

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
«МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ»

Лабораторная работа 3.4.5
Петля гистерезиса (динамический метод)

Филиппенко Павел Сергеевич
студент группы Б01-001
2 курс ФРКТ

г. Долгопрудный
2021 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

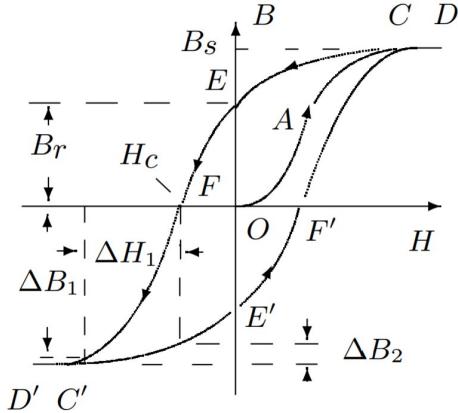


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

Если к размагниченному образцу начинать 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} - *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

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 начи-

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 *пределной петлей гистерезиса*.

1.1 Измерение магнитной индукции в образцах.

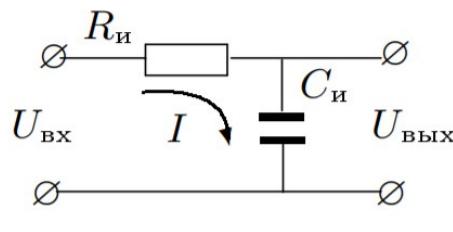
Магнитную индукцию удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при изменении магнитного потока Φ в катушке, намотанной на образец:

$$\mathcal{E} = -\frac{d}{dt}.$$

Тогда отсюда и из формулы $= BSN$ получаем:

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

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



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

Рис. 2: Интегрирующая RC-цепь

$$U \simeq \frac{1}{R} \int U dt.$$

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

$$U = \frac{U}{RC\Omega},$$

где Ω - частота сигнала.

В итоге, обозначив параметры интегрирующей цепи через R и C , получаем

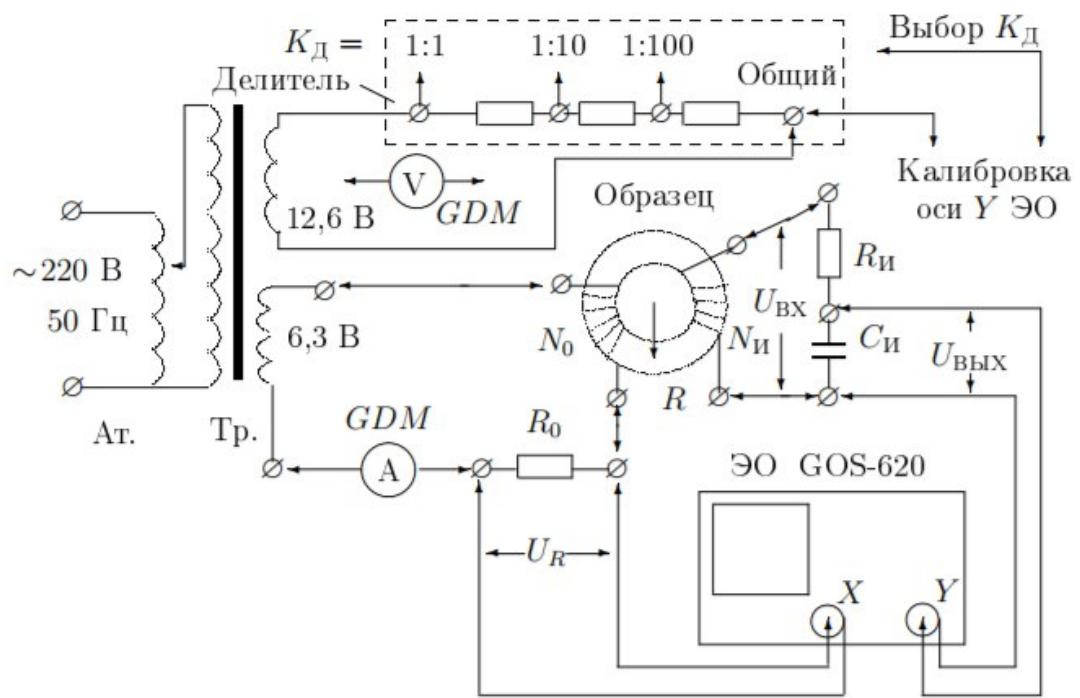
$$|B| = \frac{1}{SN} \int U dt = \frac{R}{SN} U.$$

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 на вход интегрирующей RC -цепочки подается напряжение U (UBX), пропорциональное производной \dot{B} , а с выхода снимается напряжение $U_C(U)$, 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).



