

# Лабораторная работа 3.4.5

Сидорчук Максим, Б01-304

23 ноября 2024 г.

**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

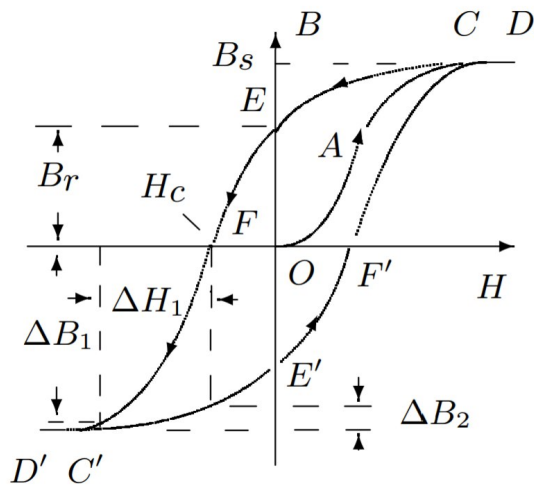


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

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 намагнитченным 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).

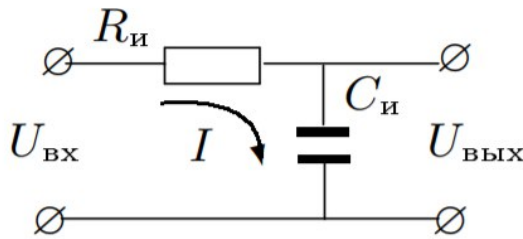


Рис. 2: Интегрирующая RC-цепь

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

$$U_{\text{out}} \simeq \frac{1}{RC} \int U_{\text{in}} dt.$$

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

$$U_{\text{out}} = \frac{U_{\text{in}}}{RC\Omega},$$

где  $\Omega$  - частота сигнала.

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

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



$$R_0 = 1\text{Ом} \quad R_{\text{и}} = 20\text{кОм} \quad C_{\text{и}} = 20\text{мкФ}$$

Параметры тороидальных образцов:

- **Кремниевое железо**  $Fe - Si$ :  $N_0 = 75$  витков;  $N_{\text{и}} = 400$  витков;  $S = 2.85\text{см}^2$ ;  $2\pi R = 11\text{см}$ .
- **Пермаллой**  $Fe - Ni$ :  $N_0 = 40$  витков;  $N_{\text{и}} = 200$  витков;  $S = 4.5\text{см}^2$ ;  $2\pi R = 14.1\text{см}$ .
- **Феррит**:  $N_0 = 85$  витков;  $N_{\text{и}} = 300$  витков;  $S = 3.0\text{см}^2$ ;  $2\pi R = 24\text{см}$ .

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  $I_{\text{эф}}$ . Измерим двойные амплитуды для коэрцитивной силы  $2x(c)$  и индукции насыщения  $2y(s)$ . Результаты таковы:

- **Кремниевое железо:**

$$K_x = 200 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}, \quad K_y = 100 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}, \quad I_{\text{эф}} = 1.03\text{А}. \quad \text{При этом } 2x = 10.0\text{дел}, \quad 2y = 6.3\text{дел}.$$

