

Лабораторная работа 3.4.5

Сидорчук Максим, Б01-304

16 октября 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

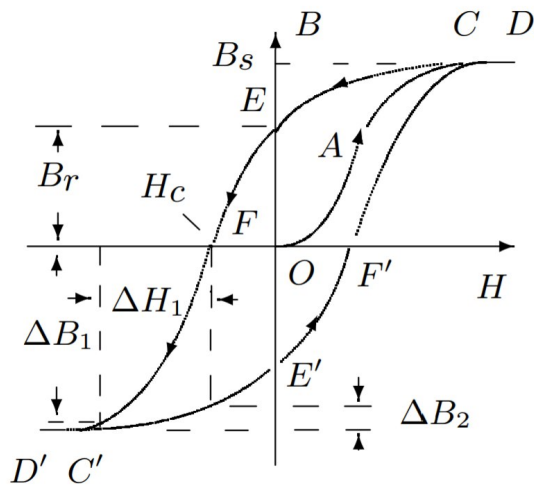


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

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 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*.

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).

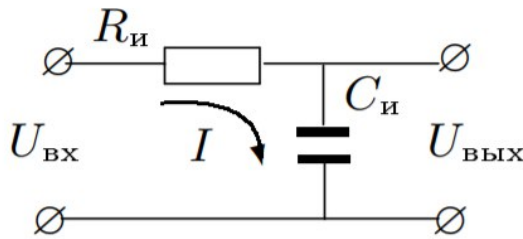


Рис. 2: Интегрирующая RC-цепь

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 Ω - частота сигнала.

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

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

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_{II} на вход интегрирующей RC -цепочки подается напряжение U_{II} (U_{BX}), пропорциональное производной \dot{B} , а с выхода снимается напряжение U_C (U_{out}), 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).

