

Отчет о выполнении лабораторной работы 3.4.4

Петля гистерезиса (статический метод)

Г. А. Багров

ФРКТ МФТИ, 15.10.2022

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

В работе используются: генератор токов намагничивания (ГТН), тороид, соленоид, баллистический гальванометр с осветителем и шкалой, мультиметр-амперметр, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), разделительный трансформатор, ключи, переключатели.

Теоретические сведения:

Ферромагнетики – вещества, которые при определенной температуре обладают самопроизвольной намагниченностью \mathbf{M} в отсутствие внешнего магнитного поля. В ферромагнетиках образуются отдельные намагниченные области – домены (от 10^{-2} до 10^{-6} см³), магнитные моменты в которых ориентируются параллельно.

Зависимость вектора магнитной индукции \mathbf{B} ферромагнетика от вектора напряжённости магнитного поля \mathbf{H} нелинейна. В системе СИ эта связь имеет вид

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

При этом намагниченность зависит не только от состояния вещества, а также от его предыдущих состояний, то есть зависимость $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ не является функцией состояния. График этой зависимости изображён на рис. 1.

Измерить эту зависимость можно следующим способом: На тороидальный сердечник (рис. 2), изготовленный из исследуемого образца, равномерно намотана намагничивающая обмотка с числом витков N , а поверх неё — измерительная обмотка с числом витков N' . При скачкообразном изменении тока в намагничивающей обмотке в измерительной обмотке возникает ЭДС индукции. Ток, вызванный этой ЭДС, регистрируется гальванометром Г, работающим в баллистическом (импульсном) режиме: его отклонение пропорционально полному заряду Δq , протекшему через него.

Напряжённость поля H в сердечнике пропорциональна току I в первичной (намагничивающей) обмотке, а изменение магнитной индукции ΔB — заряду Δq , протекшему через вторичную (измерительную) обмотку. Таким образом, измеряя токи ΔI и суммируя отклонения Δq гальванометра Г, можно получить зависимость $B(H)$ для материала сердечника.

Напряжённость магнитного поля в тороиде равна

$$H = \frac{N}{\pi D} I \quad (2)$$

Гальванометр измеряет протёкший через него заряд баллистическим методом, то есть

$$\Delta x = \frac{\Delta q}{b} \quad (3)$$

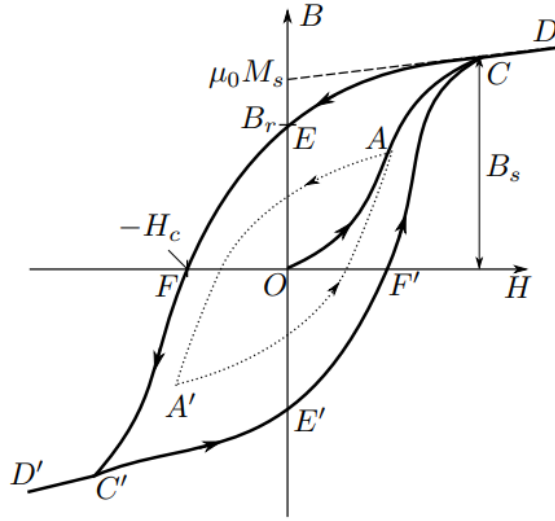


Рис. 1. Петля гистерезиса ферромагнетика

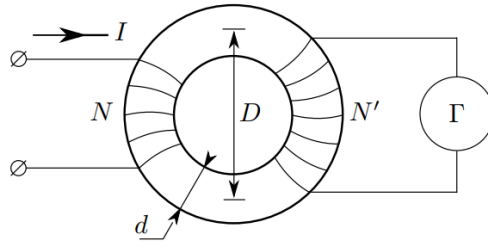


Рис. 2. Схема для измерения индукционного тока

Учитывая, что заряд возникает из-за тока электромагнитной индукции, получим

$$\Delta x = \frac{S_t N'}{b R_t} \Delta B \quad (4)$$

Здесь R_t – полное сопротивление измерительной цепи тороида, S_t – площадь поперечного сечения тороида.

