

Лабораторная работа 3.4.5

Герасименко Д.В.

2 курс ФРКТ, группа Б01-104

Аннотация

Тема:

Петля гистерезиса (динамический метод)

Цель работы:

Изучение петель гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных полях

Оборудование:

автотрансформатор, понижающий трансформатор, интегрирующая цепочка, амперметр, вольтметр, электронный осциллограф, делитель напряжения, тороидальные образцы с двумя обмотками.

Теория

Основные характеристики ферромагнетиков — их коэрцитивное поле H_c , магнитная проницаемость μ , рассеиваемая в виде тепла при перемагничивании мощность — зависят от частоты перемагничивающего поля. В данной работе кривые гистерезиса ферромагнитных материалов изучаются в поле частоты $\nu_0 = 50$ Гц с помощью электронного осциллографа.

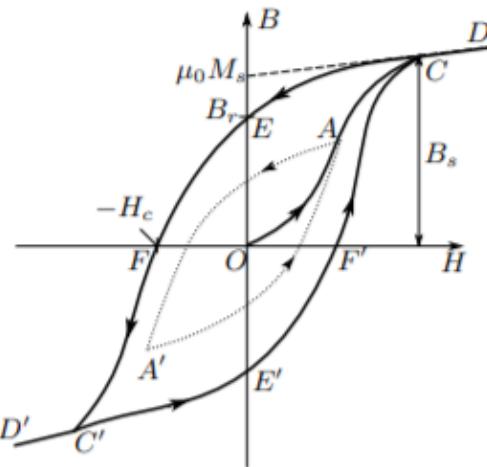


Рис. 1. Петля гистерезиса ферромагнетика

Магнитная индукция B и напряжённость поля H в ферромагнитном материале неоднозначно связаны между собой: индукция зависит не только от напряжённости, но и от предыстории образца. Связь между B и H типичного ферромагнетика иллюстрирует рис. 1.

Если к ферромагнитному образцу прикладывать переменное внешнее магнитное поле, то его состояние на плоскости $B - H$ будет изменяться по замкнутой кривой — петле гистерезиса. Размер петли определяется максимальным значением напряжённости H в цикле (например, петля AA' , обозначенная пунктиром на рис.

1). Если амплитуда напряжённости достаточно велика, то образец будет периодически достигать насыщения, что на рисунке соответствует кривой $CEFC'E'F'C$ (предельная петля гистерезиса). Пересечение предельной петли с вертикальной осью соответствует остаточной индукции B_r , пересечение с горизонтальной осью — коэрцитивному полю H_c . Крайние точки петель, соответствующие амплитудным значениям H (например, точка A на рис. 1), лежат на начальной кривой намагничивания (OAC).

Измерение магнитной индукции. Магнитную индукцию B удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при изменении магнитного потока Φ в катушке, намотанной на образец. Пусть катушка с N витками плотно охватывает образец сечением S , и индукция B в образце однородна. Тогда

$$|B| = \frac{1}{SN} \int \mathcal{E} dt. \quad (1)$$

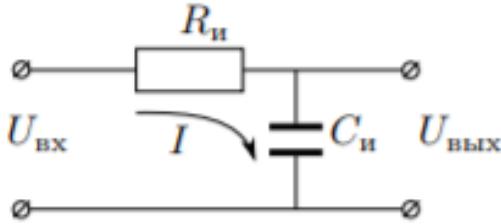


Рис. 2. Интегрирующая ячейка

Для интегрирования в работе используется интегрирующая RC -цепочка (рис. 2). «Входное» напряжение от источника $U_{\text{вх}}(t)$ подаётся на последовательно соединённые резистор R_i и конденсатор C_i . «Выходное» напряжение $U_{\text{вых}}(t)$ снимается с конденсатора. Предположим, что 1) сопротивление источника мало по сравнению с R_i , 2) выходное сопротивление (сопротивление на входе осциллографа), напротив, велико: $R_{\text{вых}} \gg R_i$ и, наконец, 3) сопротивление R_i достаточно велико, так что почти всё падение напряжения приходится на него, а $U_{\text{вых}} \ll U_{\text{вх}}$. В таком случае ток цепи равен $I = (U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}})/R_i \approx U_{\text{вх}}/R_i$, и входное и выходное сопротивление связаны соотношением

$$U_{\text{вых}} = \frac{q}{C_i} = \frac{1}{C_i} \int_0^t Idt \approx \frac{1}{\tau_i} \int_0^t U_{\text{вх}} dt, \quad (2)$$