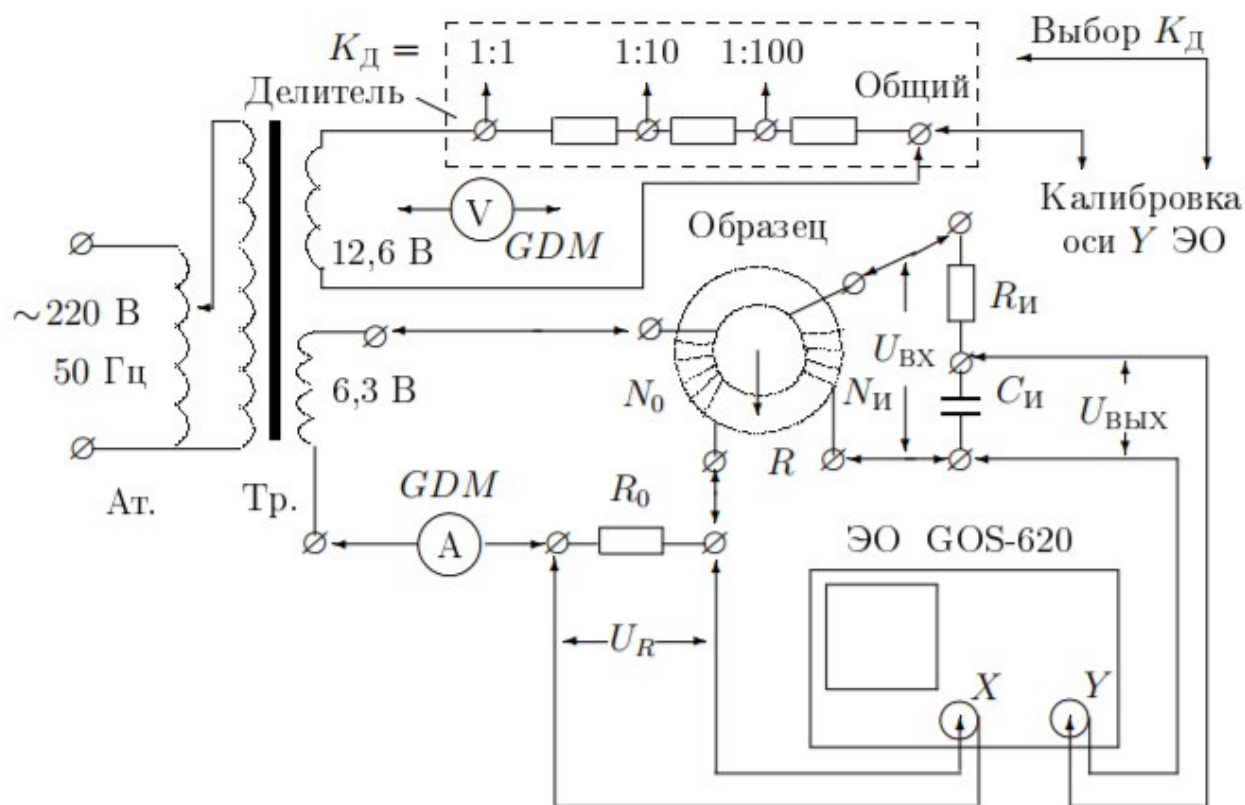


Рис. 3: Схема установки для исследования намагничивания образцов

3. Ход работы

1. Запишем данные установки:

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

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:**

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

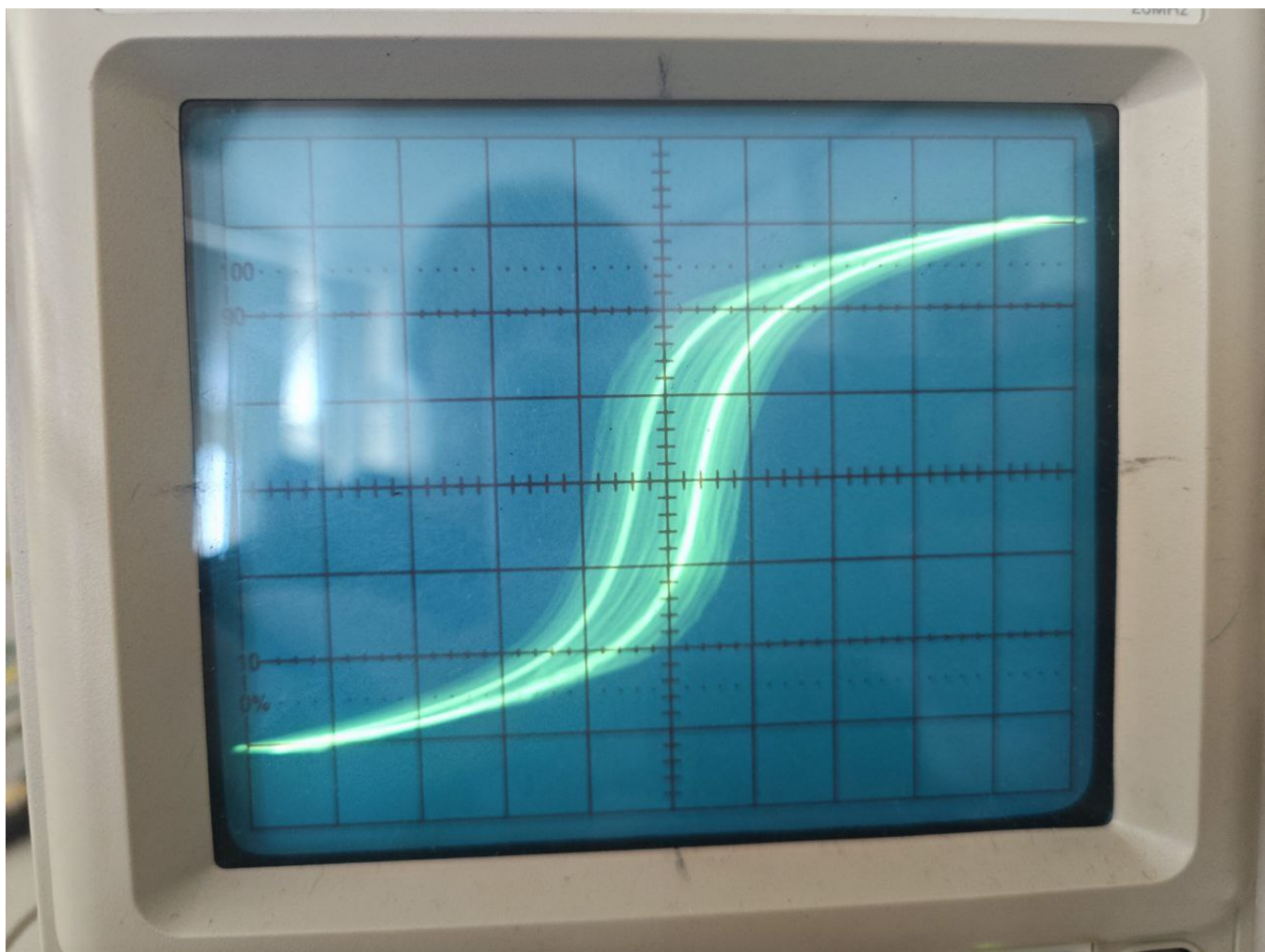


Рис. 4: Петля гистерезиса для кремниевого железа

- **Пермаллой:**

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

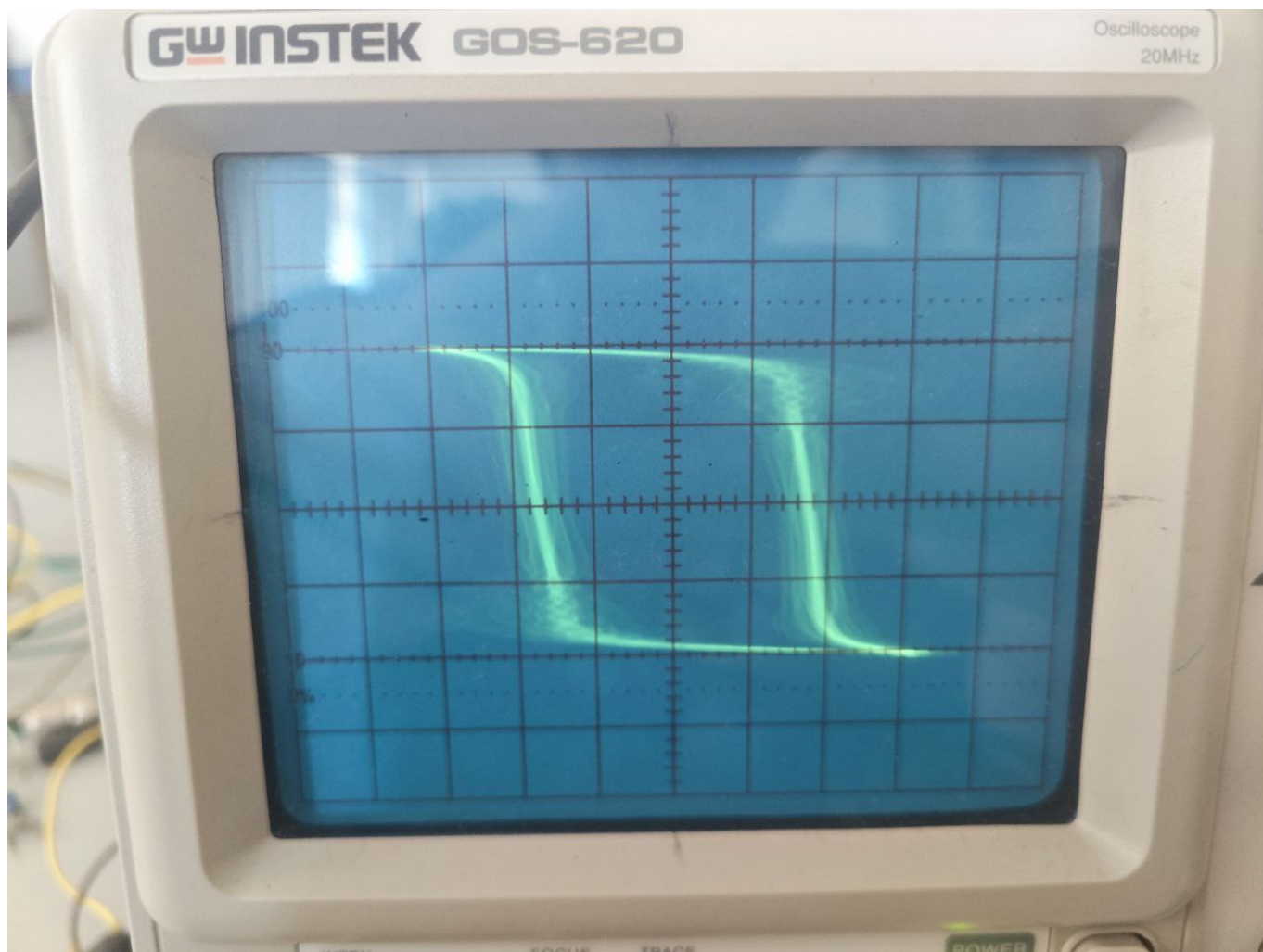


Рис. 5: Петля гистерезиса для пермаллоя

- 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 $2x = 7.4 \text{ дел}$, $2y = 4.0 \text{ дел}$.