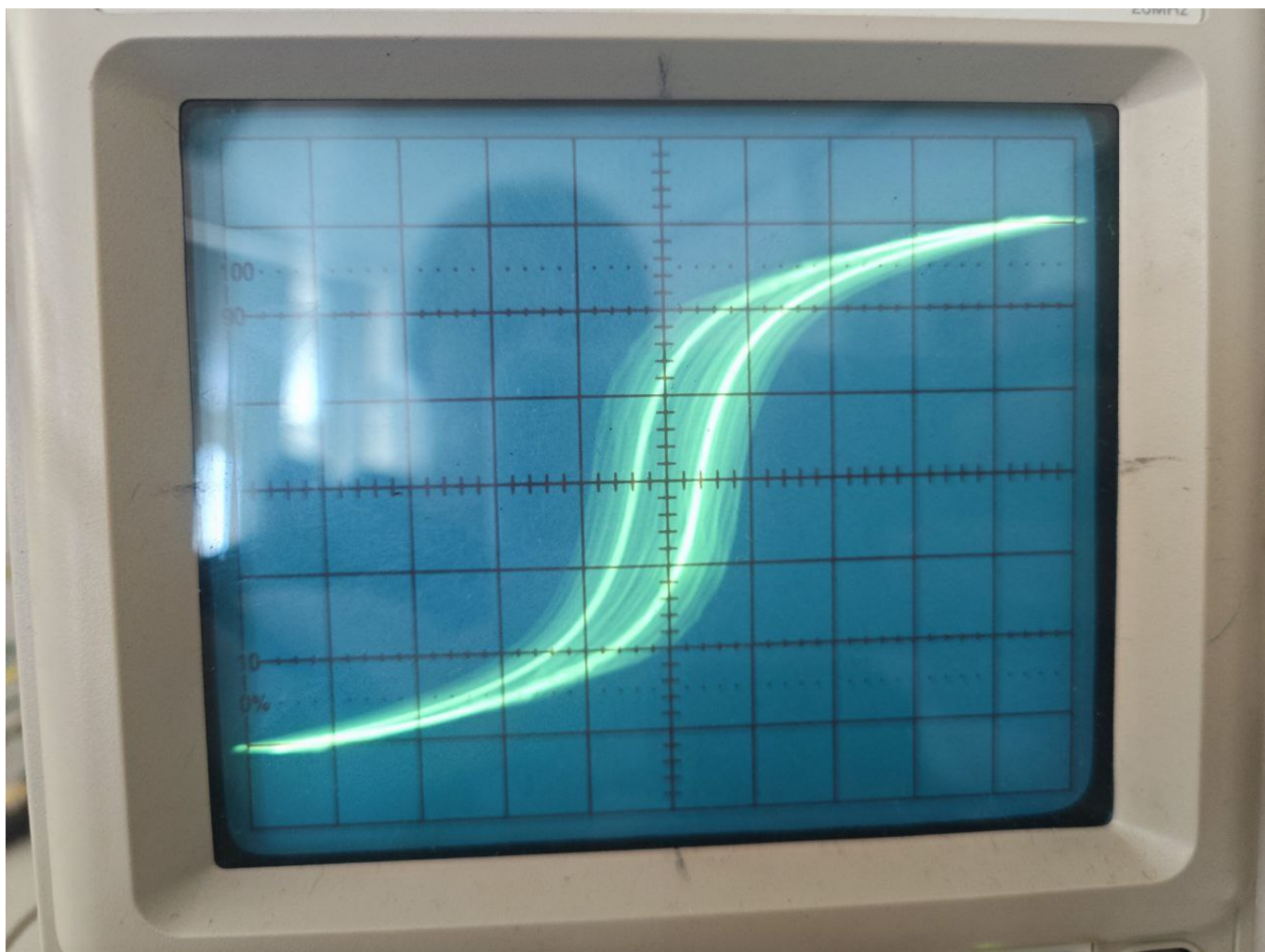


Рис. 4: Петля гистерезиса для кремниевого железа

- **Пермаллой:**

$$K_x = 100 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}, \quad K_y = 100 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}, \quad I_{\text{эф}} = 218\text{мА}. \quad \text{При этом } 2x = 7.6\text{дел}, \quad 2y = 4.0\text{дел}.$$