где $\tau_i = R_i C_i$ — постоянная времени RC -цепочки. Для индукции поля из (1) получаем

$$|B| = \frac{1}{SN} \int U_{\text{вх}} dt = \frac{\tau_i}{SN} U_{\text{вых}}. \quad (3)$$

Замечание. Уточним критерий применимости соотношения (2). Пусть на вход интегрирующей ячейки подан синусоидальный сигнал с частотой ω_0 . Тогда, пользуясь методом комплексных амплитуд, нетрудно найти отношение амплитуд входного и выходного напряжений:

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1/\omega_0 C}{\sqrt{R^2 + 1/(\omega_0 C)^2}}. \quad (4)$$

Тогда неравенство $U_{\text{вых}} \ll U_{\text{вх}}$ реализуется, если

$$\tau \equiv RC \gg \frac{1}{\omega_0} \quad (5)$$

(импеданс конденсатора мал по сравнению сопротивлением резистора). В таком случае для синусоидального сигнала имеем

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \approx \frac{1}{\omega_0 \tau}. \quad (6)$$

В общем случае, если ω_0 — частота самой низкой гармоники в спектре произвольного входного сигнала, то при $\omega_0 \tau \gg 1$ неравенство $U_{\text{вых}} \ll U_{\text{вх}}$ выполняется на любой частоте $\omega > \omega_0$.

Экспериментальная установка

Схема установки изображена на рис. 3. Напряжение сети (≈ 220 В, 50 Гц) с помощью трансформаторного блока T , состоящего из регулировочного автотрансформатора и разделительного понижающего трансформатора, подаётся на намагничивающую обмотку N_0 исследуемого образца.

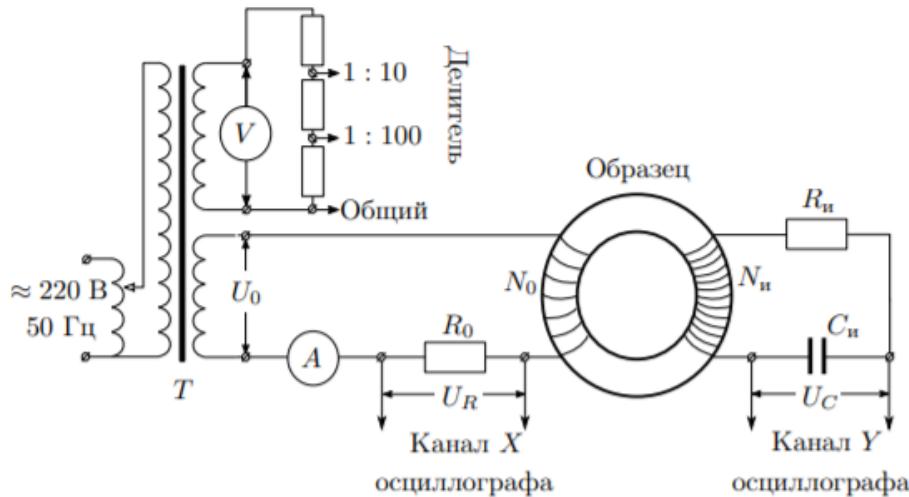


Рис. 3 Схема установки для исследования намагничивания образцов.

В цепь намагничивающей катушки, на которую подаётся некоторое напряжение U_0 , последовательно включено сопротивление R_0 . Напряжение на R_0 , равное $U_R = R_0 I_0$, где I_0 — ток в намагничивающей обмотке N_0 , подаётся на канал X осциллографа. Связь напряжённости H в образце и тока I_0 рассчитывается по теореме о циркуляции. Действующее значение переменного тока в обмотке N_0 измеряется амперметром А. Для измерения магнитной индукции B с измерительной обмотки N_i на вход RC -цепочки подаётся напряжение U_i ($U_{\text{вх}}$), пропорциональное производной dB/dt . С интегрирующей ёмкостью C_i снимается напряжение U_C ($U_{\text{вых}}$), пропорциональное величине B , и подаётся на вход Y осциллографа. Значение индукции поля B рассчитывается по формуле (3). 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 осциллографа.

Выполнение

I. Измерение петли резонанса

1) Соберем схему согласно рис. 3. Подберем ток питания в намагничивающей обмотке с помощью автотрансформатора и коэффициенты усиления ЭО таким образом, чтобы предельная петля гистерезиса занимала большую часть экрана. Приведем характерные значения катушек разных материалов в таблице 1.

