

Московский физико-технический институт
Факультет общей и прикладной физики

Лабораторная работа № 3.4.5

(Общая физика: электричество и магнетизм)

Петля гистерезиса (динамический метод)

Работу выполнил:
Иванов Кирилл, 625 группа

г. Долгопрудный
2017 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, торOIDальные образцы с двумя обмотками..

1. Теоретическое введение

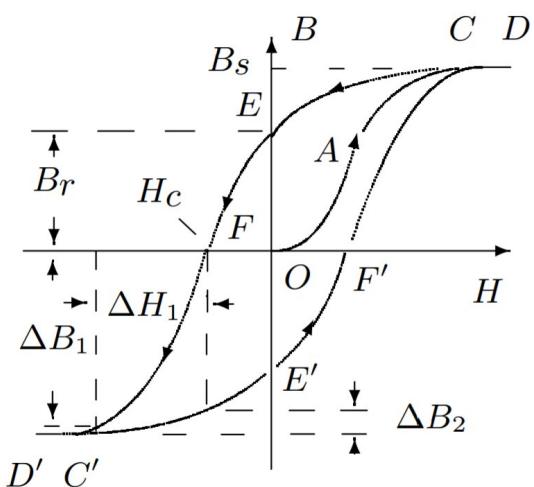


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

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*.

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 размагнченному 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

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).

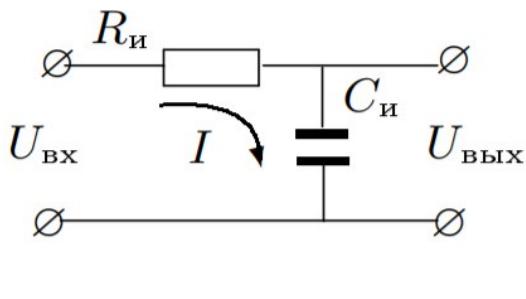


Рис. 2: Интегрирующая RC-цепь

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

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

Этот вывод тем ближе к истине, чем больше постоянная $\tau = RC$ пре- восходит 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_i и C_i , получаем

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

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 \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 В и Н соответствуют эти напряжения (или токи).

