

Лабораторная работа № 3.4.4
Петля гистерезиса (статический метод)

Струков О. И.
Б04-404

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.

Теоретическая часть

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

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

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

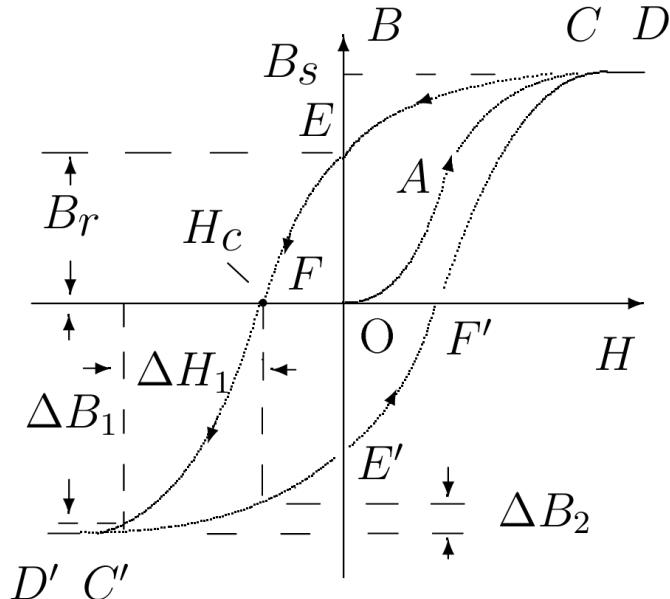


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

Измерение зависимости $B(H)$: На тороидальный сердечник (рис. 2), изготовленный из исследуемого образца, равномерно намотана намагничающая обмотка с числом витков N , а поверх неё — измерительная обмотка с числом витков N' . При скачкообразном изменении тока в намагничающей обмотке в измерительной обмотке возникает ЭДС индукции. Ток, вызванный этой ЭДС, регистрируется гальванометром Γ , работающим в баллистическом (импульсном) режиме: его отклонение пропорционально полному заряду Δq , протекшему через него.

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

Напряжённость магнитного поля в тороиде равна

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

Гальванометр измеряет протекший через него заряд баллистическим методом, то есть

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

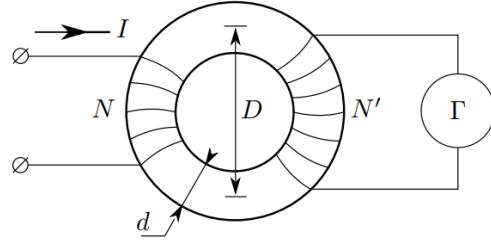


Рис. 2: Схема для измерения индукционного тока

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

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

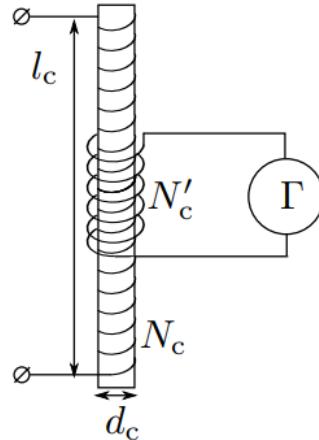


Рис. 3: Схема для калибровки гальванометра

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

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

Схема для исследования петли гистерезиса представлена на рис. 4.

Чтобы получить начальную кривую намагничивания, необходимо размагнитить сердечник путём подключения к цепи переменного тока и постепенного уменьшения его амплитуды.