Баллистическую постоянную b можно определить с помощью следующей схемы (рис. 3): вместо тороида возьмём соленоид, и, воспользовавшись той же формулой, получим

$$\Delta x = \frac{S_c N'_c}{b R_c} \Delta B_c = \frac{\mu_0 S_c N'_c N_c}{b R_c l_c} \Delta I_c \quad (5)$$

Таким образом, можно исключить калибровочную постоянную b , учитывая, что в исследуемой схеме будет подобраны сопротивления схем с тороидом и соленоидом были равны.

$$\Delta B = \mu_0 \left(\frac{d_c}{d_t} \right)^2 \frac{N'_c}{N'} \frac{N_c}{l_c} \Delta I_c \frac{\Delta x}{\Delta x_c} \quad (6)$$

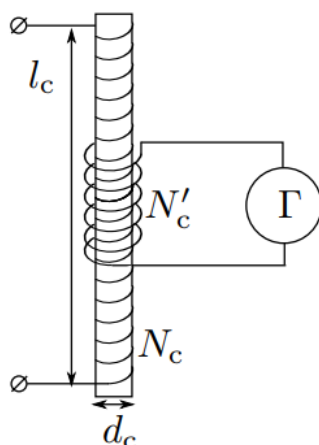


Рис. 3. Схема для калибровки гальванометра

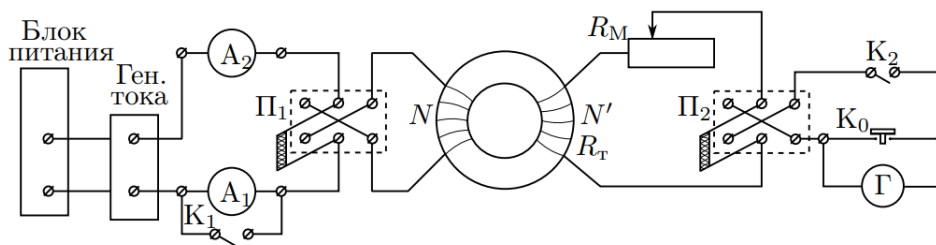


Рис. 4. Схема установки для исследования петли гистерезиса

Схема для исследования петли гистерезиса представлена на рис. 4.

Здесь R_m – сопротивление нагрузки для контроля амплитуды отклонения луча (работа гальванометра реализована через лампу, чтобы можно было исследовать отклонение луча, зависящего от пройденного заряда).

Для калибровочной постоянной нужно собрать такую же схему, где вместо тороида следует поместить соленоид.

Ход работы и обработка результатов

1) Соберем установку по схеме рис.3 и подготовим её к работе. Зафиксируем константы установки: $N_t = 1750$, $N' = 300$, $R_0 = 5,6$ Ом (сопротивление гальванометра).

Собрав схему и настроив гальванометр, обойдём всю кривую гистерезиса, исследуя, какое значение сопротивления R_m нужно подобрать, чтобы отклонение луча не заходило за пределы измерительной шкалы. Получим $R_m = 220$ Ом.

2) Предельная петля гистерезиса

Начнём измерять предельную петлю гистерезиса с максимального тока (тока насыщения), равного $I_0 = 1,7 \pm 0,02$ А.

Результаты измерений зависимости $\Delta B(I)$ находятся в конце работы, см. рис. 7.