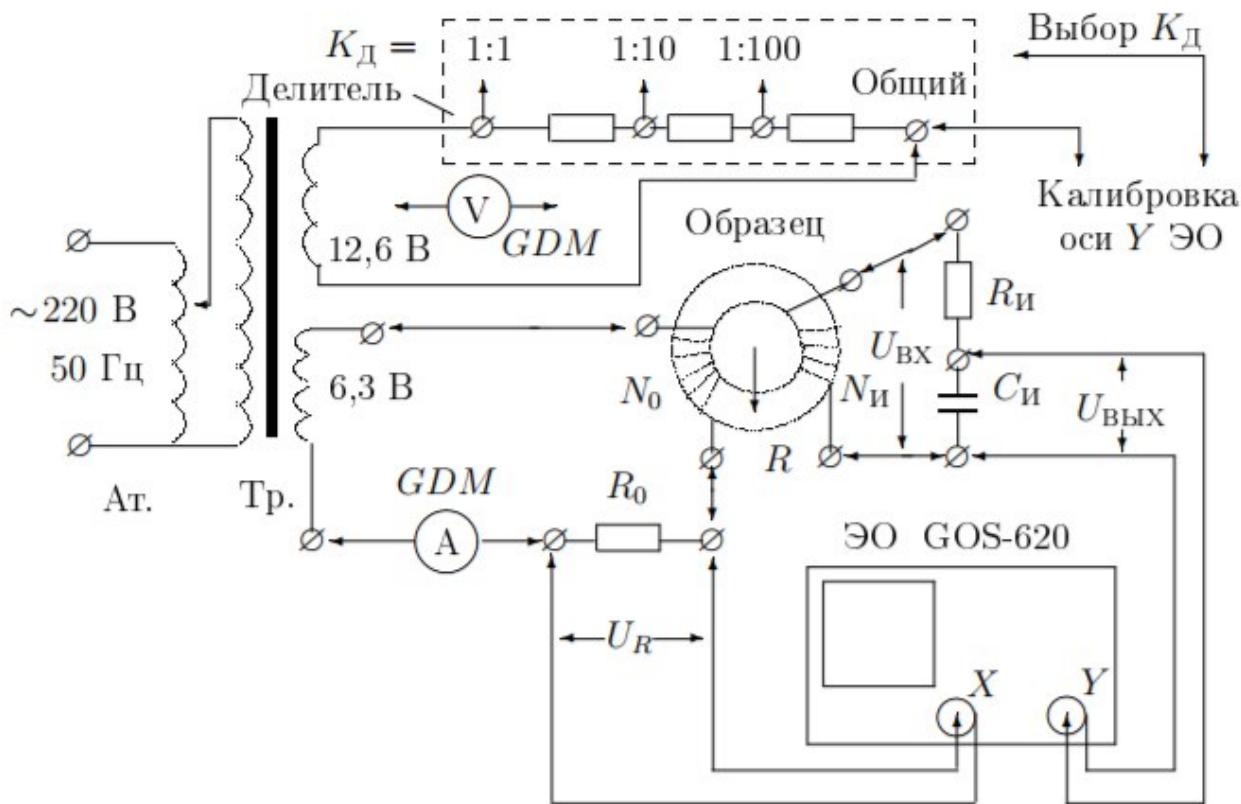


Рис. 3: Схема установки для исследования намагничивания образцов

3. Ход работы

- Запишем данные установки:

$$R_0 = 0,2\Omega \quad R_i = 20\text{k}\Omega \quad C_i = 20\mu\text{F}$$

Параметры тороидальных образцов:

- Кремниевое железо Fe – Si:** $N_0 = 20$ витков; $N_i = 200$ витков; $S = 2\text{cm}^2$; $2\pi R = 11\text{cm}$.
- Пермаллоем Fe – Ni НП50:** $N_0 = 15$ витков; $N_i = 300$ витков; $S = 0,66\text{cm}^2$; $2\pi R = 14,1\text{cm}$.
- Феррит 1000нн:** $N_0 = 45$ витков; $N_i = 400$ витков; $S = 3,0\text{cm}^2$; $2\pi R = 25\text{cm}$.

- 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:**

$K_x = 100 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$, $K_y = 20 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$, $I_{\text{эф}} = 1,03\text{А}$. При этом $2x = 6,2\text{дел}$, $2y = 6,8\text{дел}$.

- **Пермаллой:**

$K_x = 20 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$, $K_y = 50 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$, $I_{\text{эф}} = 218\text{mA}$. При этом $2x = 7\text{дел}$, $2y = 3,5\text{дел}$.

- **Феррит:**

$K_x = 10 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$, $K_y = 50 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$, $I_{\text{эф}} = 92,6\text{mA}$. При этом $2x = 7,1\text{дел}$, $2y = 8\text{дел}$.

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 кремнистого железа

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
x , дел	2.0	1.8	1.6	1.5	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.5	0.4	0.2	0.0
y , дел	3,0	2.8	2.7	2.5	2.3	2.1	2	1.6	1.2	0.7	0.4	0.1	0.0

Таблица 2: Начальная кривая намагничивания для пермаллоя

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
x , дел	3.0	2.8	2.6	2.4	2.2	2.0	1.8	1.5	1.2	0.8	0.5	0.2	0.0
y , дел	1.8	1.7	1.5	1.4	1.1	1	0.9	0.7	0.5	0.4	0.2	0.1	0.0

Таблица 3: Начальная кривая намагничивания для феррита

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
x , дел	3.0	2.5	2.3	1.8	1.6	1.4	1.2	1.0	0.8	0.6	0.4	0.2	0.0
y , дел	3.6	3.4	3.3	3.1	3.0	2.7	2.4	2.2	2.0	1.2	0.5	0.2	0.0

