

Лабораторная работа № 3.4.5
Петля гистерезиса(динамический метод)

Илья Прамский

Ноябрь 2023

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

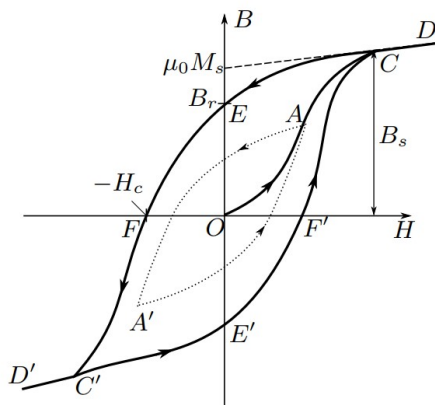


Рис. 1 — Петля гистерезиса ферромагнетика

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 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 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} — *намагниченность* — 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 $DEFD'E'F'D$, возникающая при циклическом перемагничивании образца, намагниченного до насыщения, называется *предельной петлей гистерезиса*.

1.1 Измерение магнитной индукции в образцах.

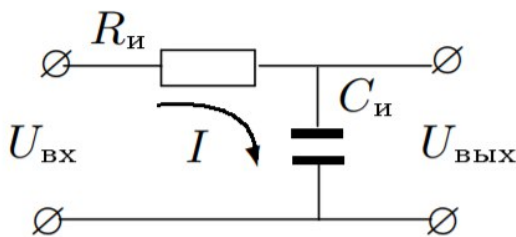
Магнитную индукцию удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при изменении магнитного потока Φ в катушке, намотанной на образец:

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

Тогда отсюда и из формулы $\Phi = BSN$ получаем:

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

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



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

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

Рис. 2 — Интегрирующая RC-цепь

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

$$U = \frac{U_вх}{RC\Omega},$$

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 N0 измеряется амперметром А (мультиметром GDM). Последовательно с амперметром включено сопротивление R_0 , напряжение с которого подается на вход Х 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 (U_{BX}), 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).