3) Калибровка гальванометра

Подсоединив соленоид вместо тороида найдём значения $\Delta I_c = 1,71 \pm 0,02$ А и $x_c = 13,5 \pm 0,2$ см. Здесь учтена погрешность измерения отклонения луча, в которую входит погрешность определения нулевой точки

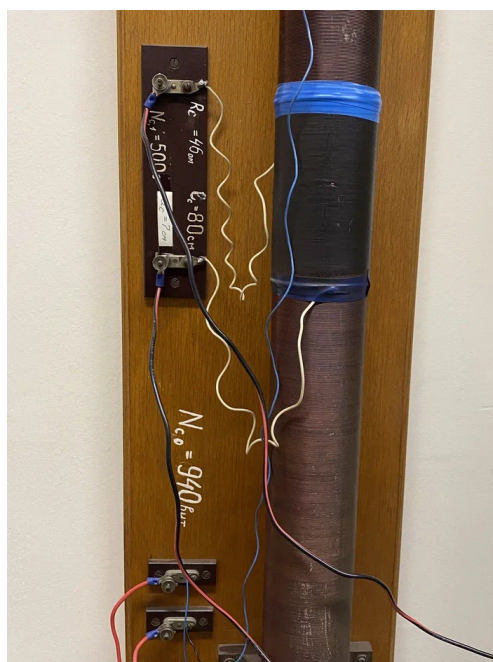


Рис. 5. Соленоид

луча и точки измерения.

Характеристика соленоида: $N'_c = 500$, $N_c = 940$, $R_c = 46$ Ом, $l_c = 0,8$ м, $d_c = 0,07$ м.

4) Начальная кривая намагничивания

Теперь с помощью генератора переменного тока, уменьшая амплитуду тока до нуля, вернём тороид в начальное состояние (0,0) в зависимости $H(B)$, иначе говоря, размагнитим.

Теперь проведём такие же измерения, как и для предельной петли, дойдя до тока насыщения. Результаты измерений см. рис. 8

5) Обработка данных

Для начала, учитывая зависимость напряжённости магнитного поля и силы тока намагничивающей обмотки, переведём все значения сил тока в напряжённость (с учётом знаков напряжённости):

$$H = \frac{N_t}{\pi D} I \quad (7)$$

Средний диаметр тороида равен $D = 0,1$ м, откуда находим H .

Теперь, используя формулу ниже, переведём значения Δx в значения ΔB как для предельной петли, так и для начальной кривой.

$$\Delta B = \mu_0 \left(\frac{d_c}{d_t} \right)^2 \frac{N'_c N_c}{N' l_c} \Delta I_c \frac{\Delta x}{\Delta x_c} \quad (8)$$

Здесь $d_t = 0,01$ м.

Сложив изменения индукции для начальной кривой на каждом шаге, получим максимальное значение индукции $B_{max} = 1,35 \pm 0,04$, используя которое, при помощи значений ΔB можно найти все остальные значения индукции.

7) Построим по всем точкам петлю гистерезиса (см рис. 5).

8) Из графика оценим коэрцитивную силу исследуемой стали: $H_c = 1540 \pm 20$ А/м.