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

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

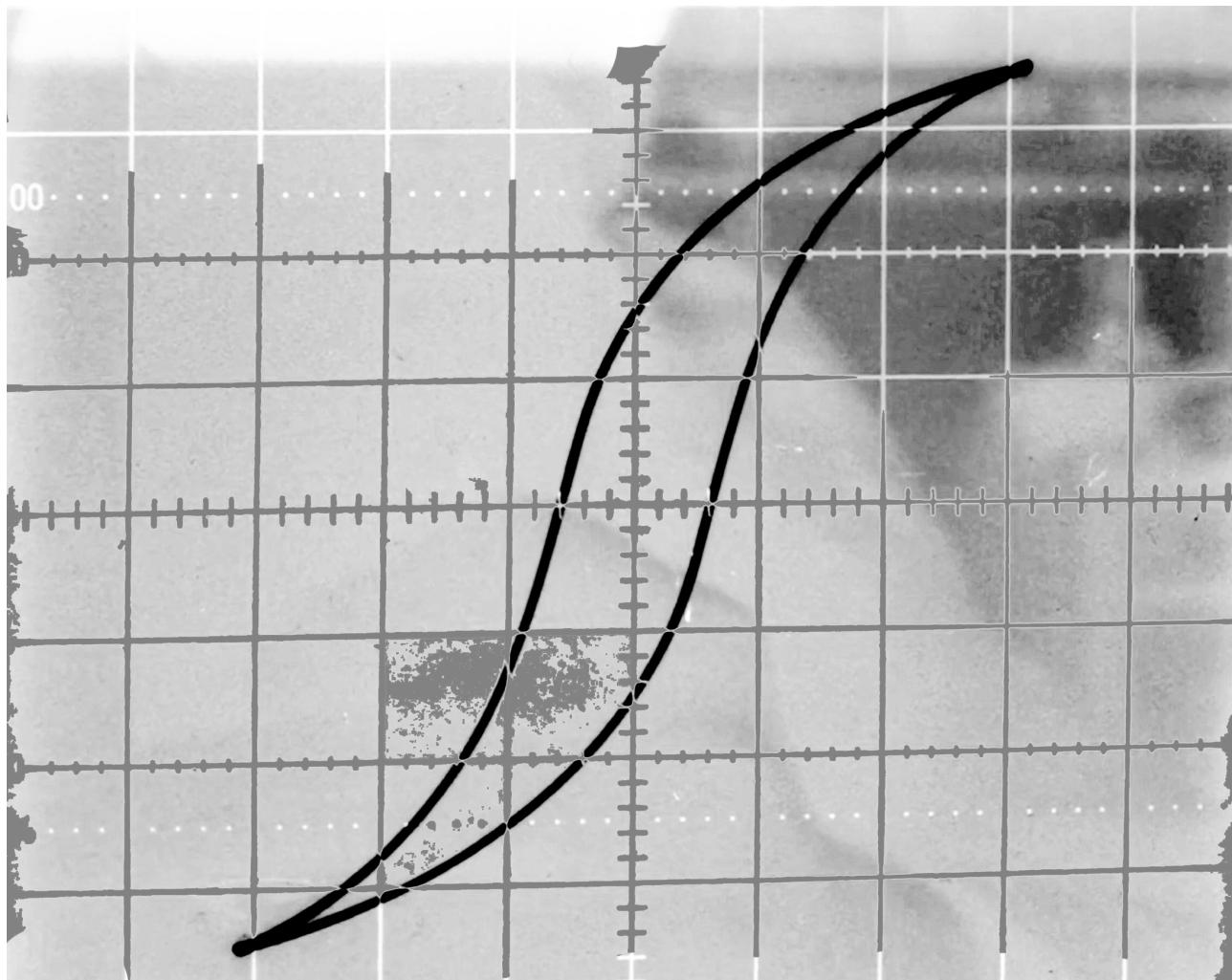


Рис. 4: Петля гистерезиса для кремнистого железа

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

$$B = \frac{R_i C_i U_{\text{вых}}}{S N_i},$$

где $U_{\text{вых}} = K_y$.

- Кремниевое железо:

$$H = 90,9 \frac{\text{А}}{\text{м}}, B = 0,20 \frac{\text{T}}{\text{дел}}$$

- Пермаллой:

$$H = 10,6 \frac{\text{А}}{\text{м}}, B = 1,01 \frac{\text{T}}{\text{дел}}$$

- Феррит:

$$H = 9,0 \frac{\text{А}}{\text{м}}, B = 3,33 \cdot 10^{-2} \frac{\text{T}}{\text{дел}}$$

6. Соединим вход ячейки с обмоткой «6,3 В» трансформатора.

Определим входное напряжение на RC -цепочке: $U_{\text{вх}} = 2y \cdot K_y = 2 \cdot 7,2 = 14,4 \text{ В}$.