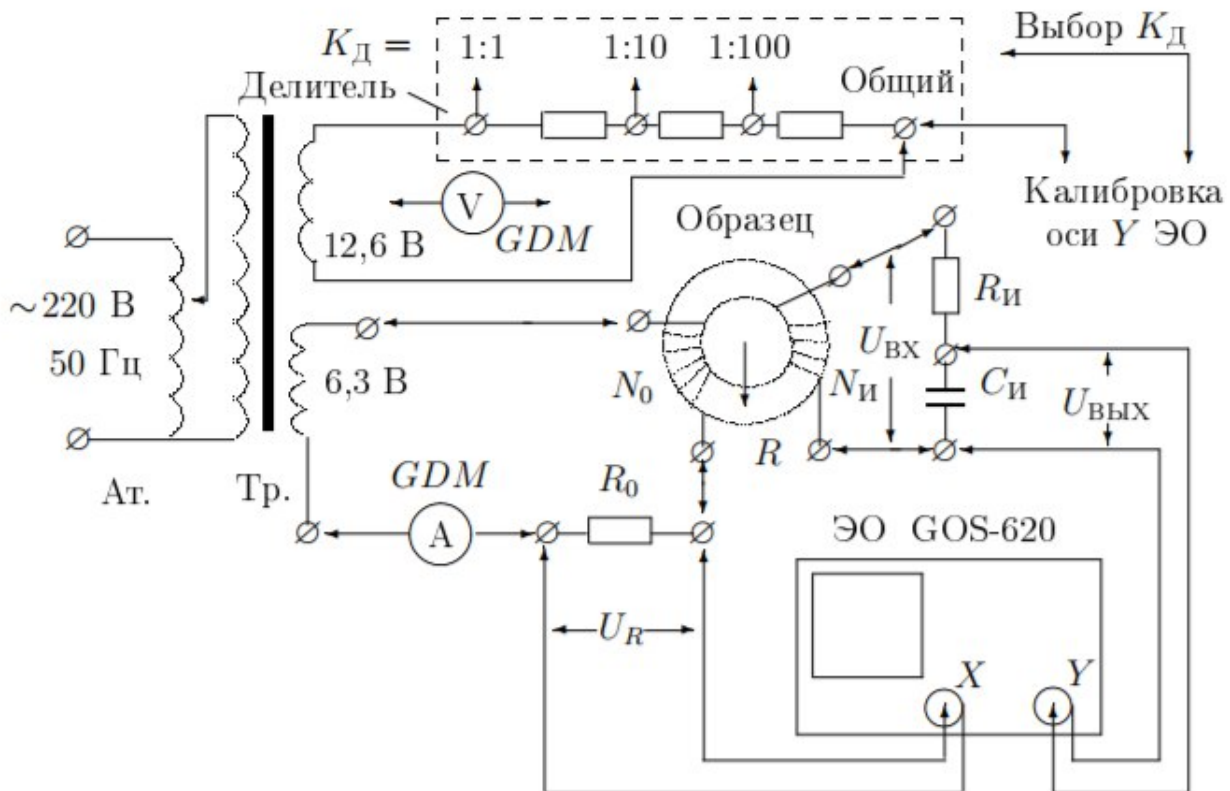


Рис. 3 — Схема установки для исследования намагничивания образцов

3 Ход работы

Данные нашей установки: $R_0 = 0,3 \text{ Ом}$, $R_{и} = 20 \text{ кОм}$, $C_{и} = 20 \text{ мкФ}$.

Теперь также выпишем данные каждой из обмоток:

Пермаллой(Fe-Ni НП50) $N_0 = 35$ витков, $N_{и} = 220$ витков, $S = 3,8 \text{ см}^2$, $2\pi R = 24 \text{ см}$;

Феррит 1000нн $N_0 = 35$ витков, $N_{и} = 400$ витков, $S = 3 \text{ см}^2$, $2\pi R = 25 \text{ см}$;

Кремнистое железо(Fe-Si) $N_0 = 35$ витков, $N_{и} = 350$ витков, $S = 1,2 \text{ см}^2$, $2\pi R = 10 \text{ см}$;

Теперь добьемся появления предельной петли гистерезиса и запишем чувствительность по оси x и по оси y у осциллографа.

Пермаллой $K_x = 20\text{мВ/дел}$, $K_y = 50\text{ мВ/дел}$;

Феррит $K_x = 20\text{мВ/дел}$, $K_y = 20\text{ мВ/дел}$;

Кремнистое железо $K_x = 50\text{мВ/дел}$, $K_y = 50\text{ мВ/дел}$;

Зная чувствительность для каждого из торойдов, найдем коэффициенты преобразования по осям электронного осциллографа в напряженность H и индукцию B .

$$H = \frac{I \cdot N_0}{2 \cdot \pi \cdot R}$$

Где $I = \frac{K_x}{R_0}$.

$$B = \frac{R_{\text{и}} \cdot C_{\text{и}}}{S \cdot N_{\text{и}}} \cdot U_{\text{вых}}$$

Где $U_{\text{вых}} = K_y$.

Получается

Пермаллой $H = 9,72\text{ Тл/дел}$, $B = 0,24\text{ Тл/дел}$;

Феррит $H = 9,3\text{Тл/дел}$, $B = 0,06\text{ Тл/дел}$;

Кремнистое железо $H = 58,3\text{Тл/дел}$, $B = 0,47\text{ Тл/дел}$.

Теперь, зная коэффициенты преобразования, найдем максимальные значения B и H у предельной петли для каждого из образцов. Полученные результаты занесём в таблицу.

Также найдем значения коэрцитивного поля H_c и остаточной индукции B_r . Их тоже занесем в таблицу.

Дальше, проследив за движением крайней точки у гистерезиса, изобразим начальные кривые намагничивания $B(H)$ для каждого из образцов. По этим графикам оценим начальное и максимальное значения магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}$. Результаты занесем в таблицу.

