

Работа 3.4.4

Петля гистерезиса (статический метод)

Малиновский Владимир

galqiwi@galqiwi.ru

Цель работы: Исследование кривых намагничивания ферромагнетиков с помощью баллистического гальванометра.

В работе используются: генератор тока с блоком питания, тороид, соленоид, баллистический гальванометр с осветителем и шкалой, амперметры, магазин сопротивлений, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), разделительный трансформатор.

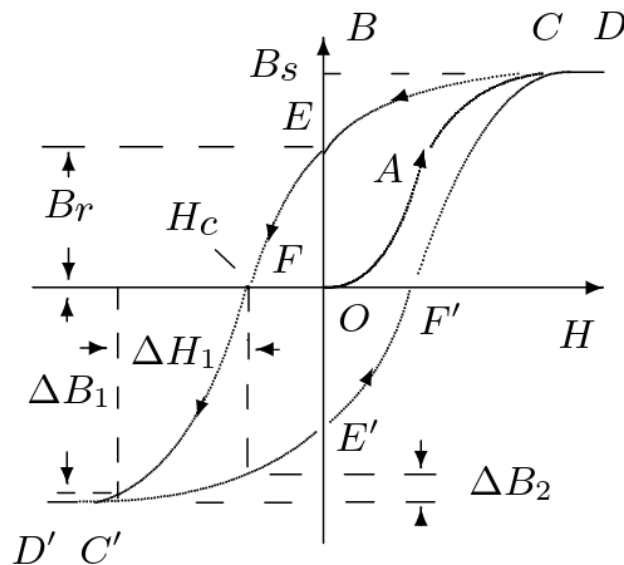


Рис. 1. Петля гистерезиса ферромагнетика

Идея

Как показано на рисунке 1, зависимость напряженности H и индукции B в ферромагните неоднозначная. В этой работе предстоит промерить этот эффект, используя гальванометр, работающий в баллистическом режиме.

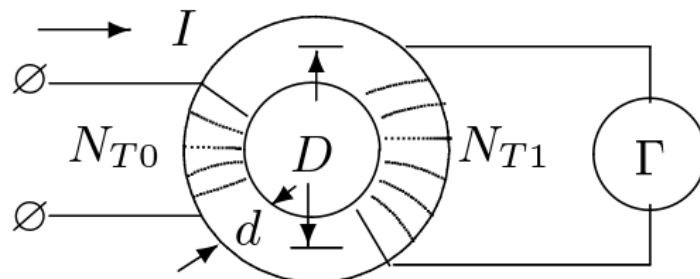


Рис. 2. Схема для измерения
индукционного тока (или заряда)

На тороидальный сердечник (рис. 2) равномерно намотана намагничивающая обмотка с числом витков N_{T0} , а поверх нее – измерительная обмотка с числом витков N_{T1} . Идея заключается в том, что, если быстро изменить ток в намагничивающей обмотке, то в измерительной обмотке возникнет ЭДС индукции. Причем, напряженность поля H буждет пропорциональна току I в первичной обмотке, а изменение магнитной индукции B – заряду, протекающему через гальванометр. Этот заряд пропорционален первому отбросу зайчика у гальванометра. Для получения H достаточно знать известные параметры установки:

$$H = \frac{N_{T0}}{\pi D} I,$$

где D – средний диаметр тора.