3 Обработка данных

Экспериментальные данные собираем с трех образцов: феррита, пермаллоя (Fe-Ni) и кремнистого железа (Fe-Si). Для каждого из изучаемых образцов определим, при каких значениях тока и напряжения на осциллографе наблюдается предельная петля. После этого снимем зависимость тока и напряжения.

Для расчета напряженности магнитного поля воспользуемся формулой

$$H = \frac{IN_0}{2\pi r} \quad (1)$$

где r – радиус тороидального соленоида, N_0 – количество витков в первичной обмотке.

Индукцию магнитного поля найдем по формуле

$$B = \frac{RCU}{SN_u} \quad (2)$$

где R, C – параметры RC -цепи, N_u – количество витков во вторичной обмотке. По полученным данным построим графики зависимости $B(H)$, а так же найдем μ вещества

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (3)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$. Отметим, что поскольку мы используем цепь переменного тока, вольтметр и амперметр дают на выходе эффективные значение напряжения и силы тока. Для того, чтобы получить амплитудные значения, необходимо выходные значения умножить на $\sqrt{2}$.

$$U = \sqrt{2}U_{\text{эф}} \quad I = \sqrt{2}I_{\text{эф}} \quad (4)$$

3.1 Образец 1 (феррит)

Запишем параметры образца:

$$\begin{aligned} N_0 &= 35 \\ N_u &= 400 \\ S &= 3 \text{ см}^2 \\ 2\pi r &= 25 \text{ см} \end{aligned}$$