Материал	N_0	N_i	$S^2, \text{ см}^2$	$2\pi R, \text{ см}$
Феррит	40	400	3.0	25.0
Пермалloy	35	220	3.8	24.0
Крем. железо	40	400	1.2	10.0

Таблица 1. Характеристики катушек

2) Для каждого образца получим передельные петли гистерезиса, по коэффициентам усиления ЭО K_x и K_y рассчитаем масштабы, определим двойные амплитуды коэрцитивной силы [$2x(c)$] и индукции насыщения [$2y(s)$]. Масштабы по осям X и Y рассчитаем по формулам $H = IN_0/(2\pi R)$, $I = K_x/R_0$; $B = R_i C_i U_{\text{вых}}/(SN_i)$, где $U_{\text{вых}} = K_y$. Результаты измерений и вычислений занесём в таблицу 2.

Материал	$[2X_s]$, дел	$[2Y_s]$, дел	$[2X_c]$, дел	$[2Y_c]$, дел	$K_x, \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$	$K_y, \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$	$I_{\text{эфф}}, \text{mA}$	$H, \frac{\text{А}}{\text{м дел}}$	$B, \frac{\text{Тл}}{\text{дел}}$
Феррит	6.4	4.0	1.2	1.7	20	20	127	10.6	0.07
Пермаллой	2.9	4.3	2.1	4.0	50	100	170	24.3	0.48
Железо	4.8	5.8	1.6	2.1	50	50	244	66.7	0.42

Таблица 2 Для измерительных шкалы для материалов

3) Зная масштабы по осям, можно определить значения коэрцитивной силы H_c и индукции насыщения B_s . Результаты заносим в таблицу 3. Рассчитаем погрешности соответствующих величин из формул для них:

$$H_c = \frac{[2X_c]}{2} \cdot H = [X_c] \cdot \frac{N_0}{2\pi R} \frac{K_x}{R_0} \Rightarrow \sigma_{H_c} = \sigma_{[X_c]} \quad B_s = \frac{[2Y_s]}{2} \cdot B = [Y_s] \cdot \frac{R_u C_u}{SN_u} K_y \Rightarrow \sigma_{B_s} = \sigma_{[Y_s]} \quad (7)$$

Материал	$H_c, \frac{\text{А}}{\text{м}}$	$\sigma_{H_c}, \frac{\text{А}}{\text{м}}$	$B_s, \text{мТл}$	$\sigma_{B_s}, \text{мТл}$
Феррит	6.4	1.1	60	7
Пермаллой	25.5	2.4	1032	48
Крем. железо	53.4	6.7	1218	42

Таблица 3. Результаты вычислений

4) Для каждого из образцов построим начальные кривые гистерезиса, сняв 8 измерий.

I, mA	118	109	96	86	77	63	49	38
$[2X_s]$, дел	6.1	5.9	4.9	4.3	3.8	3.0	2.4	1.8
$[2Y_s]$, дел	4.0	3.9	3.7	3.4	3.2	2.8	2.2	1.6
$B, \text{Tл}$	0.14	0.14	0.13	0.12	0.11	0.10	0.08	0.06
$H, \frac{\text{А}}{\text{м}}$	32.33	31.27	25.97	22.79	20.14	15.90	12.72	9.54