А вот для нахождения B придется калибровать гальванометр:

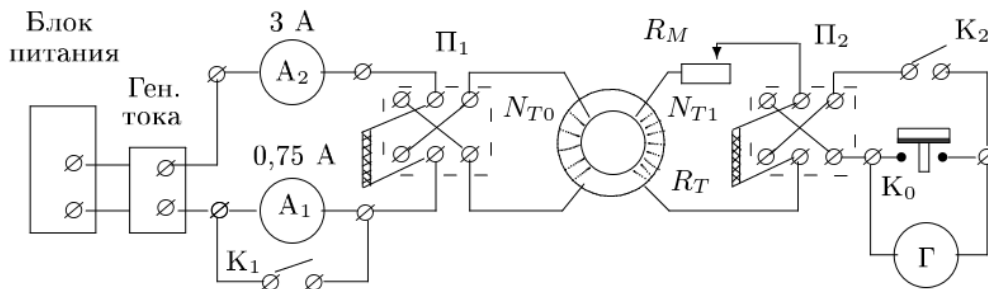


Рис. 4. Схема установки для исследования петли гистерезиса

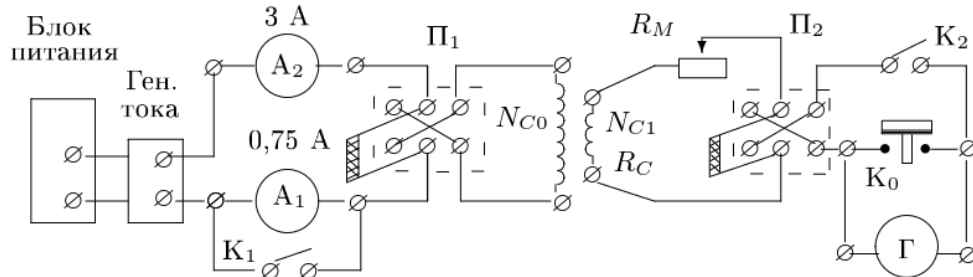


Рис. 5. Схема установки для калибровки гальванометра

Верно, что

$$\Delta B = \mu_0 \left(\frac{d_c}{d_T} \right)^2 \frac{N_{C0}}{N_{T1}} \frac{N_{C1}}{l_C} \Delta I_1 \frac{\Delta x}{\Delta x_1},$$

где R_1 и R – полные сопротивления соленоида и тороида соответственно, l_C – длина соленоида в калибровочной схеме, d_c и d_T – диаметры соленоида и тороида соответственно, Δx и Δx_1 – баллистические показатели гальванометра при измерениях и калибровке соответственно, а $\Delta I_1 = I_{max}$ – ток, подаваемый при калибровке.

Метод и результаты

Нумерация соответствует нумерации в лабнике.

1-2

Соберем установку с рис.4 и измерим максимальный ток через амперметр $I_{max} = 1462 \pm 3\text{mA}$.

3

Установим сопротивление $R_M = 90 \text{ Ом}$, так, чтобы при $R_C = 60 \text{ Ом}$, $R_M > R_C$. Выставим нулевое положение зайчика.

4-5

Пройдемся по всей петле (от I_{max} до $-I_{max}$ и обратно) и замерим значения тока I и отклонение зайчика Δx :

I, mA	$\Delta I, \text{mA}$	$\Delta x, \text{y.ед}$	I, mA	$\Delta I, \text{mA}$	$\Delta x, \text{y.ед}$
1462	3	0	-1460	3	0
515	1	-130	-515	1	137
250.2	0.5	-112	-249.9	0.5	111
157.0	0.3	-69	-156.9	0.3	88
94.69	0.19	-59	-94.66	0.19	58
66.50	0.13	-34	-66.51	0.13	34
55.81	0.11	-18	-55.82	0.11	16
44.47	0.09	-17	-44.47	0.09	16
39.15	0.08	-7	-39.19	0.08	11
28.09	0.06	-16	-28.10	0.06	16
15.36	0.03	-21	-15.37	0.03	20
0.11	0.01	-37	-0.14	0.01	37
-15.38	0.03	-55	15.38	0.03	57
-28.11	0.06	-68	28.11	0.06	70
-39.12	0.08	-162	39.15	0.08	170
-44.45	0.09	-114	44.46	0.09	122
-55.81	0.11	-190	55.81	0.11	206
-66.45	0.13	-96	66.50	0.13	100
-94.56	0.19	-174	94.63	0.19	183
-156.8	0.3	-172	156.8	0.3	187
-249.9	0.5	-118	249.8	0.5	127
-514	1	-147	514	1	161
-1458	3	-130	1458	3	144

$$\Delta(\Delta x) = 3 \text{ y.ед}$$

Погрешность I взята как $0.2\%I$, опираясь на даташит миллиамперметра.