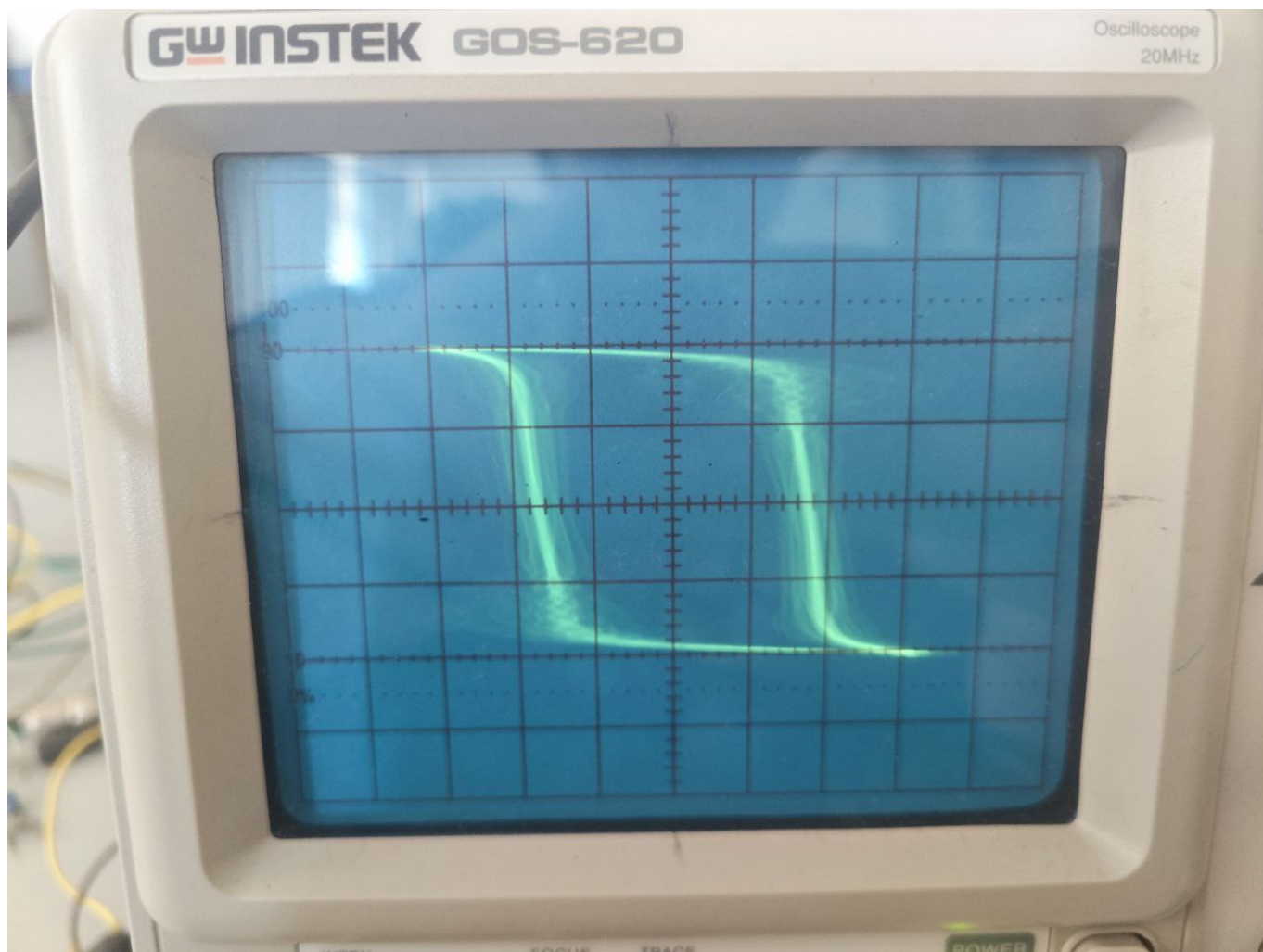


Рис. 5: Петля гистерезиса для пермаллоя

- Феррит:

$K_x = 500 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$ ,  $K_y = 50 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$ ,  $I_{\text{эф}} = 92.6 \text{ мА}$ . При этом  $2x = 7.4 \text{ дел}$ ,  $2y = 4.0 \text{ дел}$ .