Таблица 4.1. Начальная кривая для феррита

Начальная кривая для феррита

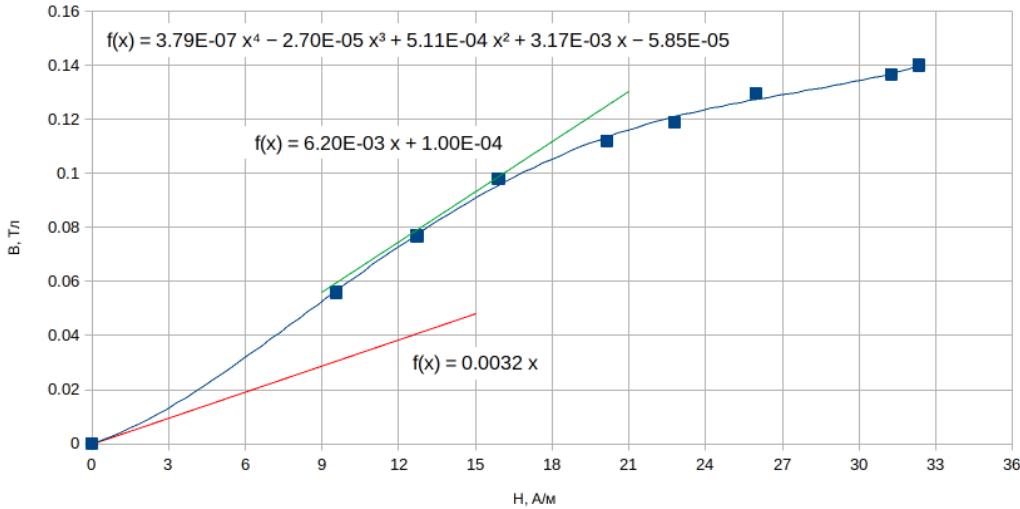


Рис 1.1. Начальная кривая феррита

Соответствующие значения

$$\mu_{\text{диф}}(0) = (3.2 \pm 0.6) \cdot 10^{-3} \frac{\text{Тл м}}{\text{А}} \quad \mu_{\text{max}} = (6.2 \pm 1.2) \cdot 10^{-3} \frac{\text{Тл м}}{\text{А}}$$

I, мА	152	140	130	120	110	100	90	80
[2X _s], дел	2.3	2.1	1.9	1.7	1.5	1.2	1.0	0.6
[2Y _s], дел	4.0	3.8	3.4	3.0	2.5	1.6	1.1	0.4
B, Тл	0.84	0.80	0.71	0.63	0.53	0.34	0.23	0.084
H, $\frac{\text{А}}{\text{м}}$	76.71	70.04	63.37	56.70	50.03	40.02	33.35	20.01

Таблица 4.2. Начальная кривая для пермаллоя

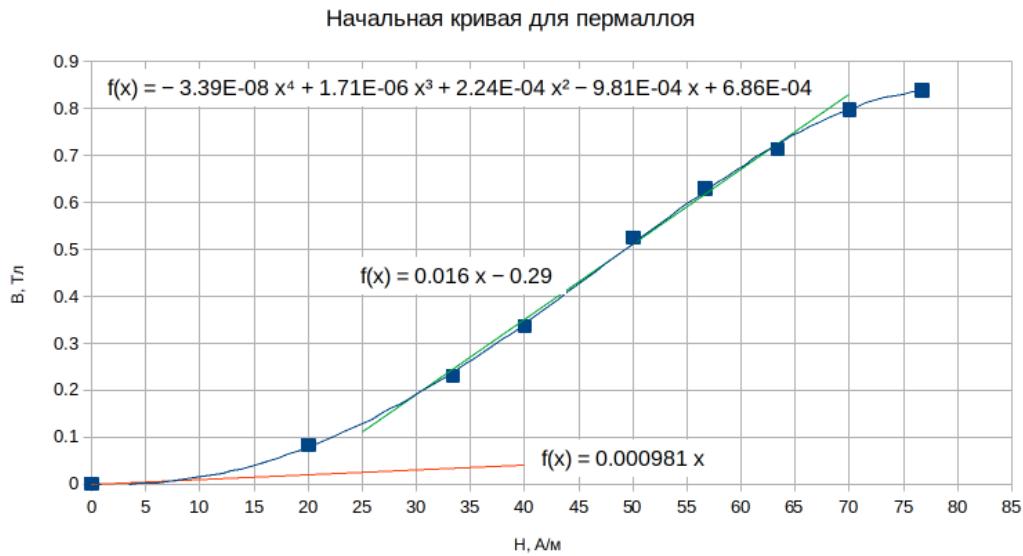


Рис 1.2. Начальная кривая для пермаллоя

Соответствующие значения

$$\mu_{\text{диф}}(0) \approx (10 \pm 2) \cdot 10^{-4} \frac{\text{Tл}}{\text{А}} \quad \mu_{max} = (16 \pm 3) \cdot 10^{-3} \frac{\text{Tл}}{\text{А}}$$

I, мА	221	191	181	171	162	152	133	120
[2X _s], дел	4.4	3.7	3.5	3.3	3.2	2.9	2.5	2.3
[2Y _s], дел	5.5	5.1	4.8	4.6	4.5	4.2	3.8	3.4
B, Тл	1.32	1.22	1.15	1.11	1.08	1.01	0.91	0.82
H, А/м	53.46	44.96	42.53	40.10	38.88	35.24	30.38	27.95

