

# МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ  
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.4.4

---

## Петля гистерезиса (статический метод)

---

Студент  
Ришат ИСХАКОВ  
513 группа

Преподаватель  
Александр Александрович  
КАЗИМИРОВ



3 декабря 2016 г.

**Цель работы:** Исследование кривых намагничивания ферромагнетиков с помощью баллистического гальванометра.

**В работе используются:** генератор тока с блоком питания, тороид, соленоид, баллистический гальванометр с осветителем и шкалой, амперметры, магазин сопротивлений, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), разделительный трансформатор.

## 1. Теория

Магнитная индукция  $\mathbf{B}$  и напряженность магнитного поля  $\mathbf{H}$  в ферромагнетиках связаны между собой сложным нелинейным образом: индукция зависит не только от напряженности, но и от предыстории образца. Кривую намагничивания можно наблюдать на рис. 1. Выходящая из начала координат основная кривая намагничивания  $OACD$  возникает при намагничивании размагниченного образца.

Зададимся целью определить коэрцитивную силу и индукцию насыщения предоставленного образца (материал — сталь).

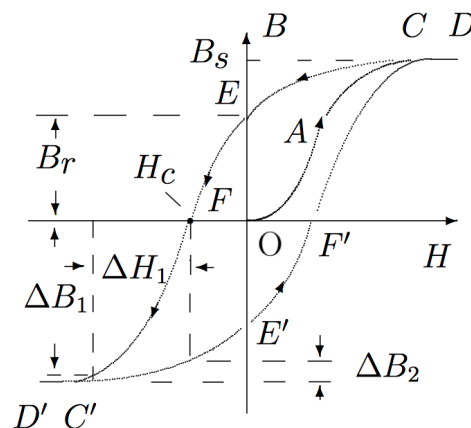


Рис. 1: Гистерезис ферромагнетика

### 1.1. Предельная петля

Индукция в образце складывается из напряжённости внешнего поля  $\mathbf{H}$  и намагниченности образца:  $\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$ , где намагниченность  $\mathbf{M}$  — магнитный момент единицы объема образца, а  $\mu_0$  — магнитная постоянная.

Сначала намагнитим образец до насыщения (точка  $D$ ). Соответствующее значение индукции  $B_s$  называют индукцией насыщения. Потом будем постепенно уменьшать внешнее поле. Явление гистерезиса состоит в том, что при нулевом значении внешнего поля индукция остаётся некоторая 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.

### 1.2. Формальное описание

Необходимо выразить  $H$  и  $B$  через параметры, измеряемые в эксперименте. На тороидальный образец намотаны две обмотки — намагничивающая с числом витков  $N_{T0}$  и измерительная с числом витков  $N_{T1}$ , подключенная к гальванометру, работающему в баллистическом режиме.

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

$$H = \frac{N_{T0}}{\pi D} I,$$

где  $D$  — средний диаметр тора.

При скачкообразном изменении тока на величину  $\Delta I$  поле в тороиде меняется:  $\Delta H \sim \Delta I$ . Изменение  $\Delta H$  приводит к изменению потока магнитной индукции  $\Phi$  в сердечнике, и в измерительной обмотке сечения  $S_T$  с числом витков  $N_{T1}$  возникает ЭДС индукции:

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt} = -S_T N_{T1} \frac{dB}{dt}.$$

Через гальванометр протекает импульс тока; первый отброс зайчика гальванометра, работающего в баллистическом режиме, пропорционален величине прошедшего через гальванометр заряда  $q$ :

$$\varphi = \frac{q}{b},$$

где  $b$  — баллистическая постоянная гальванометра.

Дополнительно для получения баллистической постоянной необходимо использовать вместо тороида пустотелый соленоид с числом витков  $N_{T0}$ , с  $N_{T1}$  витками на измерительной катушке, длиной  $l_c$ . Тогда исключив баллистическую постоянную и выразив  $\Delta B$  получим выражение:

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

## 2. Описание установки

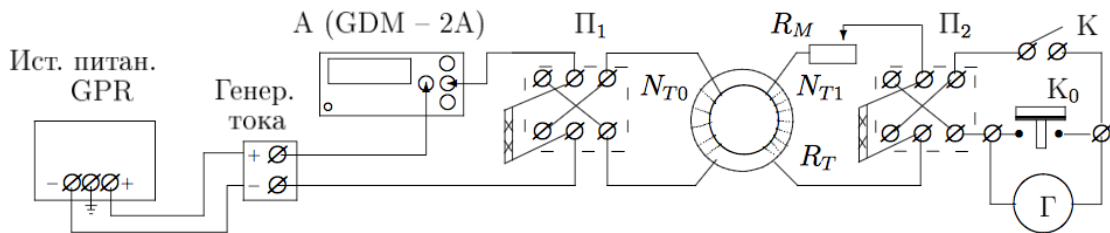


Рис. 2: Схема экспериментальной установки для исследования петли гистерезиса

Измерение предельной петли гистерезиса начинаем с максимального значения магнитного поля, что соответствует точке  $D$  на рис. 1. Специальный генератор позволяет скачками менять токи в намагничивающей обмотке. Он работает неравномерно, так как разные скачки на разных участках петли вызывают разные отклонения зайчика гальванометра (большие скачки делаются вблизи насыщения и малые вблизи нуля). Дойдя до нулевого значения тока ( $E$ ), меняем направление магнитного поля и снова увеличиваем ток в намагничивающей обмотке ( $D'$ ). Затем снова меняем направление магнитного поля и возвращаемся в точку  $D$ .