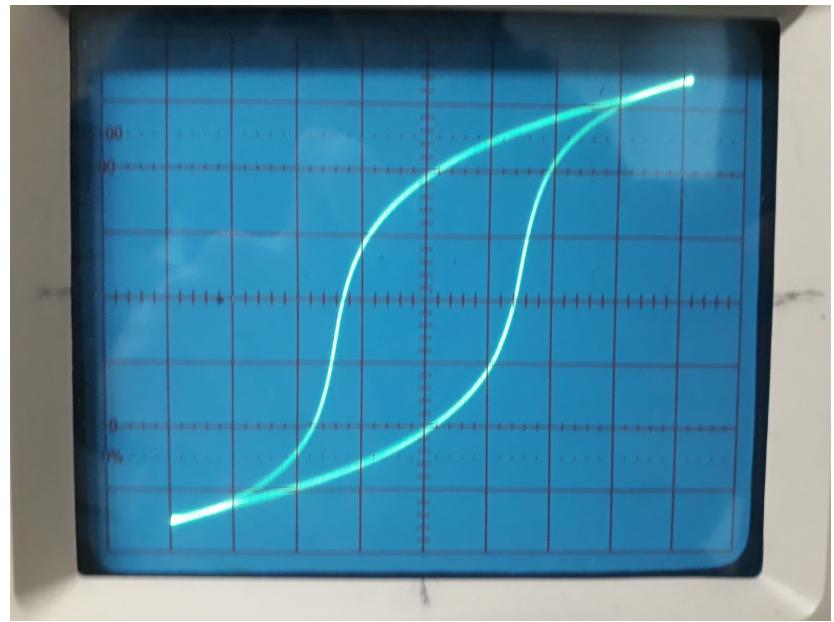


Рис. 4: Предельная петля, феррит

Предельная петля наблюдается при

$$I = 132,38 \text{ mA}$$

$$U = 36,62 \text{ мВ}$$

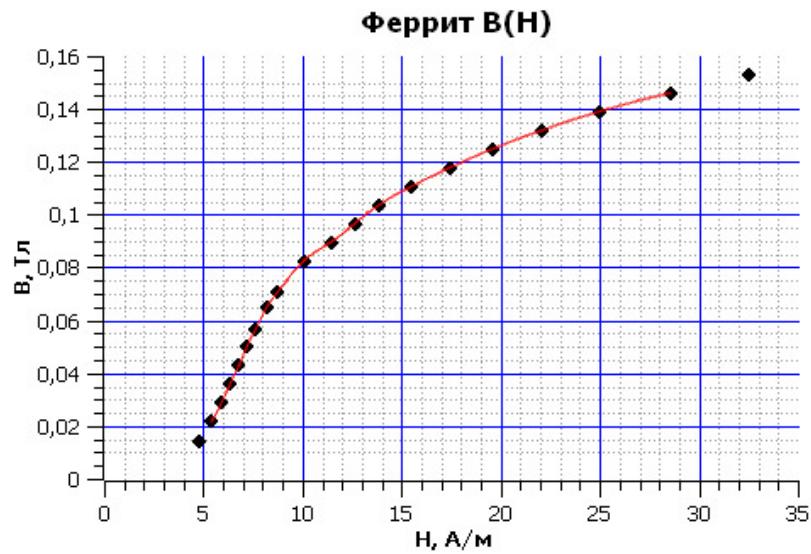


Рис. 5: Феррит, график зависимости $B(H)$

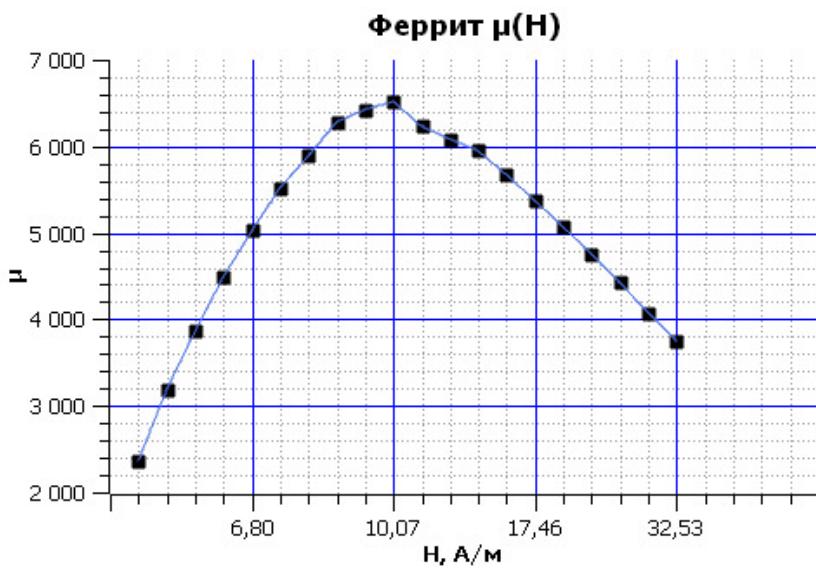


Рис. 6: Феррит, график зависимости $\mu(H)$

$I_{\text{эф}}, \text{mA}$	I, mA	$H, \text{A/m}$	$U_{\text{эф}}, \text{mV}$	U, mV	B, Tl	μ
24,05	34,01	4,76	3,00	4,24	0,01	2 363,46
27,33	38,65	5,41	4,60	6,51	0,02	3 189,04
29,92	42,31	5,92	6,10	8,63	0,03	3 862,86
32,06	45,34	6,35	7,60	10,75	0,04	4 491,50
34,33	48,55	6,80	9,10	12,87	0,04	5 022,37
36,36	51,42	7,20	10,60	14,99	0,05	5 523,61
38,60	54,59	7,64	12,00	16,97	0,06	5 890,27
41,32	58,44	8,18	13,70	19,37	0,06	6 282,05
44,22	62,54	8,76	15,00	21,21	0,07	6 427,08
50,87	71,94	10,07	17,50	24,75	0,08	6 518,05
57,80	81,74	11,44	19,00	26,87	0,09	6 228,26
63,85	90,30	12,64	20,50	28,99	0,10	6 083,23
70,10	99,14	13,88	22,00	31,11	0,10	5 946,29
78,40	110,87	15,52	23,50	33,23	0,11	5 679,28
88,17	124,69	17,46	25,00	35,36	0,12	5 372,30
99,10	140,15	19,62	26,50	37,48	0,12	5 066,56
111,70	157,97	22,12	28,00	39,60	0,13	4 749,48
126,30	178,62	25,01	29,50	41,72	0,14	4 425,47
144,15	203,86	28,54	31,00	43,84	0,15	4 074,63
164,30	232,36	32,53	32,50	45,96	0,15	3 747,89

Таблица 1: Феррит

3.2 Образец 2 (пермаллой)

Запишем параметры образца:

$$\begin{aligned} N_0 &= 40 \\ N_u &= 200 \\ S &= 3,8 \text{ см}^2 \\ 2\pi r &= 24 \text{ см} \end{aligned}$$

Предельная петля наблюдается при

$$\begin{aligned} I &= 233,54 \text{ mA} \\ U &= 169,28 \text{ мВ} \end{aligned}$$