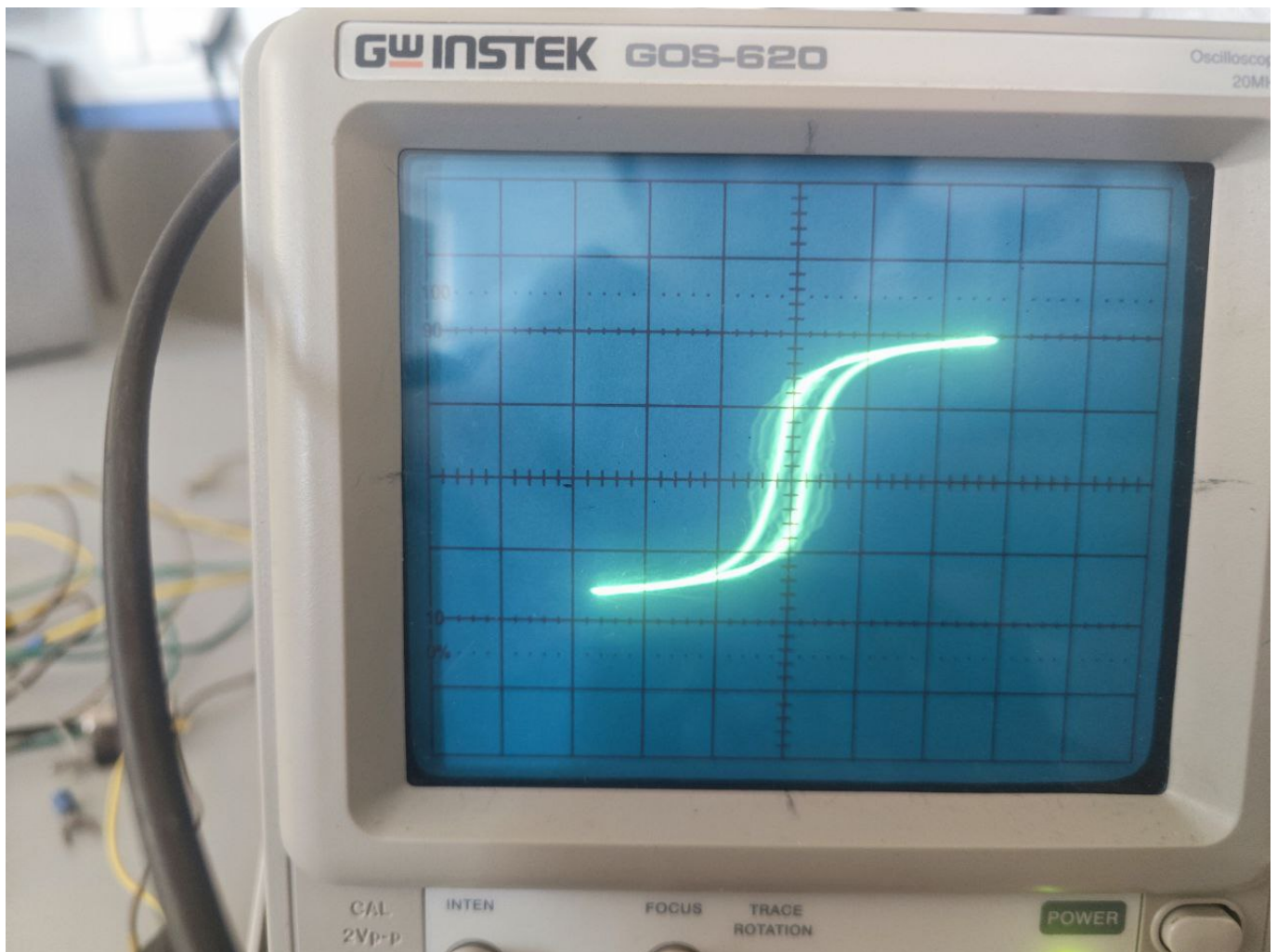


Рис. 6: Петля гистерезиса для феррита

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 кремнистого железа

$x$	5	4.4	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0
$y$	3	2.9	2.8	2.7	2.6	2.5	2.4	2	1.6	1.4	1.2	0.8	0.2	0

