

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Отчёт по лабораторной работы 3.4.5
Петля гистерезиса (динамический метод)

Выполнил студент:

Сериков Василий Романович

группа: Б03-102

Москва, 2022 г.

Аннотация

Цель работы:

Изучение петель гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных полях.

В работе используются:

Автотрансформатор, понижающий трансформатор, интегрирующая цепочка амперметр, электронный осциллограф, делитель напряжения, тороидальные образцы с двумя обмотками.

Теоретические сведения:

Если состояние некоторой системы зависит не только от мгновенных значений внешних параметров, но от истории их изменений, говорят, что в системе имеет место гистерезис.

В данной работе кривые гистерезиса ферромагнитных материалов изучаются в поле частоты $\nu_0 = 50$ Гц с помощью электронного осциллографа.

Магнитная индукция B и напряжённость поля H в ферромагнитном материале неоднозначно связаны между собой: индукция зависит не только от напряжённости, но и от предыстории образца. Связь между B и H типичного ферромагнетика иллюстрирует рис.1.

Если к ферромагнитному образцу прикладывать переменное внешнее магнитное поле, то его состояние на плоскости H - B будет изменяться по замкнутой кривой — петле гистерезиса. Размер петли определяется максимальным значением напряжённости H в цикле (напр., петля AA' , обозначенная пунктиром на рис. 1). Если амплитуда напряжённости достаточно велика, то образец будет периодически достигать насыщения, что на рисунке соответствует кривой $CEFC'E'F'C$ (предельная петля гистерезиса). Пересечение предельной петли с вертикальной осью соответствует остаточной индукции B_r , пересечение с горизонтальной осью — коэрцитивному полю H_c . Крайние точки петель, соответствующие амплитудным значениям H (например, точка A на рис. 1), лежат на начальной кривой намагничивания (OAC).

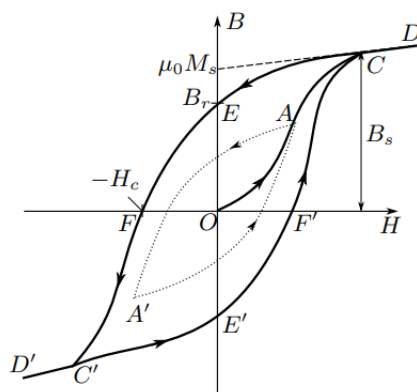


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика.

Магнитную индукцию B удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при изменении магнитного потока Φ в катушке, намотанной на образец. Пусть катушка с N витками плотно охватывает образец сечением S , и индукция B в образце однородна, тогда выражение для B будет таким:

$$|B| = \frac{1}{SN} \int \mathcal{E} dt \quad (1)$$

Для интегрирования сигнала применяют интегрирующие схемы (рис. 2)

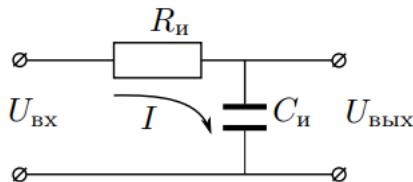


Рис. 2: Схема RC-цепи.

Входное и выходное сопротивление связаны соотношением

$$U_{\text{вых}} \simeq \frac{1}{\tau} \int U_{\text{вх}} dt \quad (2)$$

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вх}}}{\tau \Omega} \quad (3)$$

Тогда для B получим:

$$|B| = \frac{1}{SN_{\text{и}}} \int U_{\text{вх}} dt = \frac{\tau_{\text{и}}}{SN_{\text{и}}} U_{\text{вых}} \quad (4)$$

где $\tau_{\text{и}} = R_{\text{и}} C_{\text{и}}$ — постоянная времени RC-цепочки.

Экспериментальная установка:

Схема установки изображена на рис. 3. Напряжение сети - 220 В, частота - 50 Гц. С помощью трансформаторного блока Т, состоящего из регулирующего автотрансформатора и разделительного понижающего трансформатора это напряжение подаётся на намагничивающую обмотку N_0 исследуемого образца.