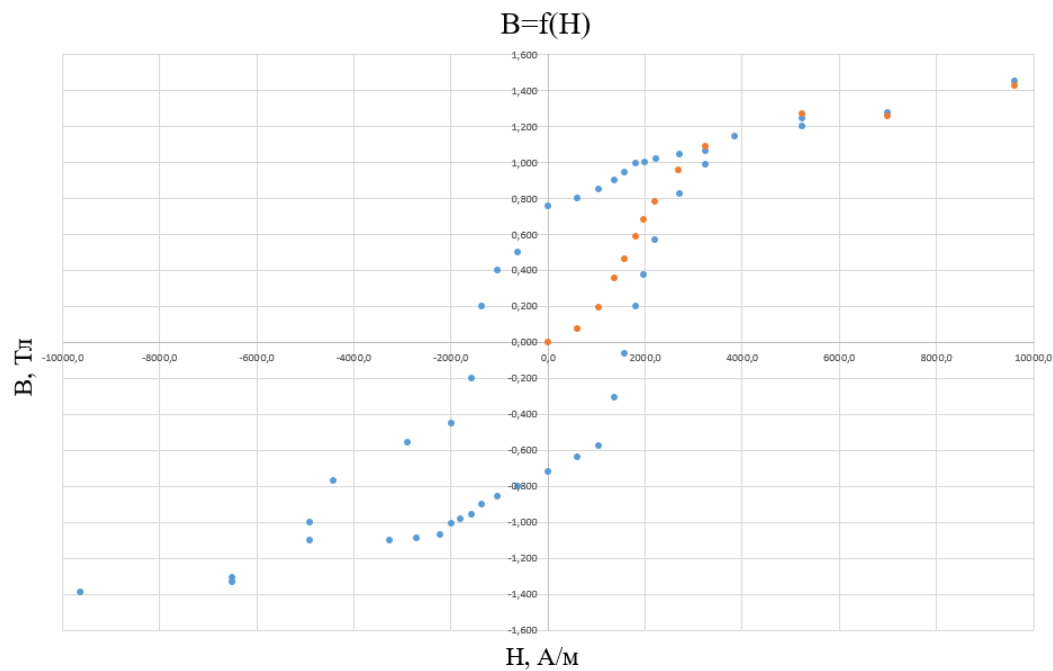


Рис. 6. Экспериментальная петля гистерезиса

Также найдём индукцию насыщения $B_s = 1,41 \pm 0,05$ Тл.

По наклону графика определим значение максимальной дифференциальной магнитной проницаемости $\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} = 525 \pm 21$.

Заметим, что значения по порядку сходятся со справочными $\mu = 1100$ (случай чистой мягкой стали) и $H_c = 1540 \pm 20$ А/м (случай углеродистой стали).

Выводы

В ходе работы было показано, что зависимость $B(H)$ является петлёй гистерезиса, что соответствует ферромагнитной теории. Были оценены и найдены значения коэрцитивной силы, индукции насыщения и дифференциальной магнитной проницаемости.

I. Предельная петля гистерезиса							
I, мА	Δx , мм	H, А/м	B, Тл	I, мА	Δx , мм	H, А/м	B, Тл
941	62	5244	1,359	-940	60	-5239	-1,363
584	46	3255	1,616	-584	45	-3255	-1,185
487	16	2714	1,371	-487	15	-2714	-1,126
398	15	2218	1,189	-398	14	-2218	-1,071
355	7	1979	1,126	-355	7	-1979	-1,043
324	5	1806	1,067	-324	5	-1806	-1,023
283	6	1577	1,039	-283	6	-1577	-0,999
245	6	1365	1,019	-246	6	-1371	-0,976
186	9	1037	0,995	-186	8	-1037	-0,944
110	10	613	0,972	-110	9	-613	-0,909
0	12	0	0,936	0	12	0	-0,861
-110	26	-613	0,75	110	25	613	-0,762
-186	50	-1037	0,549	186	47	1037	-0,577
-245	68	-1365	0,280	246	68	1371	-0,308
-283	62	-1577	0,036	283	62	1577	-0,063
-324	72	-1806	-0,249	324	67	1806	0,201
-354	44	-1973	-0,423	354	44	1973	0,375
-397	50	-2213	-0,620	397	49	2213	0,569
-487	65	-2714	-0,877	485	65	2703	0,826
-583	41	-3249	-1,039	584	41	3255	0,988
-939	76	-5233	-1,339	940	73	5239	1,276
-1726	66	-9619	-1,600	1727	63	9625	1,525

Рис. 7. Измерения предельной кривой гистерезиса

III. Начальная кривая намагничивания			
I, мА	Δx , мм	H, А/м	B, Тл
		0	0
186	29	613	0,075
245	41	1036	0,19
283	28	1365	0,352
324	32	1576	0,462
354	23	1805	0,589
397	26	1972	0,679
485	43	2211	0,782
583	34	2702	0,952
939	69	3248	1,086
1726	65	5231	1,266
1726	65	9620	1,426

Рис. 8. Измерения начальной кривой намагничивания