

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3.4.4

Петля гистерезиса (статистический метод).

Автор:

Глеб Уваркин
615 группа

Преподаватель:

Андрей Александрович
Заболотных



7 октября 2017 г.

Цель работы:

Исследование кривых намагничивания ферромагнетиков с помощью баллистического гальванометра.

В работе используются:

Генератор тока с источником питания, тороид, соленоид, баллистический гальванометр с осветителем и шкалой, мультиметр-амперметр, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), разделительный трансформатор.

1 Теоретические сведения.

1.1 Предмет исследования.

К ферромагнетикам принадлежат железо, никель, кобальт, гадолиний, их многочисленные сплавы с другими металлами. К ним примыкают ферриты - диэлектрики со структурой антиферромагнетика.

Магнитная индукция \mathbf{B} и напряженность магнитного поля \mathbf{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. Здесь B_s - индукция насыщения, величина B_r , достигаемая в точке $H = 0$ при возвращении из состояния насыщения, носит название *остаточной индукции*. Значение $B = 0$ достигается лишь при некотором отрицательном значении $H = -H_c$. Величина H_c называется *коэрцитивной силой*.

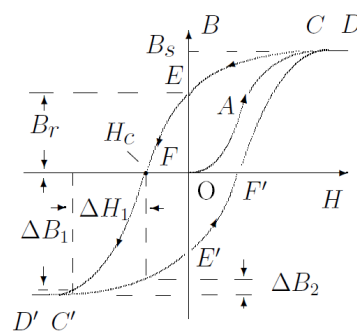


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика.

1.2 Основные формулы.

Индукция \mathbf{B} в образце состоит из индукции, связанной с намагничивающим полем \mathbf{H} , и индукции, создаваемой самим намагниченным образцом. В системе СИ эта связь имеет вид

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}), \quad (1)$$

где \mathbf{M} - намагниченность - магнитный момент единичного объема образца, а μ_0 - магнитная постоянная.

Кривая $OACD$, изображающая зависимость $B(H)$, практически совпадает с зависимостью $M(H)$, поскольку второй член в выражении (1) - в малых полях - существенно превосходит первый.

Напряженность магнитного поля H в тороиде зависит от тока, текущего в намагничивающей обмотке:

$$H = \frac{N_{T0}}{\pi D} I, \quad (2)$$

где D - средний диаметр тора.

Связь между отклонением зайчика в делениях ($\Delta x \sim \varphi$) и изменением магнитной индукции $\Delta x \sim B$ в сердечнике тороида:

$$\Delta B = \mu_0 \left(\frac{d_C}{d_T} \right)^2 \frac{R}{R_1} \frac{N_{C_0}}{N_{T_1}} \frac{N_{C_1}}{l_C} \Delta I_1 \frac{\Delta x}{\Delta x_1} \quad (3)$$

Формула (3) справедлива, если полные сопротивления измерительных цепей тороида и соленоида одинаковы: $R = R_1$.

Скорость подъёма кривой OA характеризуется дифференциальной магнитной проницаемостью

$$\mu_{\text{диф}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}. \quad (4)$$

2 Экспериментальная установка.

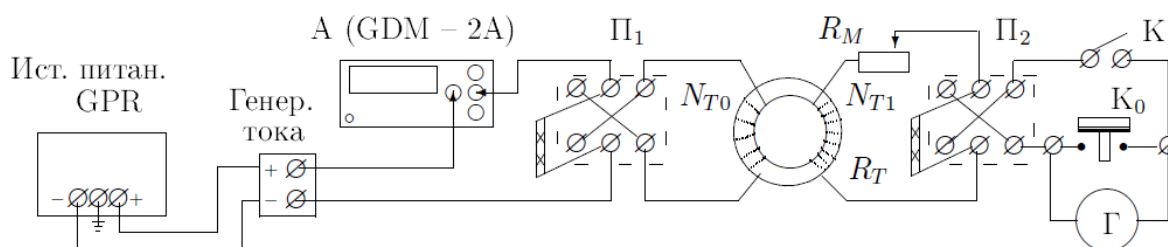


Рис. 2: Схема установки для исследования петли гистерезиса.