6

Для калибровки соберем установку на рис.5, уменьшим R_M на R_C и измерим отклонение гальванометра при изменении тока на I_{max} , разомкнув П1. Получаются отклонения:

$\Delta x_1, \text{y.ед}$	80	81	80	80	81
---------------------------	----	----	----	----	----

$$\Delta(\Delta x_1) = 0.5 \text{ y.ед},$$

Что в среднем дает $\Delta x_1 = 80.4 \pm 0.7 \text{ y.ед.}$ (тут погрешность как корень суммы квадратов статистической и приборной погрешности).

7-8

Измерим кривую намагничивания, размагнитив тороид в установке ЛАТР, после чего повторим 5 пункт, меняя ток от 0 до I_{max} :

I, mA	$\Delta I, \text{mA}$	$\Delta x, \text{y.ед}$
0	0	0
15.38	0.03	23
28.11	0.06	43
39.14	0.08	102
44.45	0.09	50
55.80	0.11	94
66.47	0.13	58
94.62	0.19	128
156.8	0.3	157
249.8	0.5	126
514	1	168
1457	3	150

$$\Delta(\Delta x) = 3 \text{ y.ед}$$

9

Запишем данные установки:

$N_{T0} = 1750$, $N_{T1} = 300$, $R_C = 60 \text{ Ом}$, $l_C = 80 \text{ см}$, $d_C = 7 \text{ см}$, $N_{C1} = 435$, $N_{C0} = 825$, $D = 10 \text{ см}$, $d_T = 1 \text{ см}$.

обработка-1-3

Используя формулы пересчета, найдем H и ΔB . Проверим суммы Δx на подъеме и спуске по петле. Они равны с точностью до 6% (2071 y.ед и 1946 y.ед).

$$H = \frac{N_{T0}}{\pi D} I$$

$$\Delta B = \mu_0 \left(\frac{d_c}{d_T} \right)^2 \frac{N_{C0}}{N_{T1}} \frac{N_{C1}}{l_C} \Delta I_1 \frac{\Delta x}{\Delta x_1}$$

Относительная погрешность H равна относительной погрешности I , поскольку D нам дано без погрешности.

По аналогичным причинам относительная погрешность ΔB равна сумме относительных погрешностей ΔI , Δx_1 и Δx .

Пересчет петли:

$H, \text{А/м}$	$\Delta H, \text{А/м}$	$\Delta B, \text{Тл}$	$\Delta(\Delta B), \text{Тл}$	$H, \text{А/м}$	$\Delta H, \text{А/м}$	$\Delta B, \text{Тл}$	$\Delta(\Delta B), \text{Тл}$
8143	16	0	0	-8133	16	0	0
2867	6	-0.220	0.006	-2867	6	0.232	0.006
1393	3	-0.189	0.005	-1392	3	0.188	0.005
874.7	1.7	-0.116	0.005	-873.9	1.7	0.149	0.005
527.5	1.1	-0.099	0.004	-527.2	1.1	0.098	0.004
370.4	0.7	-0.057	0.004	-370.4	0.7	0.058	0.004
310.9	0.6	-0.030	0.004	-310.9	0.6	0.027	0.004
247.7	0.5	-0.028	0.004	-247.7	0.5	0.027	0.004
218.1	0.4	-0.011	0.004	-218.3	0.4	0.019	0.004
156.5	0.3	-0.027	0.004	-156.5	0.3	0.027	0.004
85.56	0.17	-0.035	0.004	-85.61	0.17	0.034	0.004
0.61	0.01	-0.062	0.004	-0.78	0.01	0.063	0.004
-85.67	0.17	-0.093	0.004	85.67	0.17	0.097	0.004
-156.5	0.3	-0.115	0.005	156.6	0.3	0.119	0.005
-217.9	0.4	-0.274	0.006	218.1	0.4	0.288	0.006
-247.6	0.5	-0.193	0.005	247.7	0.5	0.207	0.006
-310.8	0.6	-0.321	0.007	310.9	0.6	0.349	0.007
-370.1	0.7	-0.162	0.005	370.4	0.7	0.169	0.005
-526.7	1.1	-0.294	0.007	527.1	1.1	0.310	0.007
-873.7	1.7	-0.291	0.007	873.6	1.7	0.317	0.007
-1392	3	-0.199	0.006	1391	3	0.215	0.006
-2862	6	-0.249	0.006	2862	6	0.273	0.006
-8125	16	-0.220	0.006	8122	16	0.244	0.006