В цепь намагничивающей катушки, на которую подаётся некоторое напряжение U_0 , последовательно включено сопротивление R_0 . Напряжение на R_0 , равное $U_R = R_0 I_0$, где I_0 — ток в намагничивающей обмотке N_0 , подаётся на канал Х осциллографа. Связь напряжённости H в образце и тока I_0 рассчитывается по теореме о циркуляции.

Для измерения магнитной индукции B с измерительной обмотки $N_{\text{и}}$ на вход RC-цепочки подаётся напряжение $U_{\text{и}}$ ($U_{\text{вх}}$), пропорциональное производной dB/dt . С интегрирующей ёмкости $C_{\text{и}}$ снимается напряжение U_c ($U_{\text{вых}}$), пропорциональное величине B , и подаётся на вход Y осциллографа. Значение индукции поля B рассчитывается по формуле (3).

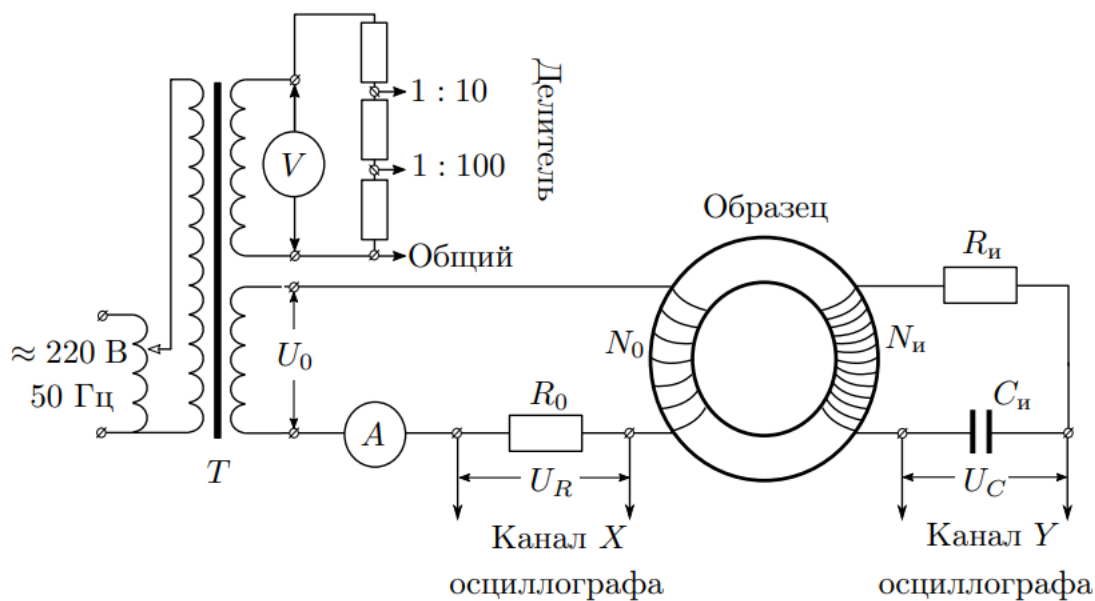


Рис. 3: Схема экспериментальной установки.

Результаты измерений и обработка данных:

1. Запишем начальные данные и погрешности.

$$R_{и} = 20 \text{ кОм}, C_{и} = 20 \text{ мкФ}, R_0 = 0,2 \text{ Ом} \quad \sigma_x = \frac{K_x}{5} \quad \sigma_y = \frac{K_y}{5}$$

	N_0	N_u	$S, \text{ см}^2$	$2\pi R, \text{ см}$
Феррит	45	400	3	25
Кремнистое железо	20	200	2	11
Пермаллой	15	300	0,66	14,1