Схема для исследования петли гистерезиса представлена на рис. 2. К источнику постоянного напряжения (GPR) подключён специальный генератор, позволяющий скачками менять токи в намагничивающей обмотке. Одинаковые скачки $\Delta I (\sim \Delta H)$ вызовут разные отклонения зайчика гальванометра $\Delta x (\sim \Delta B)$ на разных участках петли: на рис. 1 скачок ΔH_1 может дать и ΔB_1 на участке FD' , и ΔB_2 на участке $D'E'$. Поэтому генератор меняет ток неравномерно: большими скачками вблизи насыщения и малыми вблизи нуля.

Ток в намагничивающей обмотке измеряется цифровым мультиметром А. Переключатель П1 позволяет менять направление тока в первичной обмотке.

Чувствительность гальванометра Г во вторичной цепи можно менять с помощью магазина сопротивлений R_M . Ключ К предохраняет гальванометр от перегрузок и замыкается только на время измерения отклонений зайчика. Ключ K_0 служит для мгновенной остановки зайчика (короткое замыкание гальванометра). Переключателем П2 можно изменять направление тока через гальванометр.

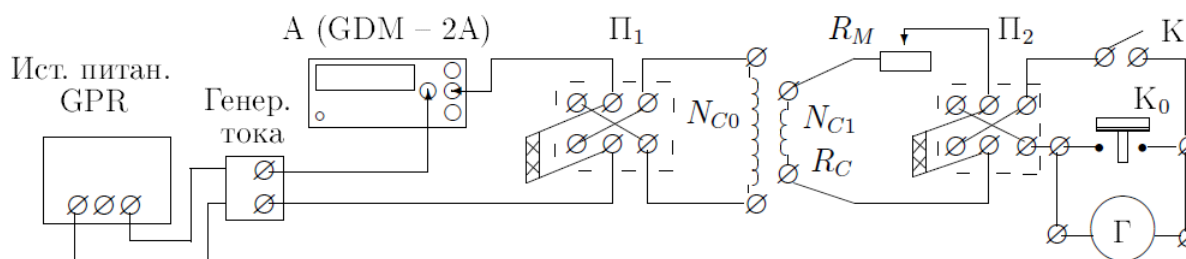


Рис. 3: Схема установки для калибровки гальванометра.

Схема на рис. 4 отличается от схемы на рис. 2 только тем, что вместо тороида подключён калибровочный соленоид.

Сопротивление измерительных цепей тороида ($R = R_T + R_M + R_0$) и соленоида ($R_1 = R_C + R'_M + R_0$) должны быть одинаковыми.

Сопротивление тороида $R_T \ll R_0$ - сопротивления гальванометра, поэтому сопротивления магазина в схеме с тороидом и соленоидом отличаются на величину сопротивления соленоида $R_C : R'_M = R_M - R_C$

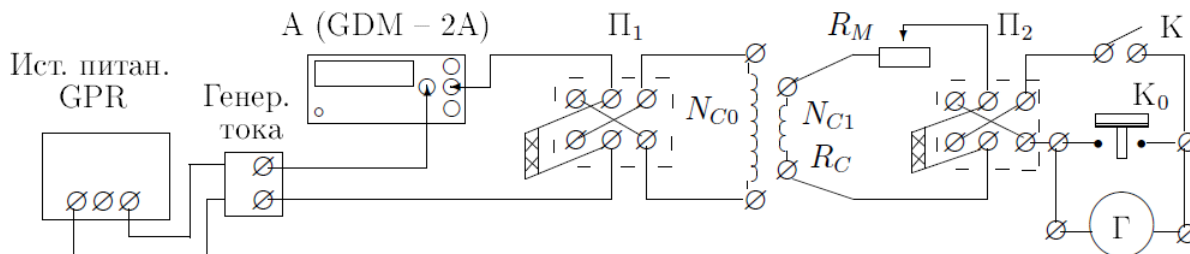


Рис. 4: Схема установки для калибровки гальванометра.