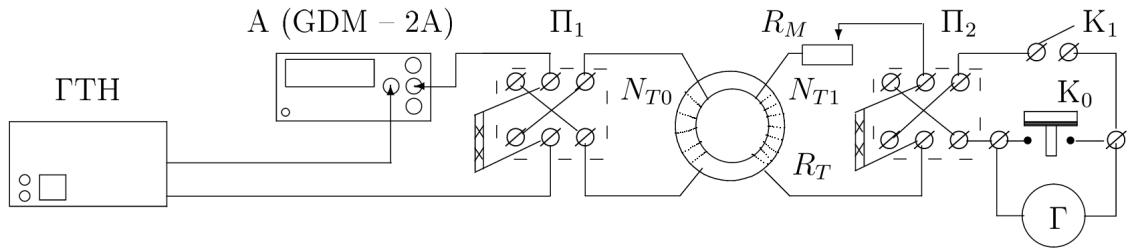


Рис. 4: Схема установки для исследования петли гистерезиса

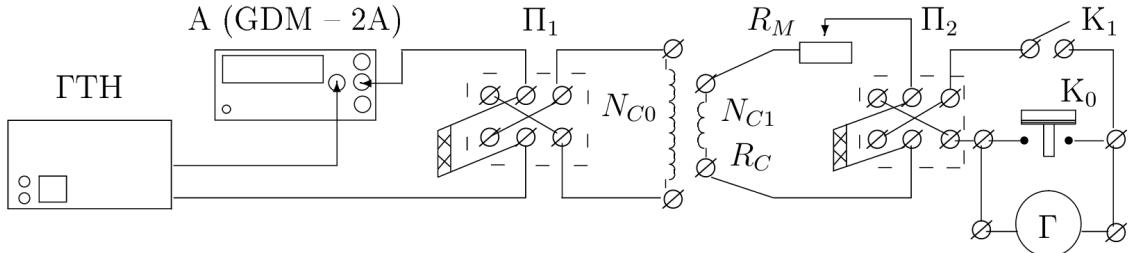


Рис. 5: Схема установки с соленоидом вместо тороида

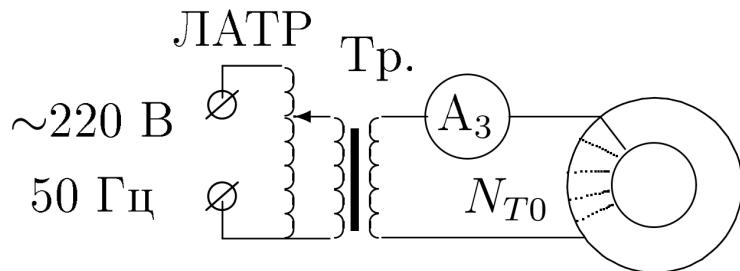


Рис. 6: Схема установки для размагничивания образца

Ход работы

- Для подготовки к работе была собрана схема с тороидом, проверена её работоспособность, установлено начальное значение $R_M = 300$ Ом, превышающее сопротивление соленоида, включён осветитель гальванометра. Установлено, что при любых изменениях силы тока зайчик не выходит за пределы шкалы.

Характеристики исследуемого образца

Материал	N_{T0}	N_{T1}	D, м	d_t , м
Железо	1750	300	0,1	0,01

- Было сделано четыре серии измерений зависимости отклонения зайчика при изменении силы тока. По формулам (2) и (6) найдены значения ΔB и H , исследуемых в эксперименте. Часть результатов представлена в таблицах:
- Образец размагничили, подключив к цепи переменного тока и постепенно уменьшив его амплитуду до нуля. Затем аналогичным способом получили зависимость $\Delta B(H)$ для начальной кривой намагничивания. Результаты представлены в таблице:
- Для построения петли гистерезиса были просуммированы все скачки ΔB и получена зависимость $B(H)$. В результате была собрана полная петля, и аналогичным образом на график была добавлена Начальная кривая намагничивания:

Характеристики соленоида

R_C , Ом	l_C , м	d_C , м	N_{C0}	N_{C1}
60	0,8	0,07	825	435

Понижение силы тока

I, мА	Δx , мм	H, А/м	ΔB , Тл
830,9	0,0	-145,360	0,000
325,0	(56 ± 0,5)	-145,282	(0, 242 ± 0, 002)
127,4	(55 ± 0,5)	-141,042	(0, 238 ± 0, 002)
102,2	(34 ± 0,5)	-139,919	(0, 147 ± 0, 002)
84,0	(25 ± 0,5)	-137,317	(0, 108 ± 0, 002)
66,8	(14 ± 0,5)	-136,004	(0, 061 ± 0, 002)
56,0	(7 ± 0,5)	-113,841	(0, 030 ± 0, 002)
44,5	(6 ± 0,5)	-95,891	(0, 026 ± 0, 002)
39,1	(5 ± 0,5)	-78,810	(0, 022 ± 0, 002)
28,1	(6 ± 0,5)	-42,534	(0, 026 ± 0, 002)
15,4	(7 ± 0,5)	-34,787	(0, 030 ± 0, 002)
0,0	(15 ± 0,5)	0,000	(0, 065 ± 0, 002)

Повышение силы тока

I, мА	Δx , мм	H, А/м	ΔB , Тл
0,0	0,0	0,000	0,0000
15,4	(-3 ± 0,5)	34,787	(-0, 012 ± 0, 002)
28,1	(-3 ± 0,5)	42,533	(-0, 013 ± 0, 002)
39,1	(-3 ± 0,5)	78,809	(-0, 013 ± 0, 002)
44,5	(-2 ± 0,5)	95,835	(-0, 008 ± 0, 002)
55,9	(-4 ± 0,5)	113,395	(-0, 017 ± 0, 002)
66,7	(-3 ± 0,5)	136,558	(-0, 013 ± 0, 002)
83,9	(-14 ± 0,5)	137,648	(-0, 060 ± 0, 002)
105,1	(-32 ± 0,5)	139,139	(-0, 138 ± 0, 002)
129,3	(-39 ± 0,5)	141,318	(-0, 169 ± 0, 002)
336,7	(-62 ± 0,5)	145,610	(-0, 268 ± 0, 002)
859,6	(-59 ± 0,5)	144,688	(-0, 255 ± 0, 002)

5. Из графика определена коэрцитивная сила железа $H_C = 144 \pm 3$ А/м, а такие индукция насыщения $B_S = 1,84 \pm 0,04$ Тл.
6. По наклону графика определено значение максимальной дифференциальной магнитной проницаемости $\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} = 465 \pm 5$.

