

Московский физико-технический институт
(государственный университет)

Лабораторная работа по общему курсу физики
Электричество и магнетизм

3.4.4. Петля Гистерезиса (статический метод)

Глаз Роман Сергеевич
Группа Б01-007

Долгопрудный
2021

Содержание

1	Теоретическое введение	1
2	Ход работы	4
2.1	Предельная петля гистерезиса	4
2.2	Калибровка гальванометра	4
2.3	Начальная кривая намагничивания	4
2.4	Обработка данных	5
3	Заключение	5
4	Список используемой литературы	5

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

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

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

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 Γ , работающим в баллистическом (импульсном) режиме: его отклонение пропорционально полному заряду Δq , протекшему через него.

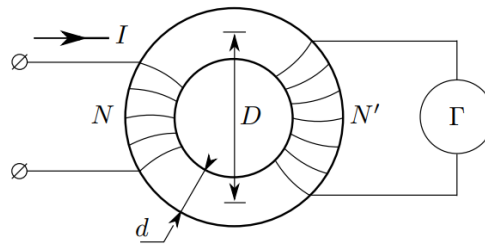


Рис. 2: Схема для измерения индукционного тока

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 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 протёкший чеерез него заряд баллистическим методом, то есть

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

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

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

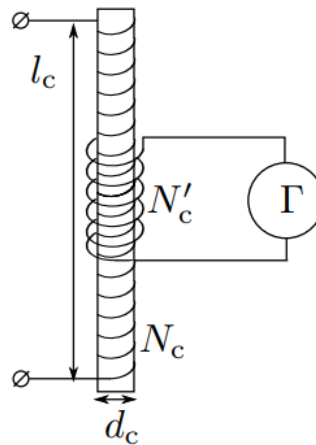


Рис. 3: Схема для калибровки гальванометра

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

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

Схема для исследования петли гистерезиса представлена на рис. 4.

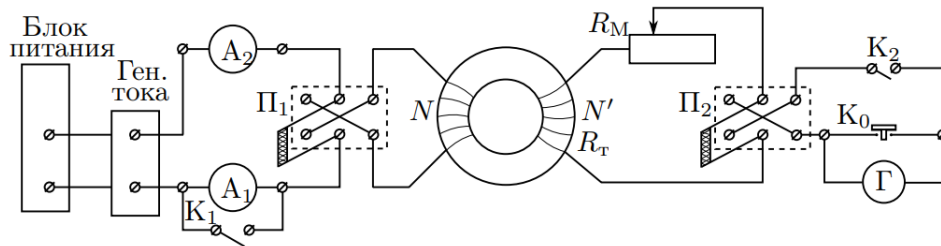


Рис. 4: Схема установки для исследования петли гистерезиса

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.

2. Ход работы

Для начала соберём нужны данные для дальнейшего исследования. $N_t = 1750$, $N' = 300$, $R_0 = 5,6$ 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.

2.1. 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 приложении к отчёту лабораторной работы.

2.2. 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 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.

2.3. 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.

2.4. Обработка данных

Для начала, учитывая зависимость напряжённости магнитного поля и силы тока намагничивающей обмотки, переведем 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, переведем 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, остальные значения уже известны.

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

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

Найдём из графика оценку коэрцитивной силы стали (исследуемого материала) $H_c = 1540 \pm 20$ А/м (точность высока, т.к. высока точность измерений сил тока).

Также найдём индукцию насыщения $B_s = 1,37 \pm 0,05$ Тл.

По наклону графика определим значение максимальной дифференциальной магнитной проницаемости $\mu = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} = 533 \pm 21$.

Заметим, что значения по порядку сходятся со справочными $\mu = 1100$ (если материал – чистая мягкая сталь) и $H_c = 1540 \pm 20$ А/м (если сталь углеродистая).

3. Заключение

Для стали действительно справедлива ферромагнитная теория, так как зависимость $B(H)$ имеет вид петли гистерезиса. Значения коэрцитивной силы, индукции насыщения и дифференциальной магнитной проницаемости зависят полностью от сплава стали, которой является исследуемым в этом эксперименте материалом. Для полученных значений определить сплав стали не удалось из-за расхождений в одном из показателей, но по порядку величин значения сходятся.

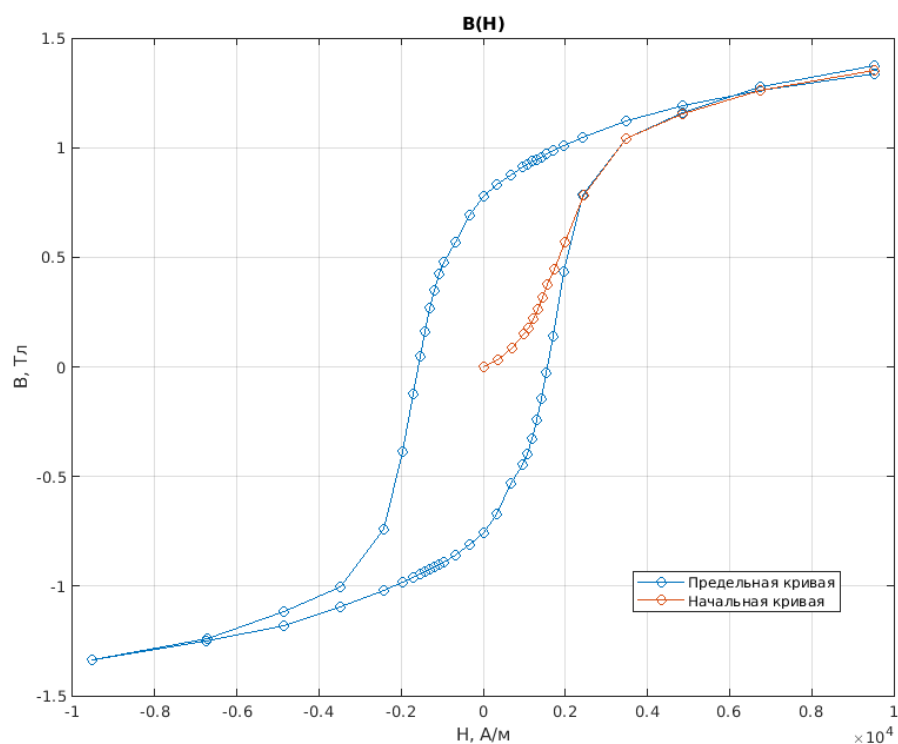


Рис. 5: График петли гистерезиса

4. Список используемой литературы

- Лабораторный практикум по общей физике. Электричество и магнетизм
- [Описание лабораторных работ на кафедре общей физики МФТИ](#)