Чтобы снять начальную кривую намагничивания, нужно размагнитить сердечник. Для этого тороид подключается к цепи переменного тока (рис. 5). При уменьшении амплитуды тока через намагничивающую обмотку от тока насыщения до нуля характеристики сердечника **В** и **Н** «пробегают» за секунду 50 петель всё меньшей площади и в итоге приходят в нулевую точку.

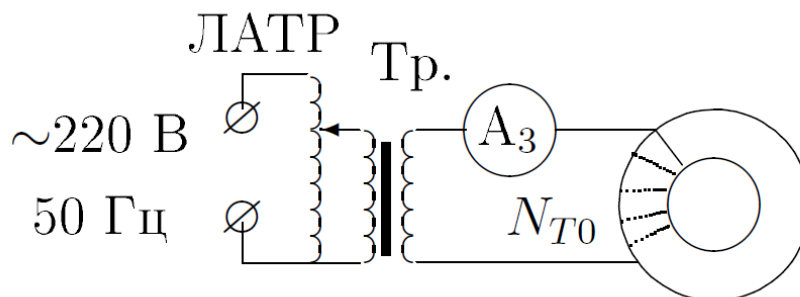


Рис. 5: Схема установки для размагничивания образца.

Запишем параметры установки:

$N_{T1} = 300$	$R_C = 60 \text{ Ом}$	$R_0 = 50 \text{ Ом}$
$N_{T0} = 1750$	$N_{C1} = 435$	$R_M = 75 \text{ Ом}$
$d_T = 1 \text{ см}$	$N_{C0} = 825$	$I_{max} = 1.472 \text{ А}$
$\Delta x_1 = 9.5 \text{ см}$	$l_C = 80 \text{ см}$	$R'_M = 15 \text{ Ом}$
$D = 10 \text{ см}$	$d_C = 7 \text{ см}$	

3 Обработка результатов.

Таблица 1: Петля гистерезиса(полученные значения).

I , мА	1467	537	244.6	147.5	96.9	65.6	50.1	40.6	34.7
Δx , см	12.6	12.9	9.2	6.9	5.4	3.1	2.1	1.3	0.7
I , мА	31.7	27.9	24.2	1.1	0	1.1	24.3	27.9	31.7
Δx , см	0.9	0.9	7.5	0.3	0.4	13	3	4.3	4.6
I , мА	34.7	40.7	50.2	65.6	96.9	147.4	244.4	537.3	1468
Δx , см	13	23.6	22.8	23.7	18.2	17	21.4	16.7	12.3
I , мА	538	244.6	147.3	96.9	65.5	50	40.6	34.6	31.6
Δx , см	12.5	9.1	6.7	5.4	3	2	1.3	0.7	0.9
I , мА	27.8	24.2	1	0.2	1	24.1	27.8	31.6	34.6
Δx , см	0.9	7.3	0.3	0.4	12.4	2.9	4	4.4	14.4
I , мА	40.7	50.2	65.6	96.9	147.5	244.5	538		
Δx , см	23.5	22.4	23.1	17.5	16.6	20.3	16.2		

Таблица 2: Начальная кривая намагничивания(полученные значения).

I , мА	0	0.77	23.8	27.5	31.3	34.3	40.3
Δx , см	0.1	4.6	1.4	1.8	1.7	4.1	6.9
I , мА	49.8	65.2	96.5	147.2	244.3	537	
Δx , см	9.7	14.4	14.6	16.2	21	14.6	

С помощью таблиц 1 и 2, а также формул (2) и (3) построим петлю гистерезиса $B = f(H)$. Ось $H(I)$ проведём через середину петли. На том же графике построим начальную кривую намагничивания (см. рис (6)).

Таблица 3: Зависимость $B(H)$ для петли гистерезиса.