Пересчет кривой намагничивания:

$H, \text{А/м}$	$\Delta H, \text{А/м}$	$\Delta B, \text{Тл}$	$\Delta(\Delta B), \text{Тл}$
0	0	0	0
85.67	0.17	0.039	0.004
156.6	0.3	0.073	0.004
218.0	0.4	0.173	0.005
247.6	0.5	0.085	0.004
310.8	0.6	0.159	0.005
370.3	0.7	0.098	0.004
527.1	1.1	0.217	0.006
873.4	1.7	0.266	0.006
1391	3	0.214	0.006
2862	6	0.285	0.006
8117	16	0.254	0.006

Теперь посчитаем B через ΔB обычным суммированием:

$$B_{i+1} = B_i + \Delta B_{i+1}, \Delta_{\text{п}} B_{i+1} = \Delta_{\text{п}} B_i + \Delta_{\text{п}} \Delta B_{i+1},$$

где $\Delta_{\text{п}}$ – погрешность (чтобы не путать $\Delta_{\text{п}} B$ и ΔB). При этом за B_0 возьмем половину средней (по двум направлениям) высоты B петли. Она равна:

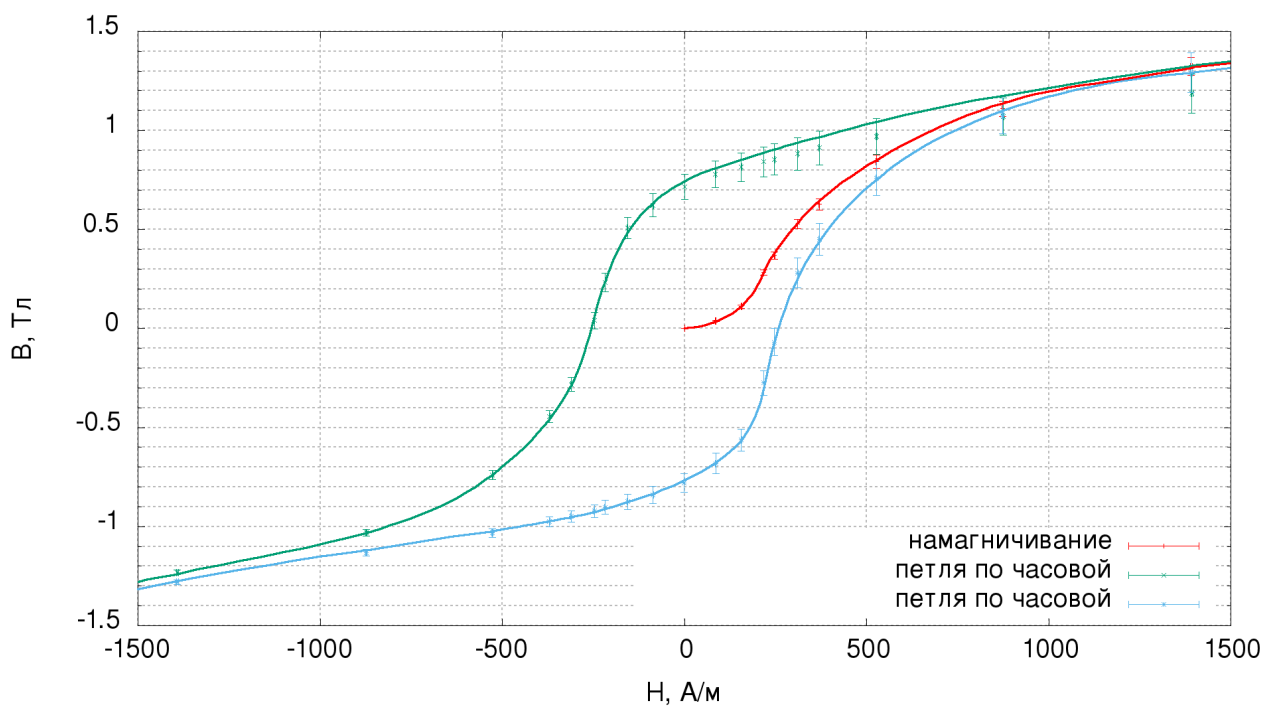
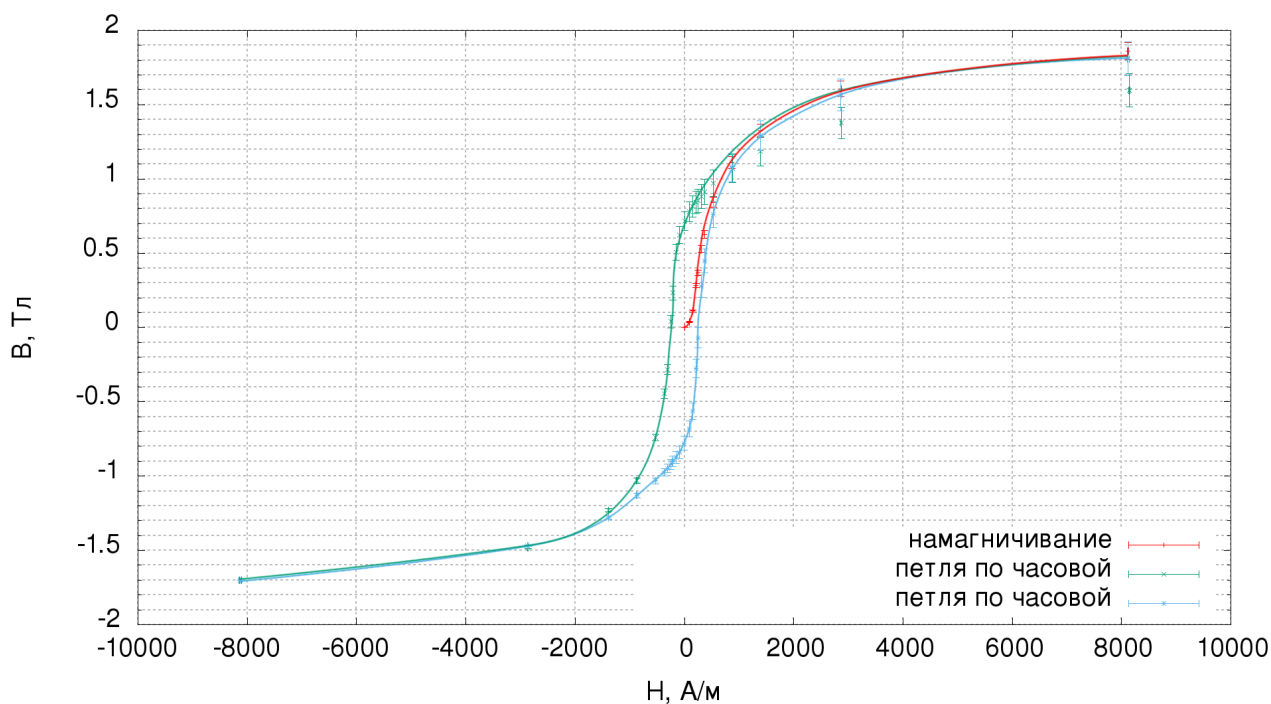
$$B_0 = -0.5 \frac{3.29 + 3.51}{2} \text{ Тл} = -1.70 \text{ Тл}.$$

