

## Петля гистерезиса (статический метод)

Владимир Трунов / Андрей Строчук

### 1 Цель работы

Исследование кривых намагничивания ферромагнетиков с помощью баллистического гальванометра

### 2 В работе используются:

- генератор тока с блоком питания
- тороид
- соленоид
- баллистический гальванометр с осветителем и шкалой
- амперметры
- магазин сопротивлений
- лабораторный автотрансформатор
- разделительный трансформатор

### 3 Теоретические положения

Магнитная индукция  $\mathbf{B}$  и напряжённость магнитного поля  $\mathbf{H}$  в ферромагнетике неоднозначно связаны между собой: индукция зависит не только от напряжённости, но и от предыстории образца.

В эксперименте будет исследоваться *основная кривая намагничивания*  $OACD$  и *предельная петля гистерезиса*  $DEFD'E'F'D$  (см. рис. 1).

С помощью баллистического гальванометра и амперметра будем косвенно измерять зависимость индукции магнитного поля от его напряжённости.

Напряжённость магнитного

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

$$H = \frac{N_{T0}}{\pi D} I, \quad (1)$$

где  $D$  - средний диаметр тора,  $N_{T0}$  - количество витков.

Изменение поля приводит к изменению потока магнитной индукции  $\Phi$  в

сердечнике, в измерительной обмотке возникает ЭДС индукции, через гальванометр, в свою очередь, протекает импульс тока, изменяется положение рамки и, следовательно, зайчика. Окончательно (определив также баллистическую постоянную гальванометра, проведя измерения с соленоидом) для изменения магнитной индукции в сердечнике тороида получаем:

$$\Delta B = \mu_0 \left( \frac{d_C}{d_T} \right)^2 \frac{R}{R_1} \frac{N_{C0}}{N_{T1}} \frac{N_{C1}}{l_C} \Delta I_1 \frac{\Delta x}{\Delta x_1}, \quad (2)$$

где  $R$  - полное сопротивление измерительной цепи тороида,  $d_C, d_T$  - диаметр поперечного сечения соленоида и тороида соответственно,  $N_{C0}$  - число витков пустотелого соленоида,  $N_{C1}$  - число витков

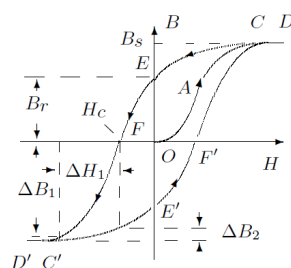


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

короткой измерительной катушки  $l_C$  - длина соленоида,  $\Delta x_1$  - отклонение зайчика при работе с соленоидом,  $\Delta x$  - отклонение зайчика в эксперименте.

## 4 Экспериментальная установка

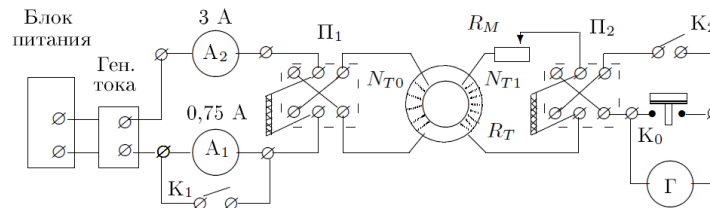


Рис. 2: Схема установки для исследования петли гистерезиса

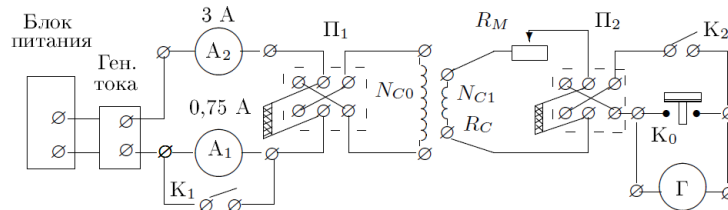


Рис. 3: Схема установки для калибровки гальванометра

После снятия петли гистерезиса необходимо размагнитить сердечник, подключив его к цепи переменного тока, постепенно снижая его амплитуду. Только затем следует приступить к снятию основной кривой намагничивания.

## 5 Ход работы

1. Подготовив к работе экспериментальную установку, снимем зависимость величины скачка  $\Delta x$  от величины силы тока в цепи  $I$ . Пройдём по всей петле гистерезиса, результаты занесём в таблицу 1.