Таблица 1: Начальные данные

2. Получим кривую гистерезиса и снимем параметры ЭО для каждого образца

Пермаллой:

$$K_x = 20 \text{ мВ/дел}$$

$$K_y = 50 \text{ мВ/дел}$$

$$2X_s = (10 \pm 0,2)K_x - \text{полная ширина предельной петли}$$

$$2Y_s = (3,4 \pm 0,2)K_y - \text{полная высота предельной петли}$$

$$2X_c = (5 \pm 0,2)K_x - \text{двойная амплитуда для коэрцитивного поля}$$

$$2Y_r = (3,4 \pm 0,2)K_y - \text{двойная амплитуда остаточной индукции}$$

Феррит:

$$K_x = 20 \text{ мВ/дел}$$

$$K_y = 20 \text{ мВ/дел}$$

$$2X_s = (7,2 \pm 0,2)K_x - \text{полная ширина предельной петли}$$

$$2Y_s = (5 \pm 0,2)K_y - \text{полная высота предельной петли}$$

$$2X_c = (0,8 \pm 0,2)K_x - \text{двойная амплитуда для коэрцитивного поля}$$

$$2Y_r = (2,4 \pm 0,2)K_y - \text{двойная амплитуда остаточной индукции}$$

Кремнистое железо:

$$K_x = 0,1 \text{ В/дел}$$

$$K_y = 20 \text{ мВ/дел}$$

$$2X_s = (7,6 \pm 0,2)K_x - \text{полная ширина предельной петли}$$

$$2Y_s = (7,4 \pm 0,2)K_y - \text{полная высота предельной петли}$$

$$2X_c = (1,2 \pm 0,2)K_x - \text{двойная амплитуда для коэрцитивного поля}$$

$$2Y_r = (3,2 \pm 0,2)K_y - \text{двойная амплитуда остаточной индукции}$$

3. Проведем измерения начальной кривой намагничивания для каждого образца.

№	1	2	3	4	5	6	7	8
x , дел	4,0	3,6	3,0	2,2	1,8	1,7	1,6	1,2
y , дел	1,8	1,7	1,6	1,4	1,2	0,8	0,4	0,1

Таблица 2: Результаты измерений для Пермаллоя

№	1	2	3	4	5	6	7	8
x , дел	3,6	3,0	2,5	1,7	1,0	0,8	0,4	0,2
y , дел	2,5	2,3	2,2	1,9	1,5	1,4	0,6	0,2

Таблица 3: Результаты измерений для Феррита

№	1	2	3	4	5	6	7	8
x , дел	3,4	3,1	2,6	2,2	1,4	1,0	0,5	0,3
y , дел	3,4	3,3	3,1	2,8	2,1	1,5	0,8	0,2

Таблица 4: Результаты измерений для Кремнистого железа

4. Рассчитаем коэффициенты преобразования отклонений по осям X-Y осциллографа в напряжённость H и индукцию B магнитного поля в образце.

$$H = \frac{K_x N_0}{2\pi R R_0}$$

$$B = \frac{R_n C_n K_y}{S N_n}$$

Пермаллой:

$$H = 10,6 \text{ А/м дел}$$

$$B = 1,01 \text{ Тл/дел}$$

Феррит:

$$H = 18 \text{ А/м дел}$$

$$B = 0,0666 \text{ Тл/дел}$$

Кремнистое железо:

$$H = 90,9 \text{ А/м дел}$$

$$B = 0,2 \text{ Тл/дел}$$

5. Найдем индукцию насыщения B_s , коэрцитивную силу H_c , амплитуду колебаний напряжённости поля в тороиде H_s и остаточную индукцию B_r . $\varepsilon_{B_s} = \varepsilon_{Y_s}$, $\varepsilon_{B_r} = \varepsilon_{Y_r}$, $\varepsilon_{H_s} = \varepsilon_{X_s}$, $\varepsilon_{H_c} = \varepsilon_{X_c}$

