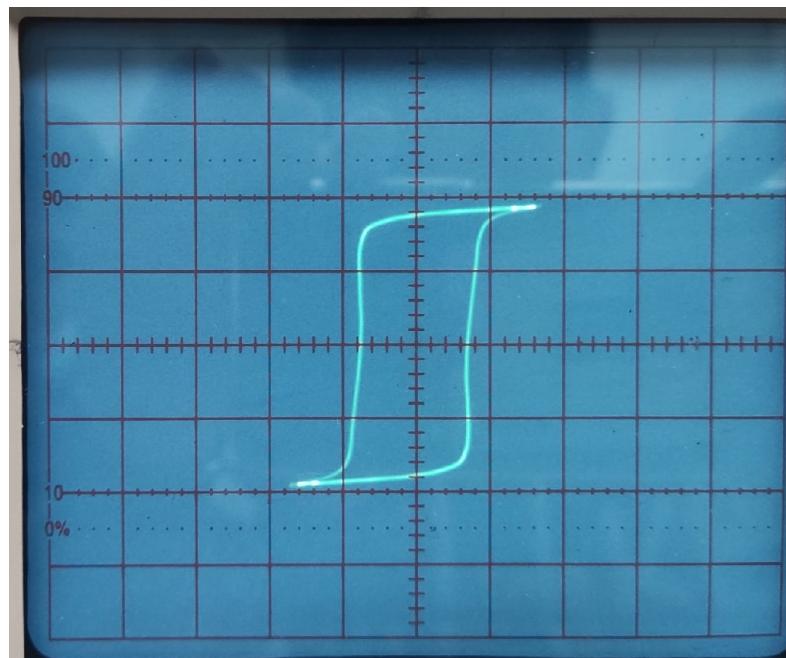


Рис. 5: Петля гистерезиса для пермаллоя

5. Рассчитаем цену деления ЭО для петли для оси X (в $\frac{А}{М}$) по формуле:

$$H = \frac{IN_0}{2\pi R},$$

где $I = \frac{K_x}{R_0}$, и в Теслах на деление для оси Y по формуле

$$B = \frac{R_u C_u U_{\text{вых}}}{SN_u},$$

где $U_{\text{вых}} = K_y$.

- **Пермаллой:**

$$H = 10,64 \frac{А}{М}. B = 0,4 \frac{Т}{дел}.$$

- **Феррит:**

$$H = 9,0 \frac{А}{М}. B = 3,33 \cdot 10^{-2} \frac{Т}{дел}.$$

4 Обработка результатов

6. Рассчитаем значения m_x и m_y и сравним с величинами K_x и K_y , использованными при калибровке:

$$m_x = \frac{2R_0\sqrt{2}I_{\mathcal{E}\Phi}}{2x} \frac{В}{дел}$$

$$m_y = \frac{2\sqrt{2}U_{\mathcal{E}\Phi}}{2y} \frac{В}{дел}$$

$$I_{\Theta\Phi} = 0,4 \text{ A}; 2x = 8,4 \text{ дел} \Rightarrow m_x = 0,027 \frac{\text{В}}{\text{дел}}, K_x = 20 \text{ мВ}$$

$$U_{\Theta\Phi} = 0,111 \text{ В}; 2y = 13 \text{ дел} \Rightarrow m_y = 0,024 \frac{\text{В}}{\text{дел}}, K_y = 20 \text{ мВ}$$

Значения m_x и m_y совпадают с величинами K_x и K_y в пределах погрешности.

7. Сравним постоянную времени $\tau = RC$, с расчётом через параметры R_i и C_i :

$$\tau = RC = U_{\text{ВХ}} / (\Omega U_{\text{вых}})$$

$$U_{\text{ВХ}} = 5,2 \text{ В}; U_{\text{вых}} = 0,287 \text{ В}; \tau \approx 0,36; R_i C_i = 0,4$$

Значения τ и $R_i C_i$ совпадают в пределах погрешности.

$$R = 20 \cdot 10^3 \text{ Ом} \gg \frac{1}{\Omega C} = 159 \text{ с}$$

С достаточной точностью выполняется условие $R \gg 1/(\Omega C)$

8. Рассчитаем коэрцитивную силу H_c и индукцию насыщения B_s для каждого образца:

- **Пермаллой:**

$$H_c = 19,2 \pm 0,5 \frac{\text{А}}{\text{М}}$$

$$B_s = 1,20 \pm 0,06 \text{ Тл}$$

- **Феррит:**

$$H_c = 9,0 \pm 0,2 \frac{\text{А}}{\text{М}}$$

$$B_s = (13,30 \pm 0,02) \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$$

9. Оценим максимальные значения дифференциальной магнитной проницаемости μ_{max} по начальным кривым намагничивания:

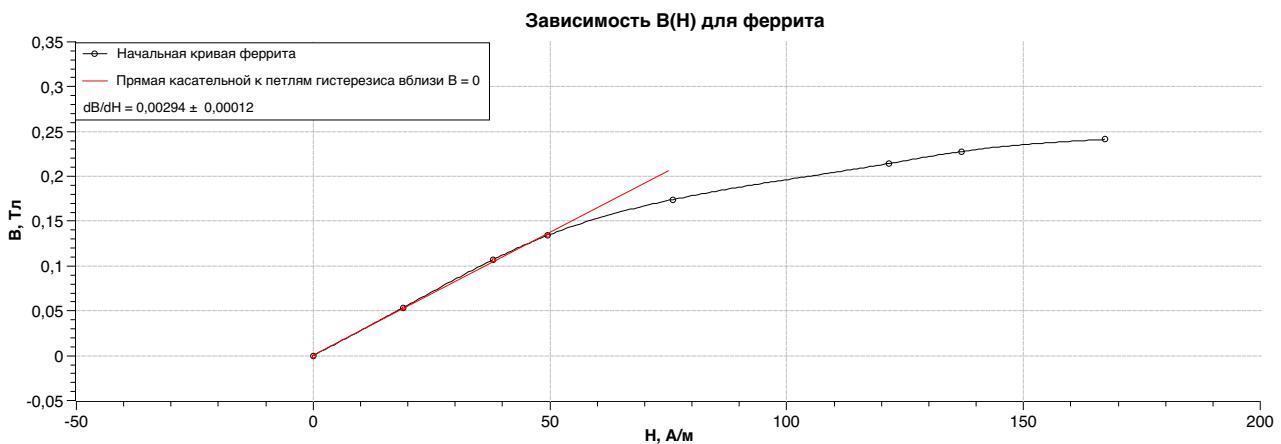


Рис. 6: Начальная кривая феррита

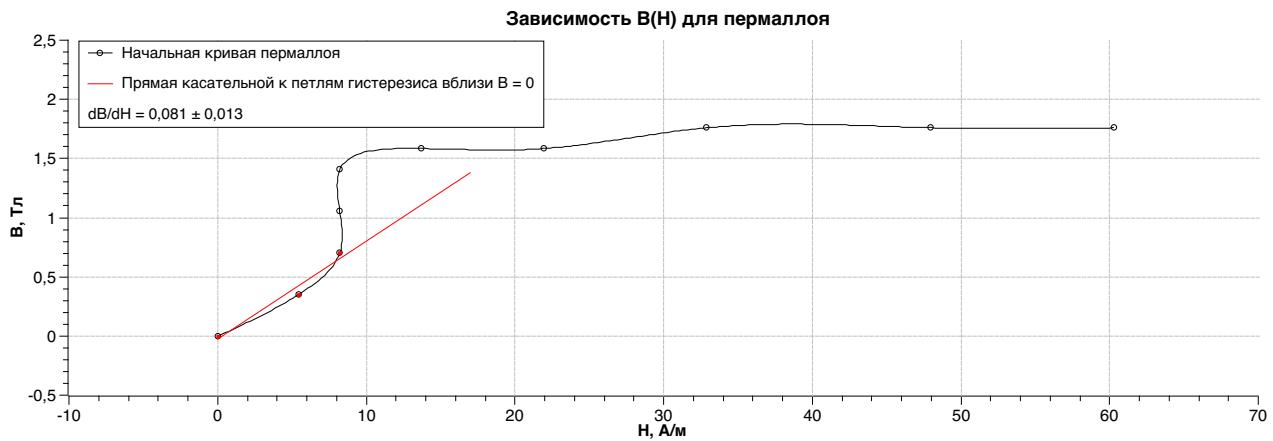


Рис. 7: Начальная кривая пермаллоя

$$\mu_{max} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}$$

- **Пермаллой:**

$$\mu_{max} \simeq (64,46 \pm 8,30) \times 10^3$$

- **Феррит:**

$$\mu_{max} \simeq (2,339 \pm 0,095) \times 10^3$$

10. Сравнение с табличными значениями:

	Ампл.	Пермаллой	Феррит
эксп	H_c , А/м	$19,2 \pm 0,5$	$9,0 \pm 0,2$
табл		5,6	4 - 100
эксп	B_s , Тл	$1,2 \pm 0,06$	$0,1330 \pm 0,0002$
табл		1,08	0,1-0,4
эксп	$\mu_{max} \times 10^3$	$64,46 \pm 8,30$	$6,0 \pm 0,2$
табл		10	0,5 - 20

Таблица 6. Сверка с табличными значениями.