Таблица 1: Зависимость  $\Delta x$  от  $I$  и соответствующие  $H$  и  $\Delta B$ , петля гистерезиса

$I$ , А	1.73	0.94	0.58	0.49	0.40	0.36	0.325	0.284	0.246	0.187	0.11	0.0
$\Delta x$ , см	0.0	15.9	9.2	3.3	2.5	2.8	1.5	1.0	0.9	1.5	2.0	3.0
$H$ , А/м	9635.03	5242.20	3256.45	2715.29	2223.17	1982.40	1811.31	1582.80	1371.58	1039.97	613.61	0.0
$\Delta B$ , Тл	0.0	0.307	0.178	0.064	0.048	0.054	0.029	0.019	0.017	0.029	0.039	0.058
$I$ , А	1.72	0.94	0.58	0.49	0.39	0.36	0.33	0.28	0.25	0.19	0.11	0
$\Delta x$ , см	0.0	15.9	9.2	3.3	2.5	2.8	1.5	1.0	0.9	1.5	2	3
$H$ , А/м	9635.03	5242.2	3256.4	2715.3	2223.2	1982.4	1811.3	1582.8	1371.6	1039.9	613.6	0
$\Delta B$ , Тл	0.205	0.25	0.38	0.37	0.46	0.28	0.30	0.39	0.24	0.45	-	-
$I$ , мА	0	0.11	0.187	0.25	0.28	0.32	0.36	0.40	0.49	0.58	0.94	1.73
$\Delta x$ , см	-	10.7	13.2	20.3	19.5	22.5	13.9	15.3	20.3	12.1	23.2	20.8
$H$ , А/м	0	613.06	1039.4	1372.7	1585.59	1809.6	1981.29	2222.05	2713.06	3253.7	5239.97	9633.36
$\Delta B$ , Тл	0.21	0.25	0.39	0.38	0.43	0.27	0.30	0.39	0.23	0.45	0.40	-
$I$ , мА	0.94	0.58	0.49	0.40	0.36	0.33	0.28	0.25	0.19	0.11	0.0	-
$\Delta x$ , см	16.1	8.9	3.5	3.5	1.9	2.5	1.1	1.1	1.5	2.5	5.2	-
$H$ , А/м	5241.64	3257.01	2714.73	2222.61	1982.96	1811.31	1582.80	1371.58	1039.97	613.06	0.0	-
$\Delta B$ , Тл	0.31	0.17	0.068	0.068	0.037	0.048	0.02	0.02	0.029	0.048	0.10	-

2. Отсоединим цепь от тороида, подсоединим её к пустотелому соленоиду. Откалибруем гальванометр. Получившиеся необходимые значения:

$$I_{max} = 1.2681 A \quad \Delta x_1 = 4.3 \text{ см}$$

3. Размагнитим тороид с помощью источника переменного тока и трансформатора. Снимем начальную кривую намагничивания, результаты занесём в таблицу 2.

Таблица 2: Зависимость  $\Delta x$  от  $I$  и соответствующие  $H$  и  $\Delta B$ , начальная кривая намагничивания

$I$ , мА	0.11	0.19	0.25	0.28	0.32	0.36	0.40	0.49	0.58	0.94	1.73	-
$\Delta x$ , см	4.7	5.8	8.5	6.5	7.4	5.9	6.7	11.5	9.1	19.5	18.4	-
$H$ , А/м	613.057	1039.41	1371.019	1581.69	1809.63	1981.29	2220.94	2712.5	3253.7	5236.62	9633.92	-
$\Delta B$ , Тл	0.09	0.11	0.16	0.126	0.143	0.114	0.129	0.22	0.18	0.38	0.36	-

4. В координатах  $B(H)$  построим на одном графике петлю гистерезиса и начальную кривую намагничивания (рисунок 4).