Пересчет B петли:

H , А/м	ΔH , А/м	B , Тл	ΔB , Тл	H , А/м	ΔH , А/м	B , Тл	ΔB , Тл
8143	16	1.60	0.11	-8133	16	-1.7	0
2867	6	1.4	0.1	-2867	6	-1.467	0.006
1393	3	1.2	0.1	-1392	3	-1.279	0.011
874.7	1.7	1.07	0.09	-873.9	1.7	-1.130	0.016
527.5	1.1	0.97	0.09	-527.2	1.1	-1.03	0.02
370.4	0.7	0.91	0.09	-370.4	0.7	-0.97	0.02
310.9	0.6	0.88	0.08	-310.9	0.6	-0.94	0.03
247.7	0.5	0.85	0.08	-247.7	0.5	-0.92	0.03
218.1	0.4	0.84	0.07	-218.3	0.4	-0.90	0.04
156.5	0.3	0.81	0.07	-156.5	0.3	-0.87	0.04
85.56	0.17	0.78	0.07	-85.61	0.17	-0.84	0.04
0.61	0.01	0.72	0.06	-0.78	0.01	-0.77	0.05
-85.67	0.17	0.62	0.06	85.67	0.17	-0.68	0.05
-156.5	0.3	0.51	0.05	156.6	0.3	-0.56	0.06
-217.9	0.4	0.23	0.05	218.1	0.4	-0.27	0.06
-247.6	0.5	0.04	0.04	247.7	0.5	-0.06	0.07
-310.8	0.6	-0.28	0.04	310.9	0.6	0.28	0.08
-370.1	0.7	-0.44	0.03	370.4	0.7	0.45	0.08
-526.7	1.1	-0.73	0.02	527.1	1.1	0.76	0.09
-873.7	1.7	-1.030	0.017	873.6	1.7	1.08	0.09
-1392	3	-1.230	0.012	1391	3	1.3	0.1
-2862	6	-1.479	0.006	2862	6	1.57	0.11
-8125	16	-1.7	0	8122	16	1.81	0.11

Пересчет B кривой намагничивания:

H , А/м	ΔH , А/м	B , Тл	ΔB , Тл
0	0	0	0
85.67	0.17	0.039	0.004
156.6	0.3	0.073	0.008
218.0	0.4	0.173	0.013
247.6	0.5	0.085	0.018
310.8	0.6	0.16	0.02
370.3	0.7	0.10	0.03
527.1	1.1	0.22	0.03
873.4	1.7	0.27	0.04
1391	3	0.21	0.04
2862	6	0.28	0.05
8117	16	0.25	0.06



0.1 обработка-4-6

Из графиков:

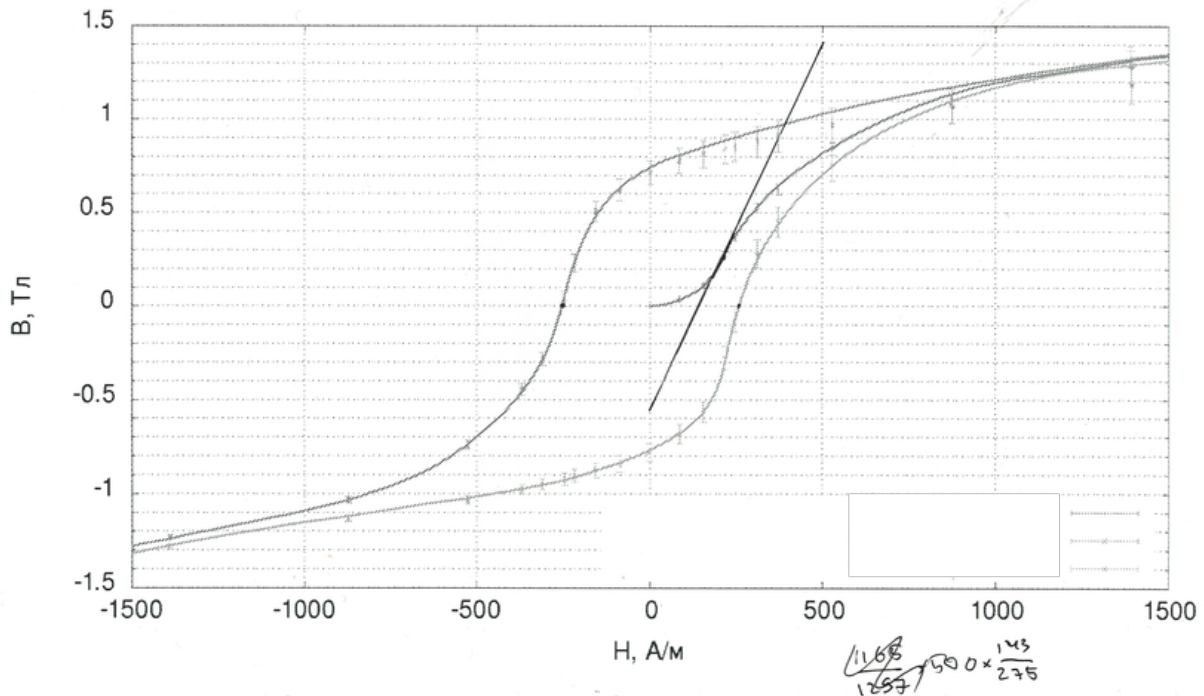
Коэрцитивная сила $H_c = 500 * \frac{143 \pm 2}{275 \pm 2} \text{ A/m} = 260 \pm 6 \text{ A/m}$. (погрешность из толщины линии)
 Индукция насыщения $B_s = (1.70 \pm 0.16) \text{ Тл}$ (погрешность как корень суммы квадратов погрешности ΔB (0.11 Тл) и половины разности между B_s для разных направлений (0.11 Тл)).

Для того, чтобы посчитать $\mu_{\text{диф}}$ я распечатал график, провел касательную и отсканировал график. Используя пропорции по пикселям я нашел :

$$\frac{dB}{dH} = \frac{1391 - 403 \pm 8}{2323 - 1856 \pm 8} \frac{3256 - 458 \pm 8}{1868 - 357 \pm 8} \frac{3 \text{ Тл}}{3000 \text{ A/m}} = (3.91 \pm 0.13) \frac{\text{мм Тл}}{\text{А}}.$$

$$\mu_{\text{диф}} = \frac{dB}{\mu_0 dH} = 3100 \pm 100$$

График для демонстрации того, что я сделал, его почти полная копия выше.



	Эксперимент	таблица
$\mu_{\text{диф}}$	3100 ± 100	5000
$B_s, \text{Тл}$	1.70 ± 0.16	2.15
$H_c \text{ А/м}$	260 ± 6	80

Вывод

Мы промерили петлю и кривую намагничивания у магнитного гистерезиса с помощью статического метода и получили значения индукции насыщения и дифференциальной магнитной проницаемости с отклонением от табличного значения менее чем на 30% и 60% соответственно, а также выяснили коэрцитивную силу менее, чем в 4 раза превышающей табличное значение. Полученные отклонения я могу объяснить уникальностью характеристик установки, из-за чего реальные параметры могут сильно отличаться от табличных.