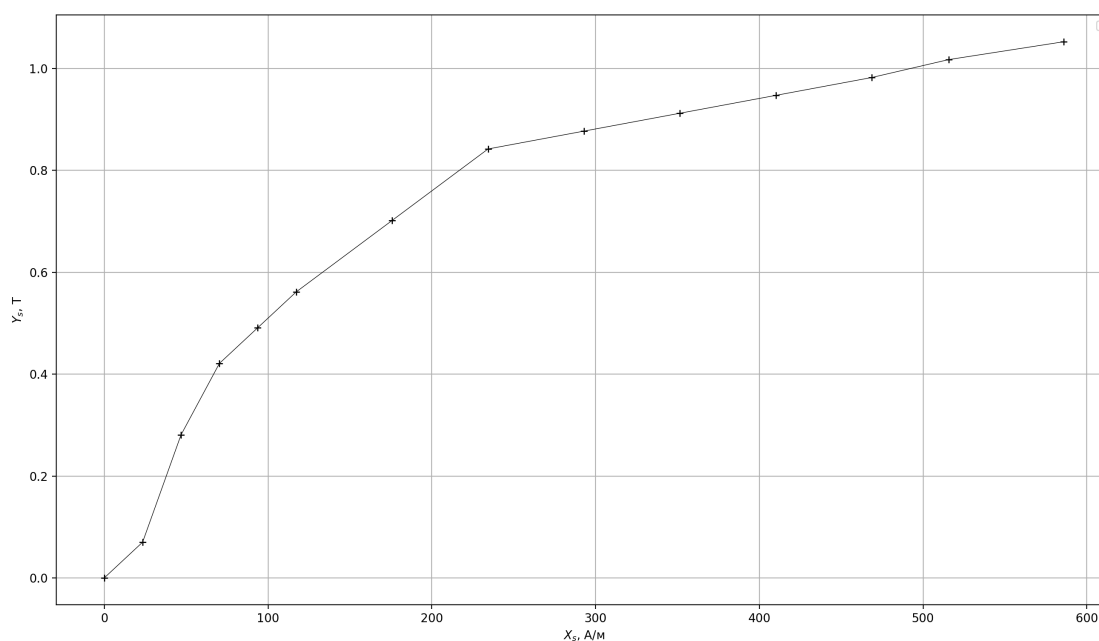


Рис. 7: Начальная кривая намагничивания кремнистого железа - график

Таблица 2: Начальная кривая намагничивания пермаллоя

$x$	3	2.6	2	2	2	2	1.8	1.6	1.4	1.2	1
$y$	2	1.9	1.8	1.4	1.2	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0