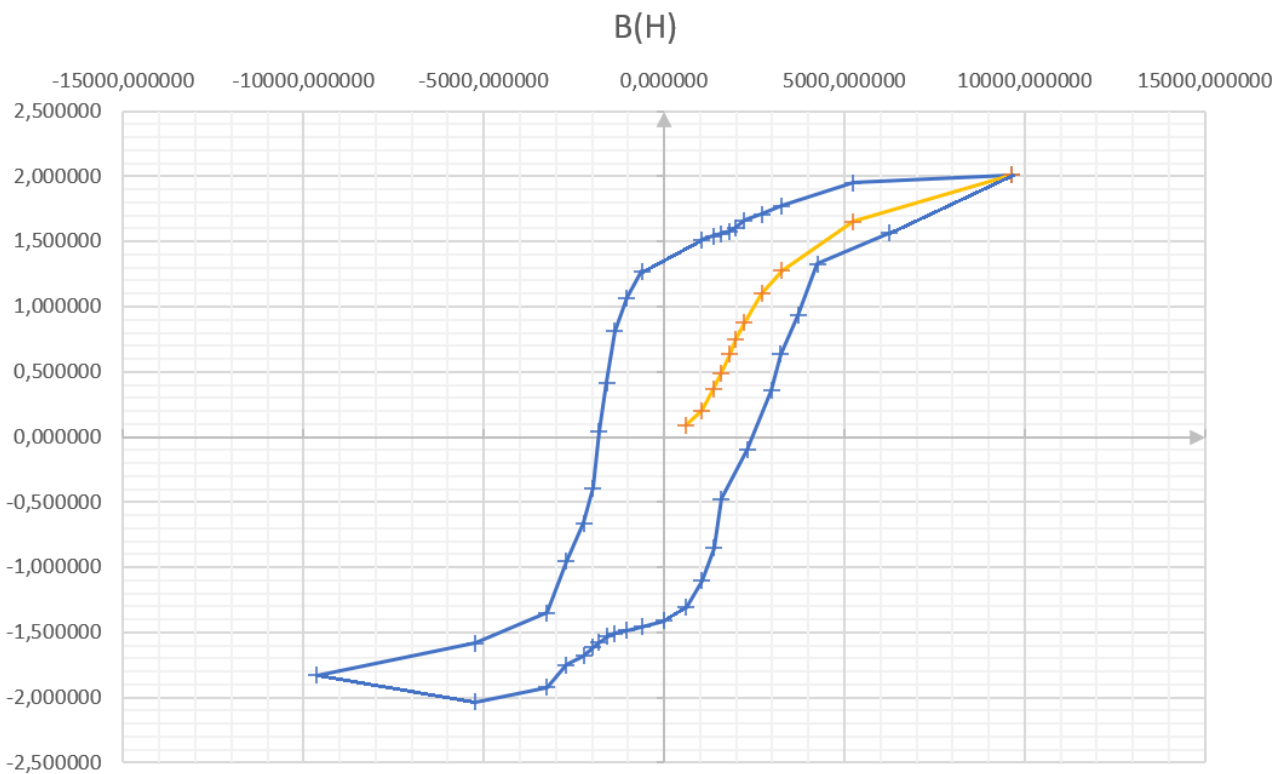


Рис. 4: Петля гистерезиса и начальная кривая намагничивания для исследуемого образца

По графику определим следующие величины и оценим их погрешности:

- коэрцитивная сила  $H_c$  - значение напряжённости магнитного поля, необходимое для полного размагничивания ферромагнитного вещества равна длине отрезка, отсекаемого петлёй гистерезиса на горизонтальной оси.  $H_c = 1809 \pm 193$  А/м.
- индукция насыщения  $B_s$  - максимально достижимое значение внутренней индукции магнитного материала при данной температуре.  $B_s = 0.0080 \pm 0.0004$  Тл.
- максимальная дифференциальная магнитная проницаемость  $\mu_d = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}$  - характеризующий связь между магнитной индукцией  $B$  и напряжённостью магнитного поля  $H$  в веществе.  $\mu_d = 9715 \pm 270$

Итоговые результаты сведём в таблицу. Теоретические значения возьмём из справочника в пособии к лабораторным работам для технической стали.

Таблица 3: Соответствие теоретических и экспериментальных результатов

	Эксперимент	Справочник
$H_c$ , А/м	$1809 \pm 140$	80
$B_s$ , Тл	$2.0 \pm 0.3$	2.15
$\mu_0$	$1433 \pm 183$	5000

## 6 Вывод

В ходе работы были исследованы петля гистерезиса магнитомягкого материала, его начальная кривая намагничивания, экспериментально определены некоторые магнитные свойства. По кривой гистерезиса видно, что материал является магнитомягким, так как площадь петли мала. Также она симметрична и в целом соответствует теоретическим изображениям подобных кривых. Различие справочных и экспериментальных данных может объясняться тем, что, скорее всего, образец изготовлен не из чисто технического железа, а из сплава его с другим металлом.