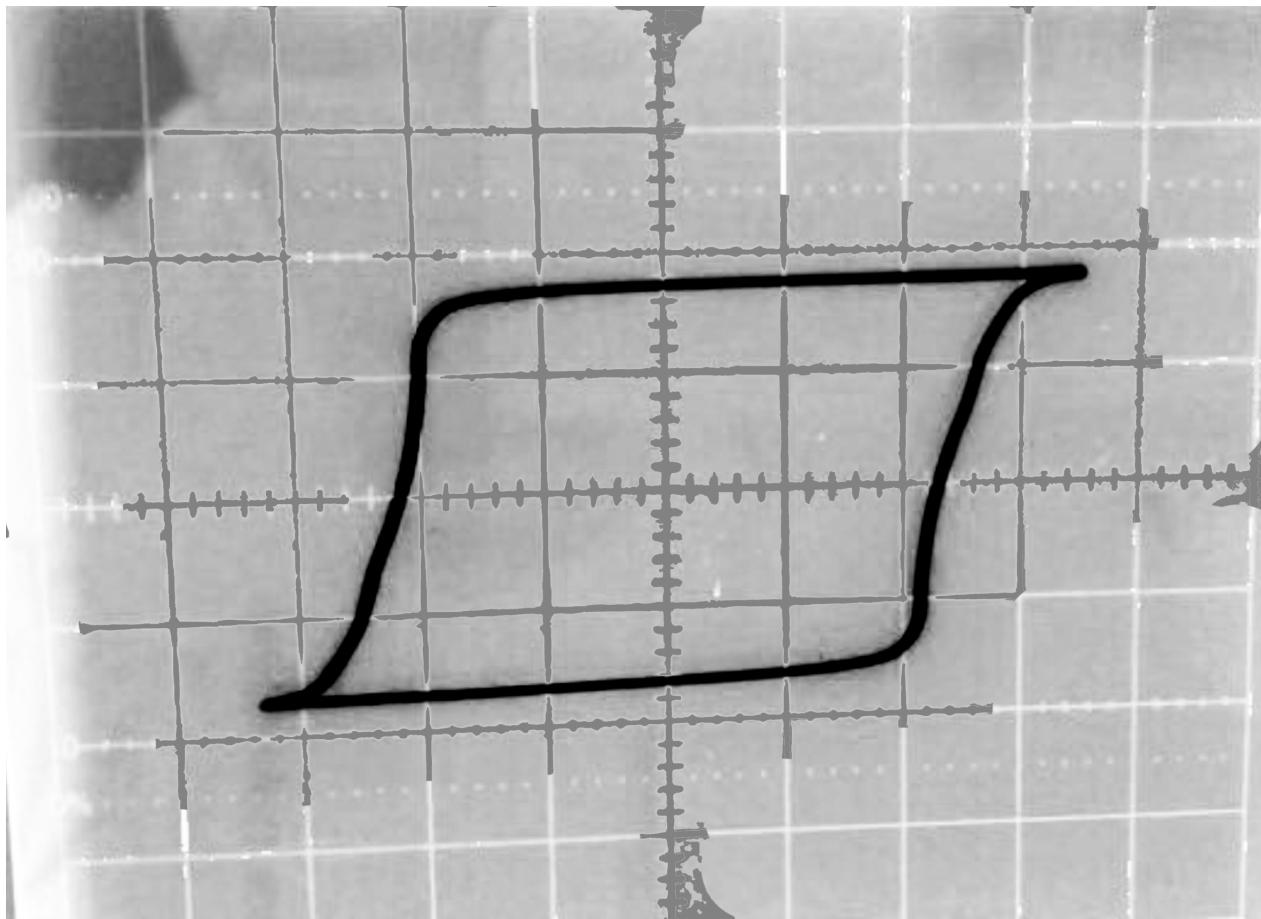


Рис. 5: Петля гистерезиса для пермаллоя

Не меняя тока, переключим Y-вход ЭО к выходу ячейки и аналогичным образом определим $U_{\text{вых}} = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 5,6 = 56 \cdot 10^{-3}$ В.

Определим $\tau = RC$ по формуле

$$\tau = \frac{U_{\text{вх}}}{\Omega U_{\text{вых}}} = 0,52 \pm 0,06 \text{ Ом} \cdot \Phi.$$

Полученное значение $\tau \approx R_i C_i = 0,4$ Ом · Ф.