Пермаллой				Феррит				Кремнистое железо			
x	y	H, Тл	B, Тл	x	y	H, Тл	B, Тл	x	y	H, Тл	B, Тл
2,8	3,55	27,216	0,852	2	1,7	18,6	0,102	2,75	2,25	160,325	1,0575
2,5	3,4	24,3	0,816	1,5	1,5	13,95	0,09	2,4	2,2	139,92	1,034
2,2	2,7	21,384	0,648	1	1,2	9,3	0,072	2,2	2,1	128,26	0,987
2	2,3	19,44	0,552	0,8	0,9	7,44	0,054	2,1	2	122,43	0,94
1,9	1,6	18,468	0,384	0,6	0,57	5,58	0,0342	1,55	1,6	90,365	0,752
1,78	1,15	17,3016	0,276	0,58	0,45	5,394	0,027	1,1	1,1	64,13	0,517
1,6	0,63	15,552	0,1512	0,5	0,3	4,65	0,018	0,8	0,8	46,64	0,376
1,5	0,5	14,58	0,12	-0,4	-0,4	-3,72	-0,024	0,6	0,58	34,98	0,2726
1,4	0,37	13,608	0,0888	-0,8	-0,87	-7,44	-0,0522	0,3	0,1	17,49	0,047
1	0,2	9,72	0,048	-1	-1,1	-9,3	-0,066	-0,6	-0,5	-34,98	-0,235
-1	-0,1	-9,72	-0,024	-1,6	-1,7	-14,88	-0,102	-0,9	-1	-52,47	-0,47
-1,3	-0,4	-12,636	-0,096	-2	-1,75	-18,6	-0,105	-1,2	-1,3	-69,96	-0,611
-1,5	-0,8	-14,58	-0,192					-1,5	-1,6	-87,45	-0,752
-1,7	-1,6	-16,524	-0,384					-2,1	-2,1	-122,43	-0,987
-1,9	-2,2	-18,468	-0,528					-2,6	-2,4	-151,58	-1,128
-2	-2,6	-19,44	-0,624					-2,8	-2,5	-163,24	-1,175
-2,4	-3,15	-23,328	-0,756								