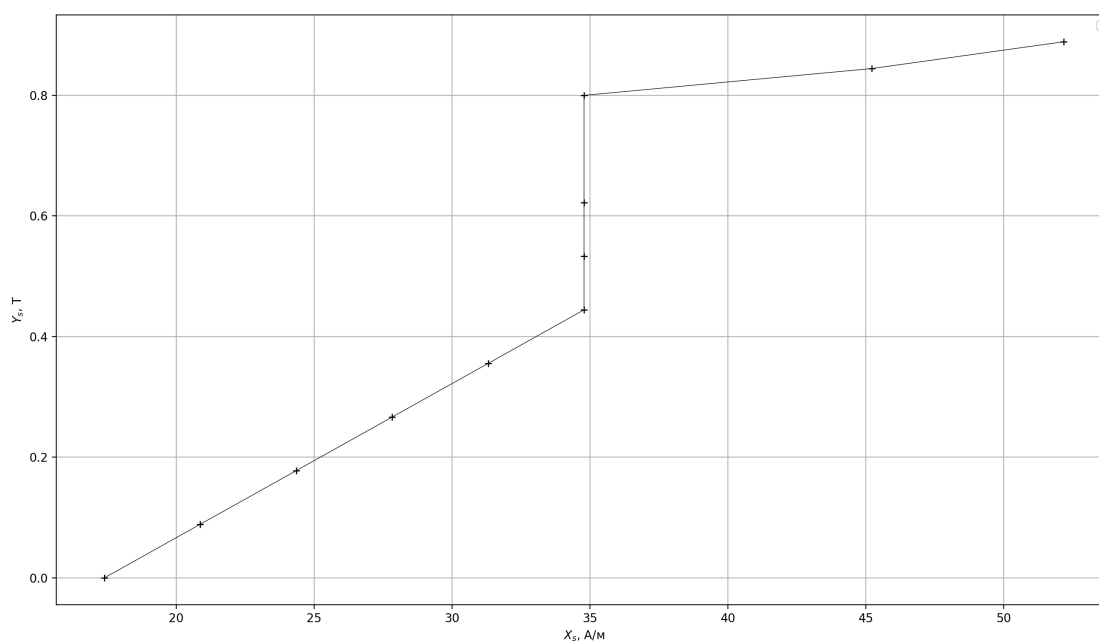


Рис. 8: Начальная кривая намагничивания пермаллоя - график

Таблица 3: Начальная кривая намагничивания феррита

$x$	3.6	3	2.4	2	1.6	1.4	1	0.8	0.4	0.2
$y$	4	3.8	3.6	3.3	3	2.8	2	1.6	0.8	0.4



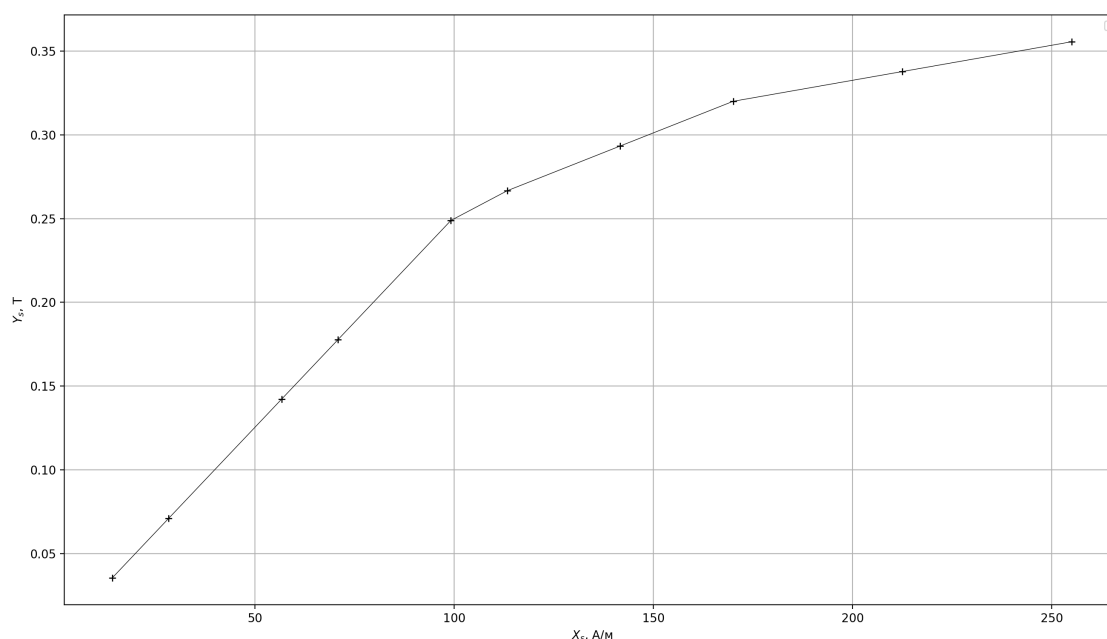


Рис. 9: Начальная кривая намагничивания феррита - график

5. Восстановим предельные петли для образцов. Рассчитаем цену деления ЭО для петли для оси X (в  $\frac{A}{м}$ ) 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

$$B = \frac{R_n C_n U_{out}}{S N_n}$$

где  $U_{out} = K_y$ .

- Кремниевое железо:

$$H = 1.17 \frac{A}{м \cdot дел}. B = 0.35 \frac{T}{дел}.$$

- Пермаллой:

$$H = 0.03 \frac{A}{м \cdot дел}. B = 0.44 \frac{T}{дел}.$$

- Феррит:

$$H = 1.77 \frac{A}{м \cdot дел}. B = 0.22 \frac{T}{дел}.$$

6. Соединим вход ячейки с обмоткой «6.3 В» трансформатора.

Определим входное напряжение на RC-цепочке:  $U_{in} = 2y \cdot K_y = 2 \cdot 8.0 = 16.0$  В.

Не меняя тока, переключим Y-вход ЭО к выходу ячейки и аналогичным образом определим  $U_{out} = 0.02 \cdot 6.3 = 0.13$  В.

Определим  $\tau = RC$  по формуле

$$\tau = \frac{U_{\text{in}}}{\omega U_{\text{out}}} = 0.404 \text{ Ом} \cdot \Phi$$

Найдем  $\tau_{th}$  - теоретическое значение постоянной времени из параметров RC - цепочки указанных на установке:

$$\tau_{th} = R \cdot C = 0.400 \text{ Ом} \cdot \Phi$$

Полученные значения достаточно близки чтобы считать их примерно равными (разница в 1%)

7. Рассчитаем коэрцитивную силу  $H_c$  и индукцию насыщения  $B_s$  для каждого образца.

- **Кремниевое железо:**

$$H_c = 9.4 \pm 0.07 \frac{\text{А}}{\text{м}} \quad B_s = 0.84 \pm 0.07 \text{ Тл}$$

- **Пермаллой:**

$$H_c = 6.3 \pm 0.07 \frac{\text{А}}{\text{м}} \quad B_s = 1.69 \pm 0.07 \text{ Тл}$$

- **Феррит:**

$$H_c = 7.1 \pm 0.07 \frac{\text{А}}{\text{м}} \quad B_s = 0.44 \pm 0.07 \text{ Тл}$$

8. Из графиков (4-6) оценим максимальные и минимальные относительные значения дифференциальной магнитной проницаемости.

- **Кремнистое железо:**

$$\mu_{\min} \simeq 397.11, \mu_{\max} \simeq 7148.01$$

- **Пермаллой:**

$$\mu_{\min} \simeq 3389.41, \mu_{\max} \simeq 20336.46$$

- **Феррит:**

$$\mu_{\min} \simeq 332.87, \mu_{\max} \simeq 1997.24$$