Сопротивления измерительных цепей  $R$  и  $R_1$  подбираются одинаковыми, чтобы можно было считать постоянную гальванометра *действительно* постоянной (она зависит от полного сопротивления в цепи).

Измерение начальной кривой намагничивания (участок  $OAC$ ) производится по той же схеме, но с предварительно размагниченным образцом.

### 3. Измерения

Измеренные значения  $\Delta B$  откладываем по одной стороне петли от максимального значения индукции. Ось  $H(I)$  проводится посередине петли.

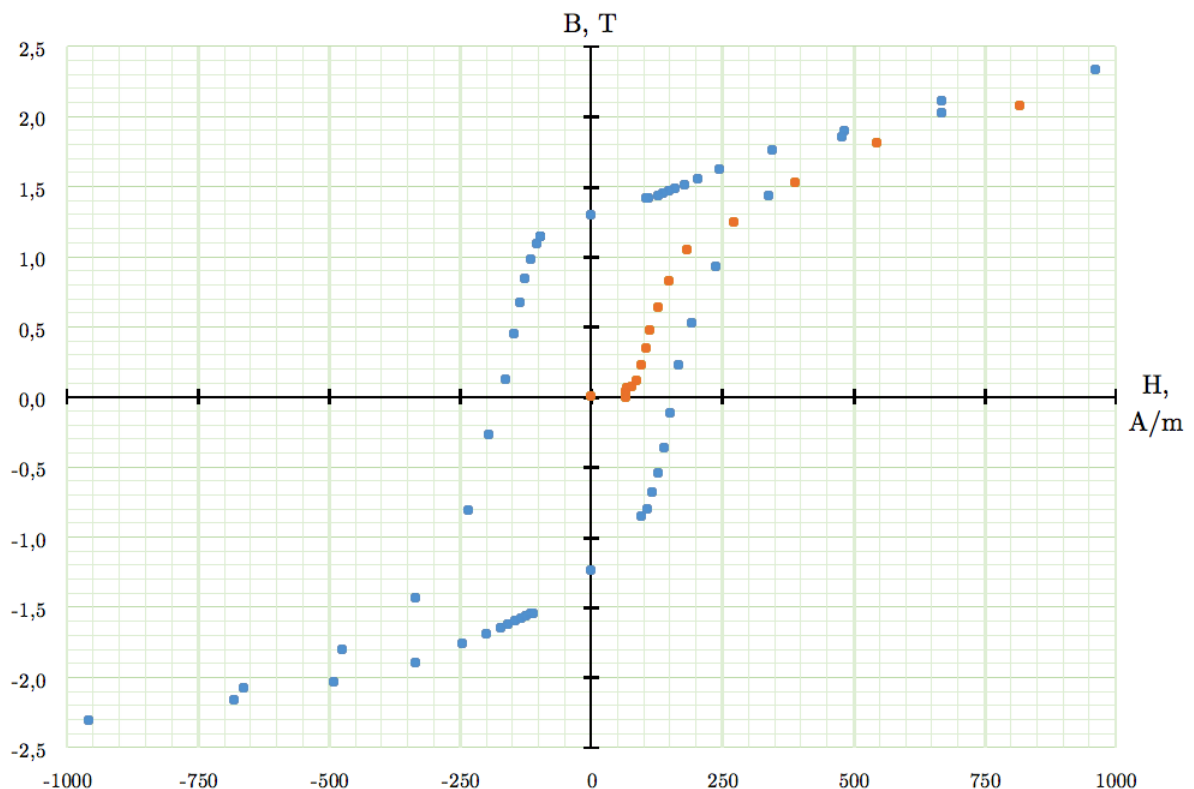


Рис. 3: Полученная петля гистерезиса

Из графика получим значения коэрцитивную силу  $H_c$  и индукцию насыщения  $B_s$  и максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости  $\mu_{\text{диф}}$ :

$$H_c = 2.4 \pm 0.3 \text{ A/m}$$

$$B_s = 150 \pm 16 \text{ T}$$

$$\mu_{\text{диф}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} = 6000 \pm 500$$

	Эксперимент	Теория
$H_c, \text{ А/м}$	$150 \pm 16$	140
$B_s, \text{ Т}$	$2.4 \pm 0.3$	2.12
$\mu_{\text{диф}}$	$6000 \pm 500$	4000

Таблица 1: Сравнение теории с практикой

## 4. Вывод

Было исследовано явление гистерезиса на примере образца стали (см. рис. 1). Она имеет две оси симметрии, выглядит вполне гладко и красиво, вписываясь в наше представление о природе вещей. Были оценены значения коэрцитивной силы  $H_c$  и индукции насыщения  $B_s$  и максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости  $\mu_{\text{диф}}$ . Значения с учетом погрешности совпадают с действительными.