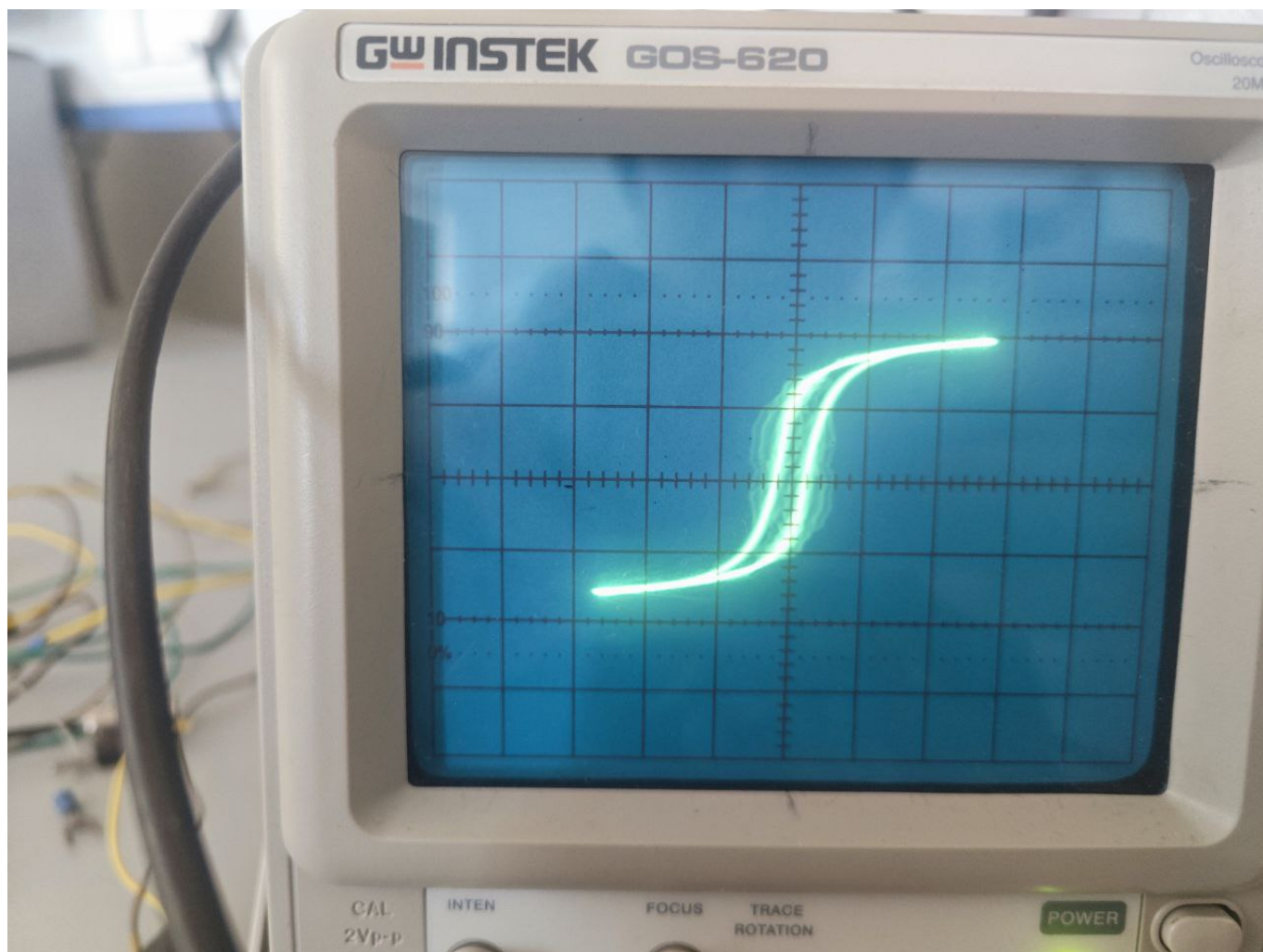


Рис. 6: Петля гистерезиса для феррита

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

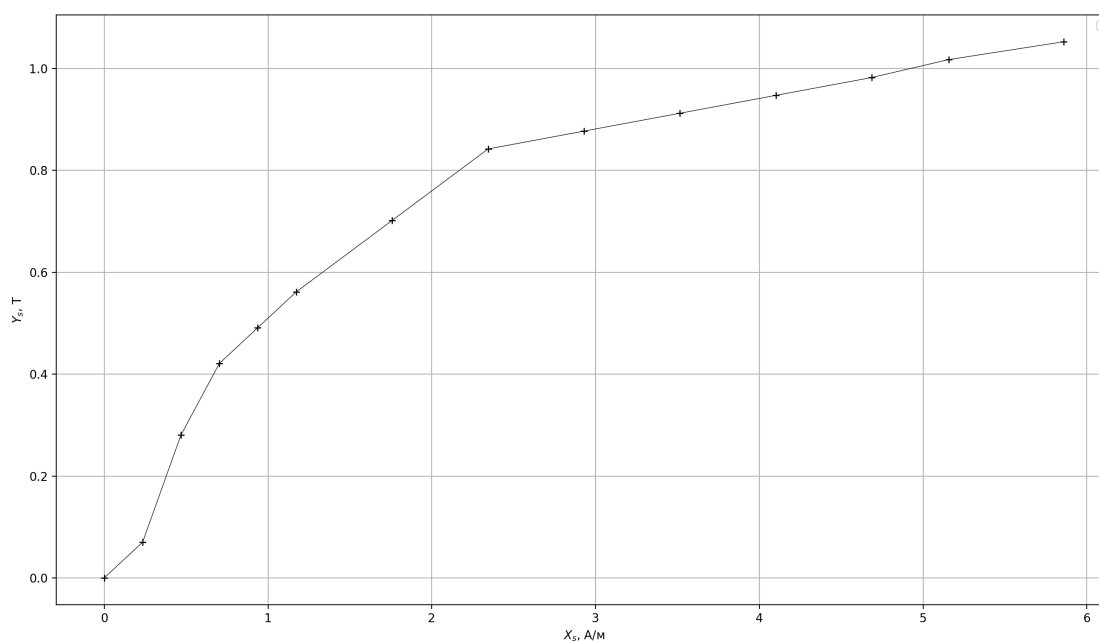


Рис. 7: Начальная кривая намагничивания кремнистого железа - график

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

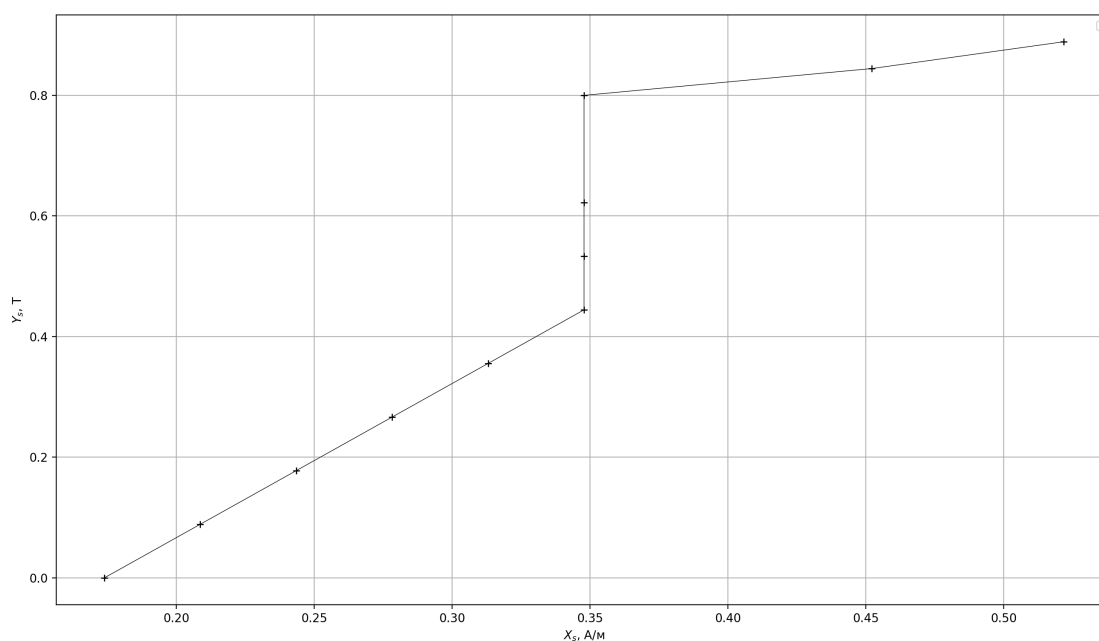


Рис. 8: Начальная кривая намагничивания пермаллоя - график

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

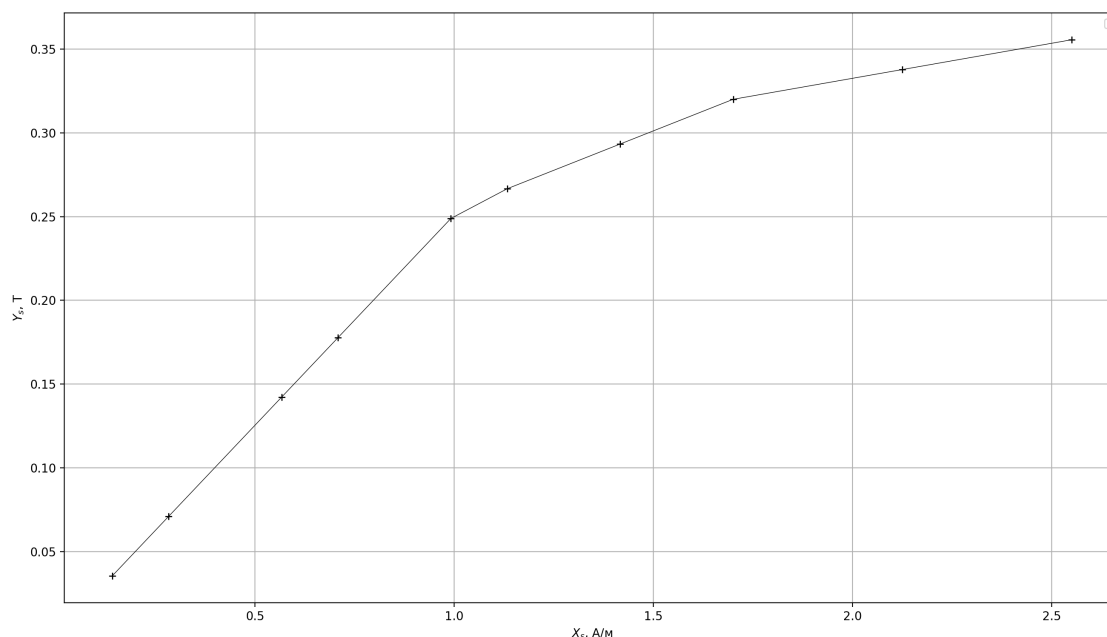


Рис. 9: Начальная кривая намагничивания феррита - график

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

$$B = \frac{R_{\text{и}} C_{\text{и}} U_{\text{out}}}{S N_{\text{и}}}$$

где $U_{\text{out}} = K_y$.

- Кремниевое железо:

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

- Пермаллой:

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

- Феррит:

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

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

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

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

Определим $\tau = RC$ по формуле

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

Найдем τ_{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:**

$$H_c = 0.94 \pm 0.07 \frac{\text{А}}{\text{м}} \quad B_s = 0.84 \pm 0.07 \text{ Тл}$$

- **Пермаллой:**

$$H_c = 0.63 \pm 0.07 \frac{\text{А}}{\text{м}} \quad B_s = 1.69 \pm 0.07 \text{ Тл}$$

- **Феррит:**

$$H_c = 0.71 \pm 0.07 \frac{\text{А}}{\text{м}} \quad B_s = 0.44 \pm 0.07 \text{ Тл}$$

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

- **Кремнистое железо:**

$$\mu_{\min} \simeq 0.05, \mu_{\max} \simeq 0.90$$

- **Пермаллой:**

$$\mu_{\min} \simeq 0.43, \mu_{\max} \simeq 2.56$$

- **Феррит:**

$$\mu_{\min} \simeq 0.05, \mu_{\max} \simeq 0.25$$