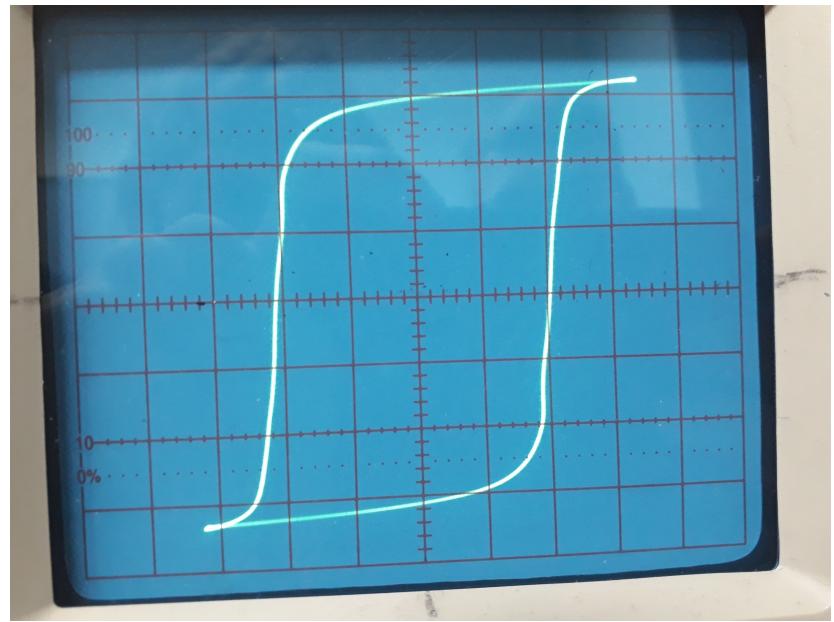


Рис. 7: Предельная петля, пермаллой

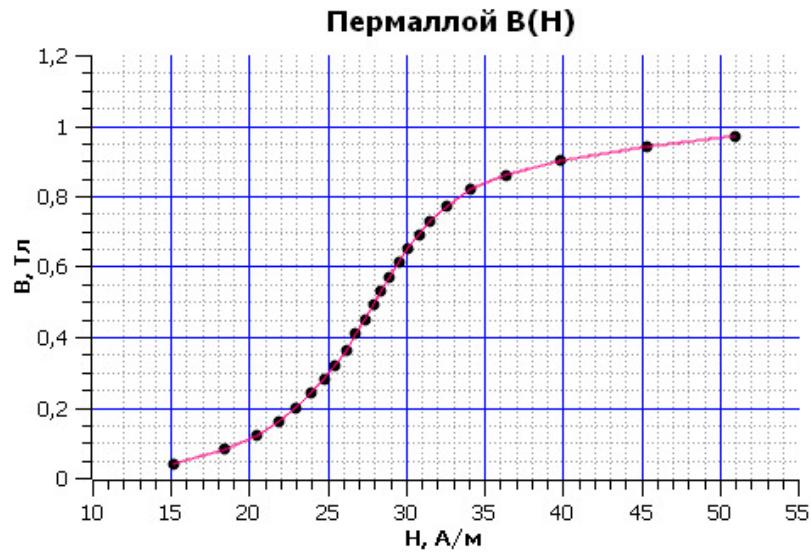


Рис. 8: Пермаллой, график зависимости $B(H)$

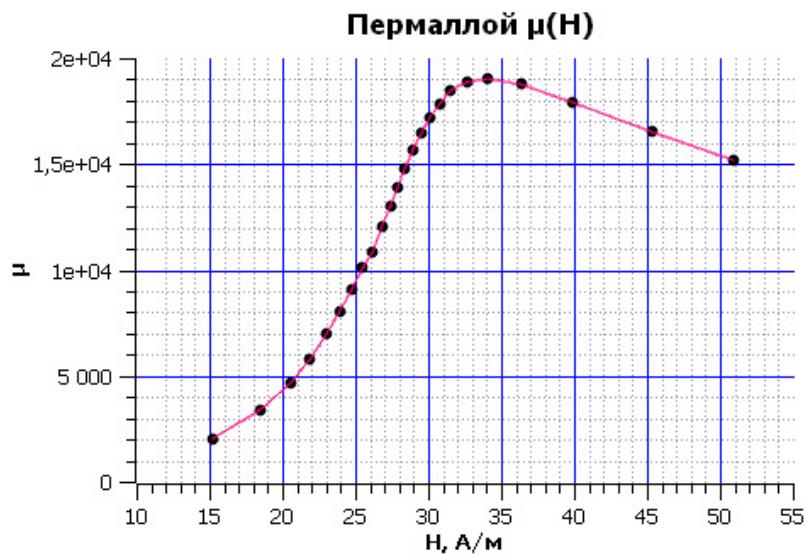


Рис. 9: Пермаллой, график зависимости $\mu(H)$

$I_{\text{эф}}, \text{mA}$	I, mA	$H, \text{A/m}$	$U_{\text{эф}}, \text{mB}$	U, mB	B, Tl	μ
64,50	91,22	15,20	5,20	7,35	0,04	2 025,96
78,28	110,70	18,45	10,50	14,85	0,08	3 370,75
87,16	123,26	20,54	16,10	22,77	0,12	4 641,91
92,90	131,38	21,90	21,40	30,26	0,16	5 788,77
97,60	138,03	23,00	27,00	38,18	0,20	6 951,88
101,49	143,53	23,92	32,50	45,96	0,24	8 047,26
105,10	148,63	24,77	38,00	53,74	0,28	9 085,92
108,20	153,02	25,50	43,50	61,52	0,32	10 103,00
111,20	157,26	26,21	48,10	68,02	0,36	10 869,97
113,77	160,90	26,82	54,50	77,07	0,41	12 038,07
116,22	164,36	27,39	60,20	85,14	0,45	13 016,79
118,40	167,44	27,91	65,50	92,63	0,49	13 902,01
120,50	170,41	28,40	71,00	100,41	0,53	14 806,74