H , А/м	8175	2992	1363	822	540	365	279	226	193
B , Тл	1.73	1.55	1.37	1.24	1.14	1.06	1.02	0.99	0.97
H , А/м	177	155	135	6	0	-6	-135	-155	-177
B , Тл	0.96	0.95	0.93	0.83	0.82	0.82	0.63	0.59	0.53
H , А/м	-193	-227	-280	-366	-540	-822	-1362	-2995	-8182
B , Тл	0.46	0.28	-0.06	-0.39	-0.72	-0.98	-1.23	-1.53	-1.77
H , А/м	-2998	-1363	-821	-540	-365	-279	-226	-193	-176
B , Тл	-1.59	-1.41	-1.29	-1.19	-1.11	-1.07	-1.04	-1.02	-1.01
H , А/м	-154	-135	-6	0	6	134	155	176	193
B , Тл	-1.00	0.99	-0.88	-0.88	-0.87	-0.70	-0.65	-0.60	-0.53
H , А/м	227	280	366	540	822	1363	2998	8187	
B , Тл	-0.33	0.01	0.33	0.65	0.90	1.14	1.43	1.66	

Таблица 4: Зависимость $B(H)$ для начальной кривой намагничивания.

H , А/м	0	4.3	132.6	153.3	174.4	191	224.6	277.5
B , Тл	0	0.001	0.067	0.087	0.113	0.137	0.195	0.294
H , А/м	363.4	537.8	820.4	1361.5	2992.8	8192.7		
B , Тл	0.432	0.638	0.846	1.077	1.377	1.585		

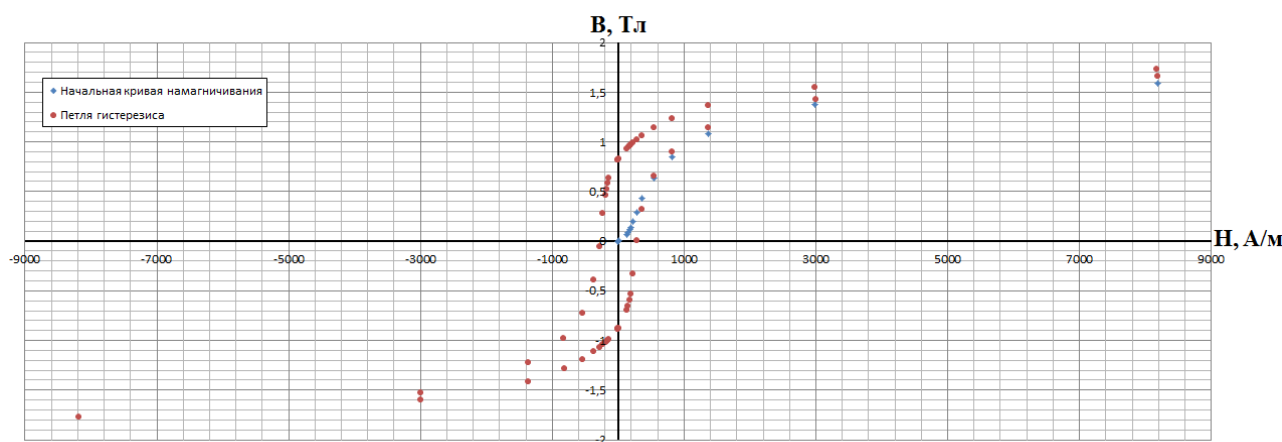


Рис. 6: Петля гистерезиса и начальная кривая намагничивания ферромагнетика(эксперимент).

Определим по графику коэрцитивную силу H_c и индукцию насыщения B_s , а также максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}$. Полученные значения занесём в таблицу 5.

Таблица 5: Итоговые значения.

	Эксперим.	Табличн.
H_c , А/м	270 ± 130	140
B_s , Тл	1.733 ± 0.400	2.12
$\mu_{\text{диф}}$	1479.5 ± 521	2000

4 Вывод.

Было исследовано явление гистерезиса на примере образца стали. Полученная петля очень близка к теоретической. Были оценены значения коэрцитивной силы H_c , индукции насыщения B_s и максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}$.

Погрешность получилась достаточно большой ($\varepsilon_{H_c} \approx 50\%$, $\varepsilon_{B_s} \approx 23\%$, $\varepsilon_{\mu_{\text{диф}}} \approx 35\%$). Это можно объяснить несовершенством метода измерений - достаточно сложно уловить отклонения "зайчика" с большой точностью, а в окрестности $H = 0$ отклонения составляли всего лишь доли сантиметра. Также сюда можно приписать устаревшее оборудование и влияние внешних электронных устройств.