Начальная кривая намагничивания

I, мА	Δx , мм	H, А/м	ΔB , Тл
0,0	0,0	0,000	0,0000
15,3	(8 ± 0,5)	1,230	(0,035 ± 0,002)
28,1	(17 ± 0,5)	2,534	(0,074 ± 0,002)
39,1	(44 ± 0,5)	3,810	(0,190 ± 0,002)
44,5	(22 ± 0,5)	4,891	(0,095 ± 0,002)
55,9	(45 ± 0,5)	5,396	(0,195 ± 0,002)
65,7	(27 ± 0,5)	6,558	(0,117 ± 0,002)
81,9	(61 ± 0,5)	9,649	(0,264 ± 0,002)
103,2	(71 ± 0,5)	15,696	(0,307 ± 0,002)
131,4	(60 ± 0,5)	24,875	(0,260 ± 0,002)
332,9	(79 ± 0,5)	53,725	(0,342 ± 0,002)
861,6	(71 ± 0,5)	146,688	(0,307 ± 0,002)

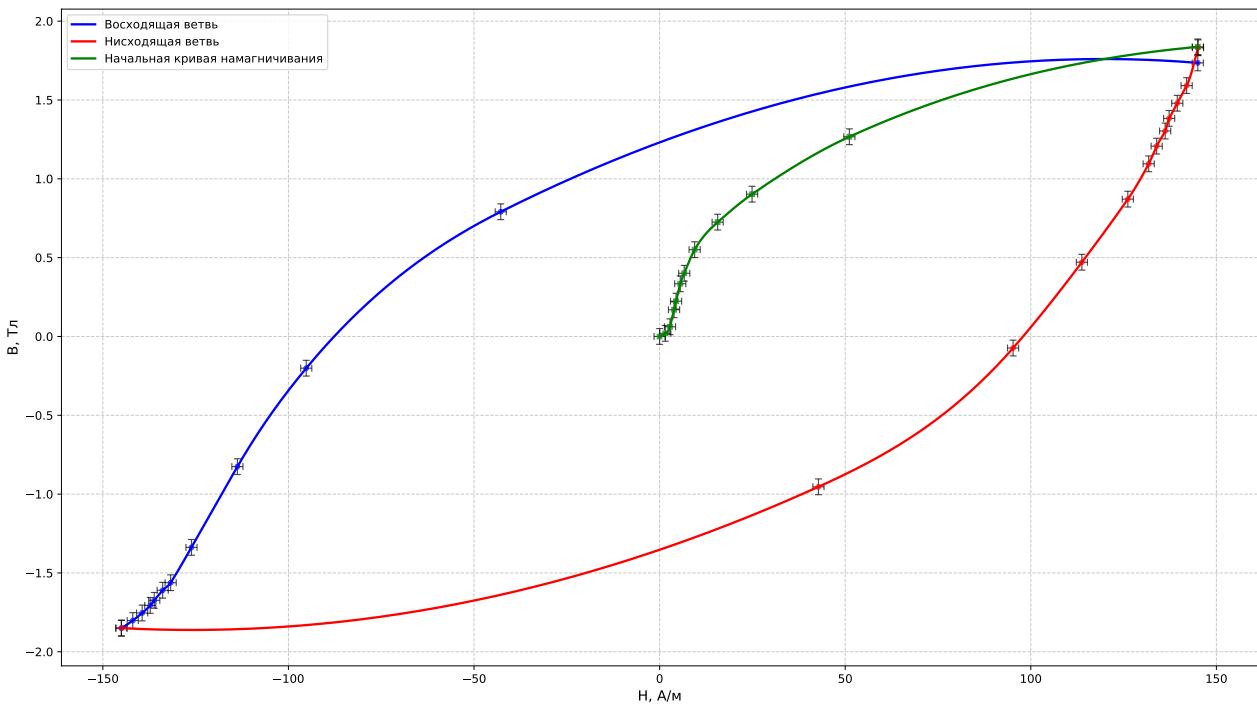


Рис. 7: График петли гистерезиса

Вывод

В результате выполнения работы были получены предельная петля гистерезиса и начальная кривая намагничивания. Затем из графика зависимости $B(H)$ были определены коэрцитивная сила, индукция насыщения и максимальная дифференциальная магнитная проницаемость. Результаты в сравнении с табличными:

	Эксперимент	Справочное значение
H_C , А/м	144 ± 3	70
B_S , Тл	$1,84 \pm 0,04$	2,16
μ	465 ± 5	6000

Как видно, с табличными значениями только B_S сошлось по порядку величины. Вероятнее всего, расхождение связано с неидеальностью установки, возможностью существования примесей в исследуемом образце и ограниченностью максимально возможной силы тока – возможно,

мы не дошли до участка, где зависимость становится линейной, и можно более точно определить максимальную дифференциальную магнитную проницаемость