122,80	173,67	28,94	76,50	108,19	0,57	15 654,93
125,28	177,17	29,53	82,10	116,11	0,61	16 468,33
127,66	180,54	30,09	87,40	123,60	0,65	17 204,61
130,80	184,98	30,83	93,00	131,52	0,69	17 867,48
133,83	189,26	31,54	98,50	139,30	0,73	18 495,71
138,40	195,73	32,62	103,90	146,94	0,77	18 865,47
144,70	204,64	34,11	109,50	154,86	0,82	19 016,64
154,34	218,27	36,38	115,20	162,92	0,86	18 756,95
169,10	239,14	39,86	120,60	170,55	0,90	17 922,22
192,30	271,95	45,33	126,40	178,76	0,94	16 517,94
216,24	305,81	50,97	130,60	184,70	0,97	15 177,33

Таблица 2: Пермаллой

3.3 Образец 3 (кремнистое железо)

Запишем параметры образца:

$$\begin{aligned}N_0 &= 35 \\N_u &= 350 \\S &= 1,2 \text{ см}^2 \\2\pi r &= 10 \text{ см}\end{aligned}$$

Предельная петля наблюдается при

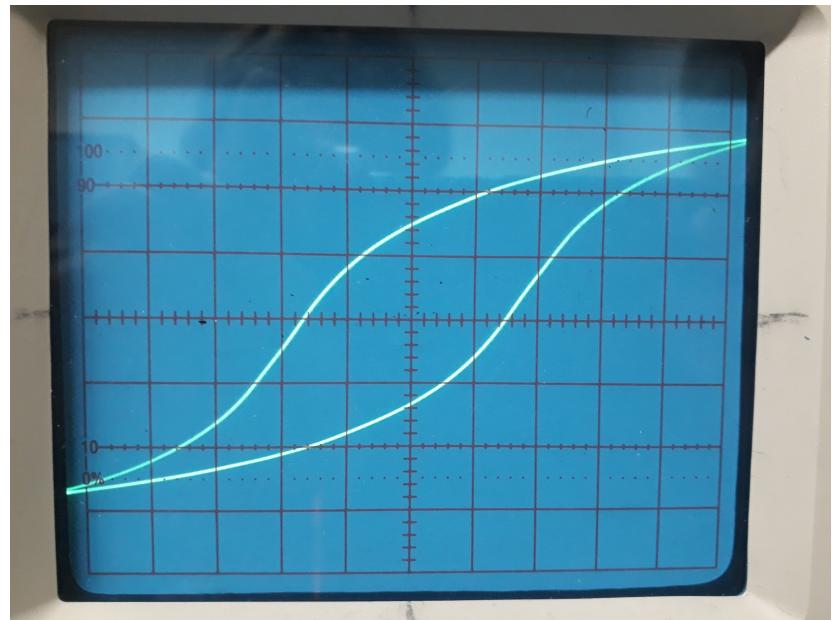


Рис. 10: Предельная петля, кремнистое железо

$$I = 877,38 \text{ mA}$$
$$U = 167,44 \text{ мВ}$$

4 Дополнительные вопросы к работе