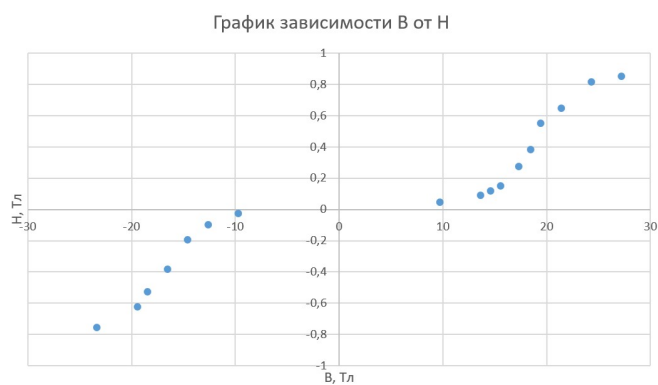


Рис. 4 — Пермаллой

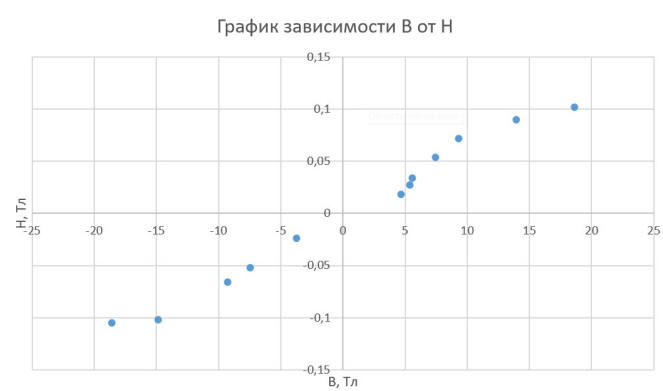


Рис. 5 — Феррит

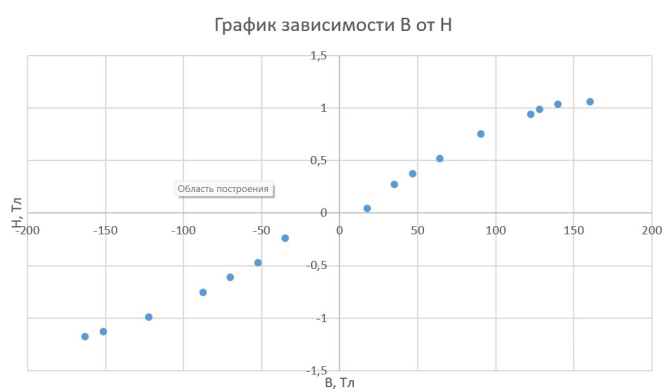


Рис. 6 — Кремнистое железо

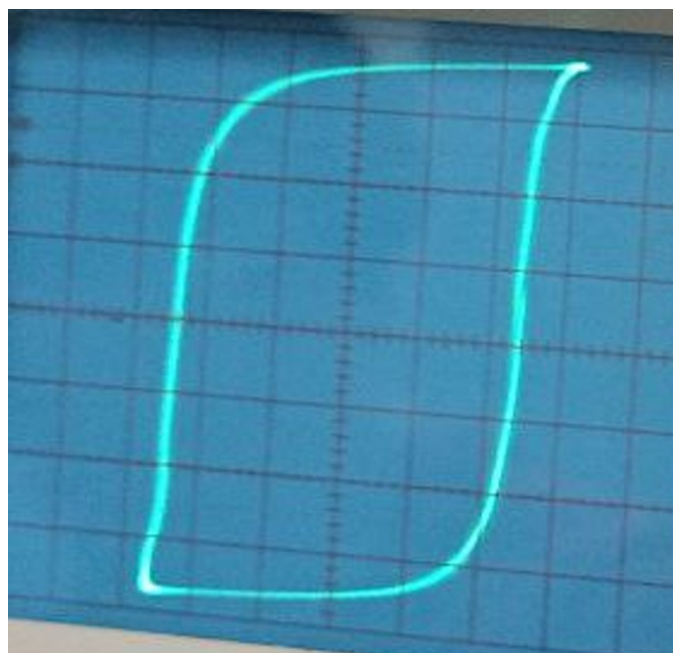


Рис. 7 — Пермаллой

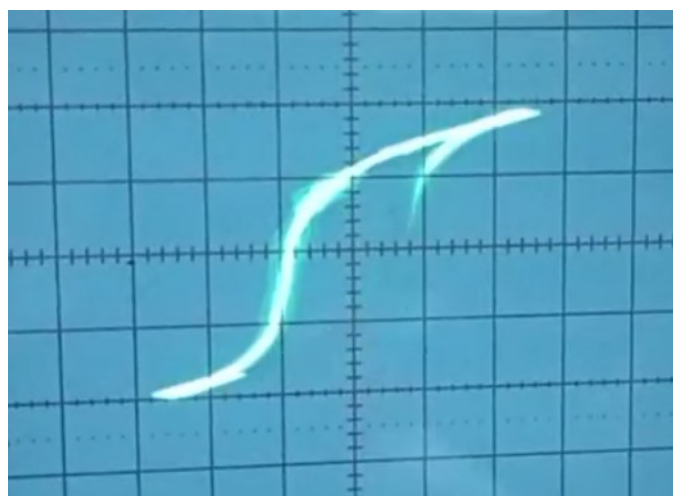


Рис. 8 — Феррит(график был нестабильным, из-за чего не удавалось получить на фото полный гистерезис)

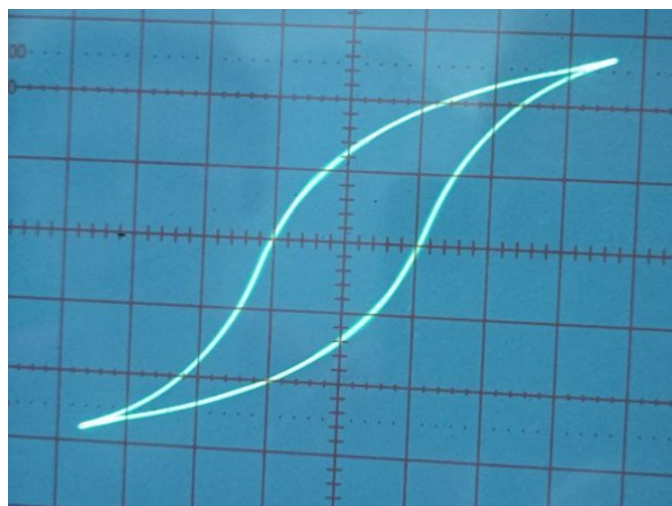


Рис. 9 — Кремнистое железо

Итоговая таблица

	Hmax, Тл	Bmax, Тл	Hс, Тл	Bс, Тл	$\mu_{нач}$	μ_{max}
Пермаллой	28,188	0,888	22,356	0,864	0,005	0,17
Феррит	18,6	0,108	7,44	0,06	0,004	0,01
Кремнистое железо	198,22	1,222	58,3	0,611	0,003	0,008

4 Вывод

В ходе работы были изучены петли гистерезиса различных торойдных образцов при помощи электронного осциллографа. При калибровке осциллографа также было получено, что его чувствительность достаточно точная (различие 10^{-3} порядка). С помощью изменения поданного питания, была получена начальная кривая намагничивания. При помощи её, а также предельной картины гистерезиса были оценены параметры торойдов, многие из которых порядка справочных (μ сильно отличается от справочного значения. Связано это с тем, что при помощи отснятого процесса движения краевой точки, очень затруднительно фиксировать ее координаты каждый отрезок времени, из-за чего кривая намагничивания получилась неточной).