$$H_c = \frac{(2X_c) * H}{2} \quad (5)$$

$$B_s = \frac{(2Y_s) * B}{2} \quad (6)$$

$$B_r = \frac{(2Y_r) * B}{2} \quad (7)$$

$$H_s = \frac{(2X_s) * B}{2} \quad (8)$$

Пермаллой:

$$H_c = 26 \pm 1 \text{ A/м}$$

$$B_s = 3,60 \pm 0,07 \text{ Тл}$$

$$B_r = 1,7 \pm 0,1 \text{ Тл}$$

$$H_s = 53 \pm 1 \text{ Тл}$$

Феррит:

$$H_c = 14 \pm 3 \text{ A/м}$$

$$B_s = 0,150 \pm 0,006 \text{ Тл}$$

$$B_r = 0,072 \pm 0,006 \text{ Тл}$$

$$H_s = 64 \pm 2 \text{ Тл}$$

Кремнистое железо:

$$H_c = 54,5 \pm 9 \text{ A/м}$$

$$B_s = 0,70 \pm 0,02 \text{ Тл}$$

$$B_r = 0,32 \pm 0,02 \text{ Тл}$$

$$H_s = 345 \pm 9 \text{ Тл}$$

6. Построим начальные кривые намагничивания в координатах $B(H)$. По графикам оценим начальное и максимальное значения дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}} = dB/dH$

Феррит: $\mu_{\text{диф}} = (22 \pm 2) \cdot 10^3$

Пермаллой: $\mu_{\text{диф}} = (109 \pm 4) \cdot 10^3$

Кремнистое железо: $\mu_{\text{диф}} = (2,6 \pm 0,3) \cdot 10^3$

7. Определение параметров RC-ячейки.

Измерим отношение входного и выходного напряжений $U_{\text{вх}}/U_{\text{вых}}$ ячейки с помощью осциллографа и определим постоянную RC-ячейки по формуле:

$$\tau = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}} \Omega} = \frac{8}{2\pi \cdot 50 \cdot 62 \cdot 10^{-3}} = (0,41 \pm 0,2) \text{ с} \quad (9)$$

Сравнив полученное значение со значением $\tau = RC = 0,4$, получили, что в пределах погрешности значения равны.

Обсуждение результатов:

В данной работе мы рассчитали коэффициенты преобразования отклонений по осям X-Y осциллографа в напряжённость H и индукцию B магнитного поля в каждом образце, полученные данные далее использовались для нахождения индукции насыщения B_s , коэрцитивной силу H_c , амплитуды колебаний напряжённости поля в тороиде H_s и остаточной индукцию B_r . Вклад в погрешности измеряемых величин вносит погрешность измерения величин K_x и K_y .

Также мы определили постоянную τ RC-ячейки и в пределах погрешности она совпадает со значением указным на установке.

Выводы:

В данной работе мы изучили петли гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных полях, определили их основные параметры и подсчитали погрешности.