Таблица 4.3. Начальная кривая для кремниевого железа

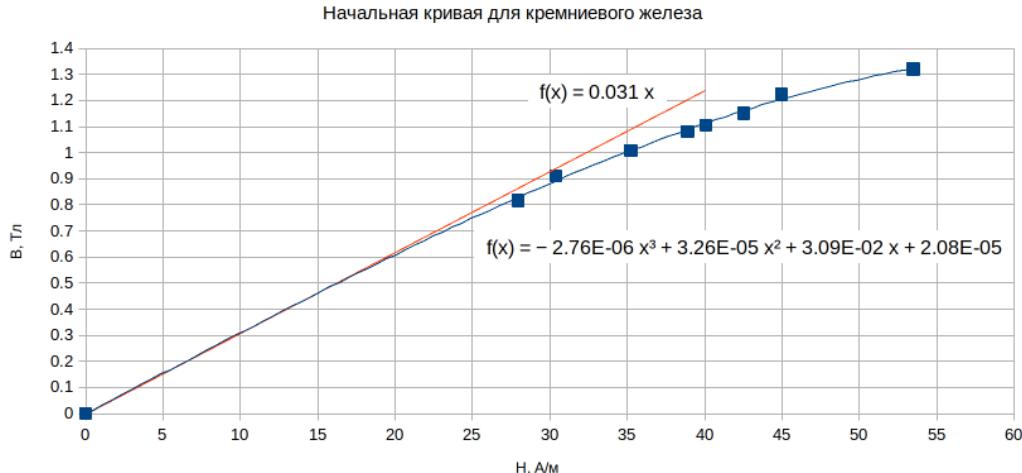


Рис 1.3. Начальная кривая для кремниевого железа

Соответствующее значение

$$\mu_{\text{диф}}(0) \approx \mu_{\max} = (31 \pm 6) \cdot 10^{-3} \frac{\text{Tл м}}{\text{А}}$$

II. Проверка калибровки осциллографа

Проверим калибровку ЭО по оси X. Отключим намагничивающую обмотку N_0 от цепи, соединив оба провода, идущих к обмотке, на одной ее клемме. С помощью автотрансформатора подберем такой ток через R_0 , при котором горизонтальная прямая занимает большую часть экрана. При $K_x = 50$ мВ/дел рассчитаем чувствительность $m_x = 48.5$ мВ/дел.

Аналогичные действия проводим при $K_x = 20$ мВ/дел. Получаем $m_x = 19.6$ мВ/дел.

Так как $m_x \approx K_x$, ЭО откалиброван по оси X корректно.

Также необходимо проверить калибровку по оси Y. Для этого соединим вход Y ЭО с клеммам делителя "1:100 - земля". Не меняя рабочего коэффициента $K_y = 50$ мВ/дел, подберем с помощью трансформатора напряжение, при котором вертикальная прямая занимает большую часть экрана. Подключим вольтметр V к тем же клеммам делителя и, используя измеренное $U_{\text{эф}}$, рассчитаем чувствительность $m_y = 50.5$ мВ/дел.

Те же действия повторяем при $K_y = 20$ В/дел. Получаем $m_y = 18.4$ В/дел.

Так как $m_y \approx K_y$, ЭО откалиброван по оси Y корректно.

III. Проверка применимости теоретических выкладок

Проверим применимость формулы (2). Для этого рассчитаем τ – постоянную времени RC -цепочки. Для определения напряжений на входе и выходе интегрирующей ячейки соединим вход ячейки с обмоткой «6,3 В» трансформатора. Подключим Y-вход ЭО ко входу интегрирующей ячейки и отключим X-вход ЭО. Подберем такой ток, чтобы вертикальная прямая занимала большую часть экрана, и определим входное напряжение $U_{\text{вх}} = y \cdot K_y = 3$ дел $\cdot 2$ В/дел $= 6$ В. Не меняя тока, подключим Y-вход ЭО к выходу ячейки и аналогичным образом определим $U_{\text{вых}} = y \cdot K_y = \frac{4.7}{2}$ дел $\cdot 20$ мВ/дел $= 47$ мВ. Рассчитаем $\tau = \frac{U_{\text{вх}}}{\omega U_{\text{вых}}} = \frac{6}{0.047 \cdot 2\pi \cdot 50} = 0,406$ с, где $\omega = 2\pi\nu$. По определению $\tau_{RC} = R_i C_i = 0,4$ с. Так как $\tau \approx \tau_{RC}$, то условия применимости нашей теории выполнены.