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

- Кремниевое железо:

$H_c = 54,5 \pm 0,8 \frac{\text{А}}{\text{М}}$	$B_s = 0,70 \pm 0,03 \text{ Тл}$
--	----------------------------------

- Пермаллой:

$H_c = 24,4 \pm 0,5 \frac{\text{А}}{\text{М}}$	$B_s = 1,82 \pm 0,06 \text{ Тл}$
--	----------------------------------

- Феррит:

$H_c = 8,1 \pm 0,2 \frac{\text{А}}{\text{М}}$	$B_s = (12,9 \pm 0,02) \cdot 10^{-2} \text{ Тл}$
---	--

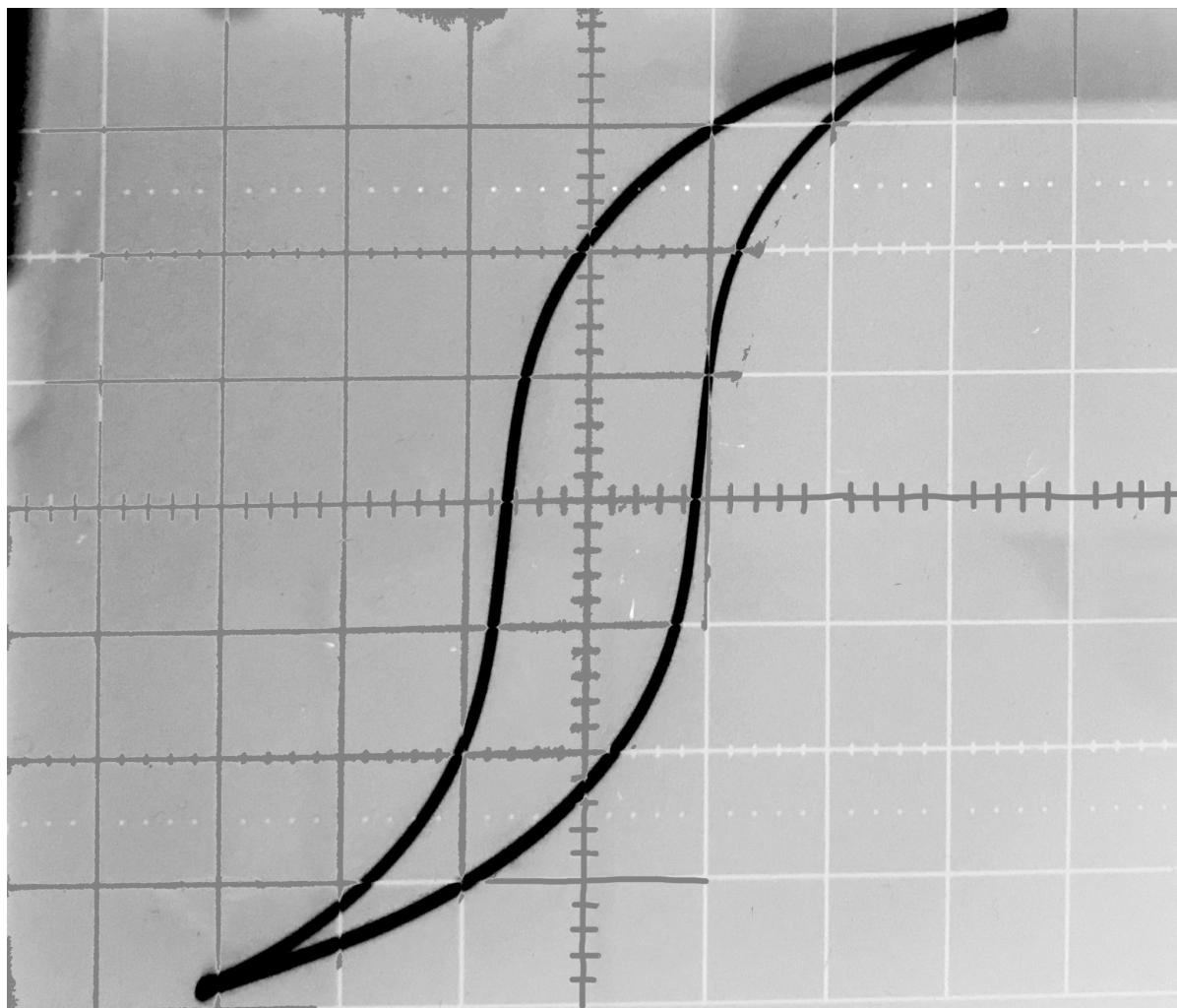


Рис. 6: Петля гистерезиса для феррита

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

- Кремнистое железо:

$$\mu_{max} \simeq (30,6 \pm 2,9) \cdot 10^3$$

- Пермалloy:

$$\mu_{max} \simeq (89,7 \pm 7,6) \cdot 10^3$$

Феррит:

- $\mu_{max} \simeq (7,6 \pm 0,6) \cdot 10^3$