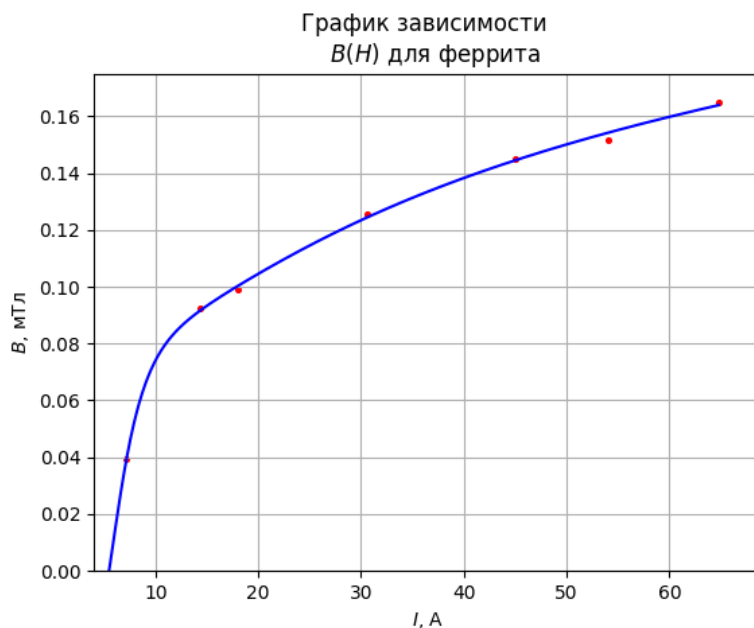


Рис. 4: График зависимости $B(H)$ для феррита

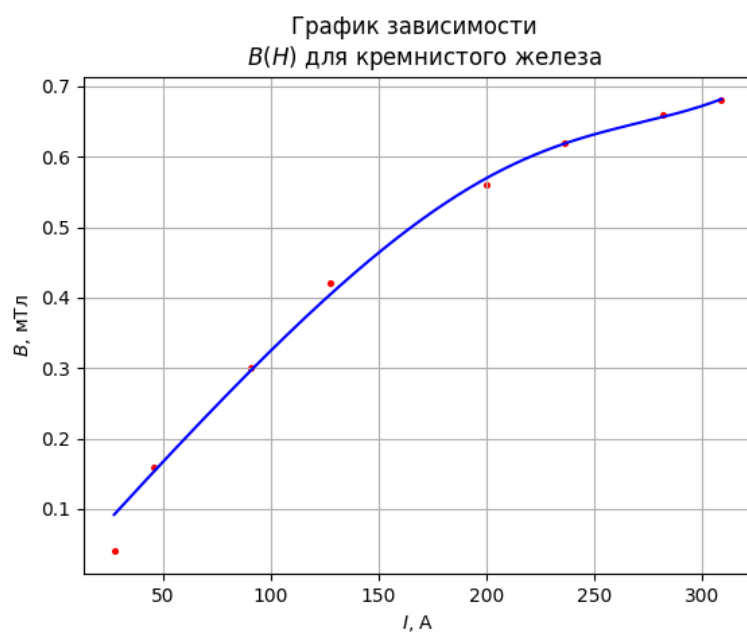


Рис. 5: График зависимости $B(H)$ для кремнистого железа

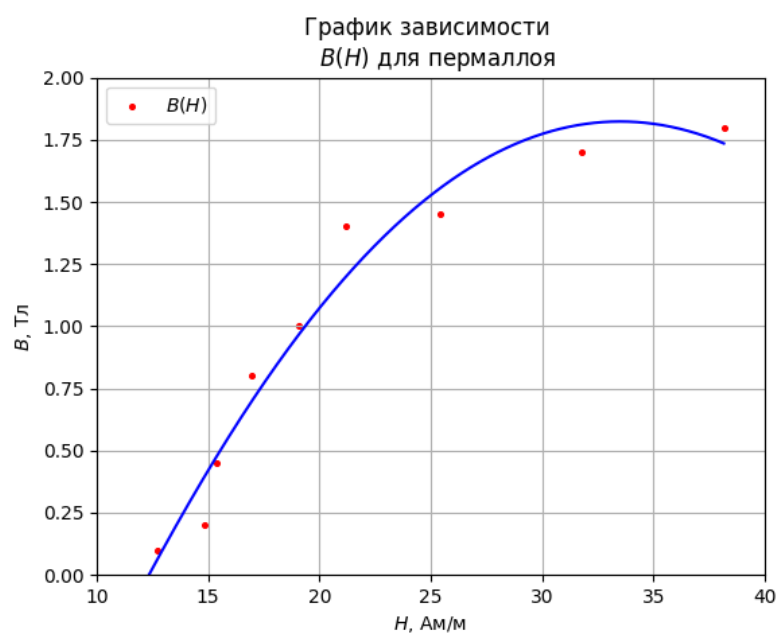


Рис. 6: График зависимости $B(H)$ для пермаллоя