Вывод

В ходе данной работы было исследовано явление гистерезиса магнитной индукции ферромагнитов из различных материалов: феррита, пермаллоя и кремниевого железа. С помощью осциллографа наблюдалась картина в координатах $U(U)$, точки которой по

ФОРМУЛАМ

были пропорциональны значениям магнитной индукции B и магнитной напряженности H в торроидальном сечении магнита. Соответственно были получены следующие результаты:

Материал	B_s , мЛТл	H_c , $\frac{A}{m}$	$\mu_{\text{нач}}$, $\frac{\text{Тл м}}{A}$	μ_{max} , $\frac{\text{Тл м}}{A}$
Феррит	60 ± 7	6.4 ± 1.1	3.2 ± 0.6	6.2 ± 1.2
Пермаллой	1032 ± 48	25.5 ± 2.4	10 ± 2	16 ± 3
Кремниевое железо	1218 ± 42	53.4 ± 6.7	31 ± 6	31 ± 6

Приложение

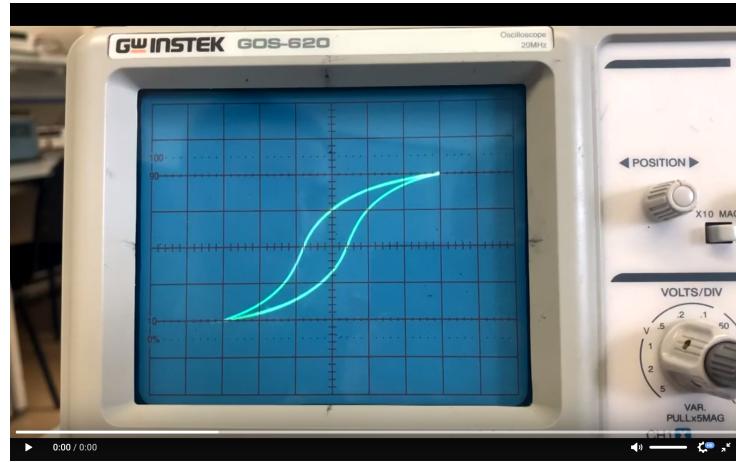


Рис 2.1 Петля гистерезиса для феррита

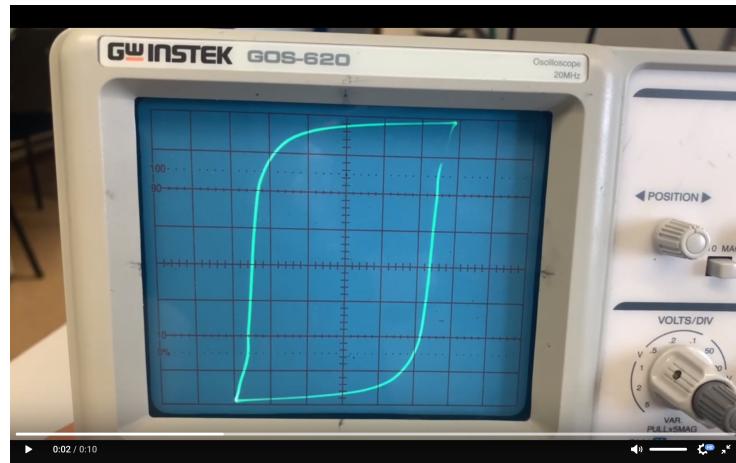


Рис 2.2 Петля гистерезиса для пермаллоя

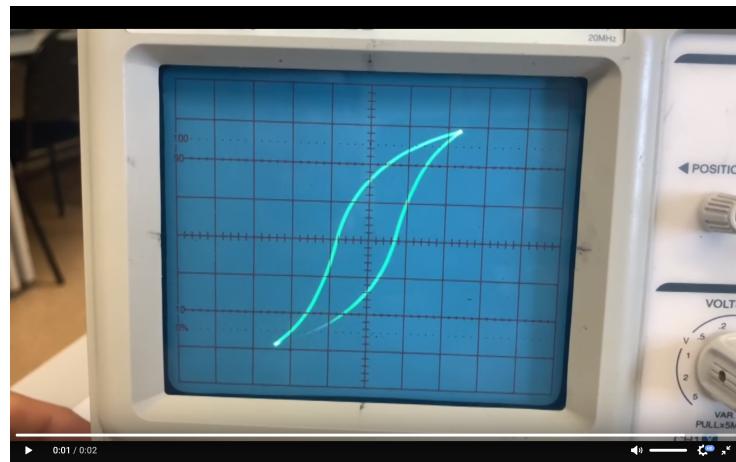


Рис 2.3 Петля гистерезиса для кремниевого железа