

Работа 3.4.5

Петля гистерезиса

Цель работы: изучение петель гистерезиса ферромагнитных материалов с помощью осциллографа.

Оборудование: понижающий трансформатор, реостат, резистор, интегрирующая цепочка, амперметр и вольтметр (мультиметры), электронный осциллограф, делитель напряжения, переключатель, тороидальные образцы с двумя обмотками.

1. Теоретическая справка

Гистерезис. У ферромагнитных материалов зависимость индукции магнитного поля от напряженности ($B(H)$) не является линейной. Кроме того, даже при отсутствии магнитного поля сохраняется остаточная намагниченность. Поэтому важно знать вид этой зависимости. Будем использовать следующие понятия: $B_r = B(H = 0)$ — остаточная индукция, $H_c = -H(B = 0)$ — коэрцитивная сила, максимальная возможная индукция магнитного поля B_s — индукция насыщения (при достижении некоторого значения H индукция перестает увеличиваться). При этом предполагается, что H сначала увеличивается из состояния с нулевой намагниченностью, а потом уменьшается (возврат происходит по другой кривой). Определим также дифференциальную магнитную проницаемость $\mu_{\text{дифф}}$:

$$\mu_{\text{дифф}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH}. \quad (1)$$

Способ измерения индукции. Пусть на образец намотана катушка с числом витков N и площадью S . Тогда в силу закона Фарадея индукция определяется формулой

$$|B| = \frac{1}{SN} \int \mathcal{E} dt, \quad (2)$$

где \mathcal{E} — наводимая ЭДС. Для интегрирования сигнала используется интегрирующая цепочка, состоящая из резистора с большим сопротивлением R , соединенного последовательно с конденсатором емкостью C . Выходной сигнал U снимается с конденсатора. Если сопротивление достаточно большое, то выходной сигнал определяется выражением

$$U = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I dt \approx \frac{1}{RC} \int U_0 dt, \quad (3)$$

где U_0 — входное напряжение. В случае синусоидальных напряжений интеграл тривиален, и формула (2) принимает вид

$$|B| = \frac{RC}{SN} U. \quad (4)$$

Для проверки корректности использования этой формулы можно измерить постоянную времени RC . Из (3) должно выполняться соотношение

$$RC = \frac{U_0}{\Omega U}, \quad (5)$$

где Ω — циклическая частота сигнала.

2. Калибровка осей осциллографа

Экспериментальная установка. На рисунке 1 представлена общая схема экспериментальной установки. В этой части определяются чувствительности каналов осциллографа, поэтому полная схема не используется. Для определения чувствительности X — канала обмотка N_0 закорачивается и снимаются показания тока I через резистор $R_0 = 0,3$ Ом с амперметра A . Тогда чувствительность X — канала определяется формулой

$$m_x = \frac{2R_0\sqrt{2}I}{2x}, \quad (6)$$

где x — отклонение на осциллографе в делениях вдоль оси X (будем называть делением сантиметровую клетку). Для определения чувствительности Y — канала сигнал снимается через делитель напряжения с обмотки 12,6 В трансформатора. Вольтметром V измеряется напряжение U на обмотке. Часть этого напряжения снимается делителем с коэффициентом K и подается на вход Y ЭО. Если y — отклонение на осциллографе в делениях вдоль оси Y , то выражение для чувствительности Y — канала принимает вид

$$m_y = \frac{2\sqrt{2}KU}{2y}. \quad (7)$$

Обработка результатов. Результаты представлены далее:

$$I = (447 \pm 1) \text{ мА}; \quad (8)$$

$$2x = (4,0 \pm 0,1) \text{ дел}; \quad (9)$$

$$m_x = (0.095 \pm 0.002) \text{ В/дел}; \quad (10)$$

$$\Delta m_x = m_x \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\Delta 2x}{2x}\right)^2}; \quad (11)$$

$$U = 0,153 \text{ В}; \quad (12)$$

$$K = 1; \quad (13)$$

$$2y = (4,4 \pm 0,1) \text{ дел}; \quad (14)$$

$$m_y = (0.098 \pm 0.002) \text{ В/дел}; \quad (15)$$

$$\Delta m_y = m_y \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta 2y}{2y}\right)^2}, \quad (16)$$

здесь знаком Δ были обозначены погрешности соответствующих величин. Эти измерения проводились при настройке осциллографа на 0,1 В/дел, как видно, полученный результат почти совпадает с этим, поэтому в дальнейшем будем использовать коэффициент с осциллографа.

3. Определение постоянной времени

Экспериментальная установка. Установка здесь та же, что и в предыдущей части. Сигнал U_0 подается на интегрирующую цепочку с обмотки 6,3 В. С помощью осциллографа снимается амплитуды напряжений U_0 и U — напряжение на конденсаторе.

Обработка данных Результаты представлены далее:

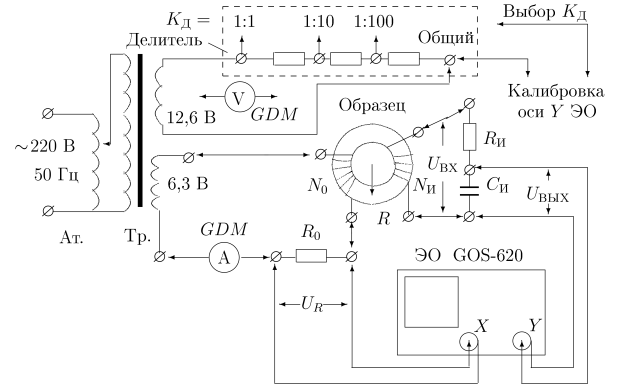


Рис. 1: Схема установки

$$U_0 = (5, 0 \pm 0, 2) \text{ В}; \quad (17)$$

$$U = (42 \pm 1) \text{ мВ}; \quad (18)$$

$$\Omega = 314 \text{ с}^{-1}; \quad (19)$$

$$\frac{U_0}{\Omega U} = (0, 38 \pm 0, 02) \text{ с}; \quad (20)$$

$$\Delta \frac{U_0}{\Omega U} = \frac{U_0}{\Omega U} \sqrt{\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_0}{U_0}\right)^2}; \quad (21)$$

$$R = 20 \text{ кОм}; \quad (22)$$

$$C = 20 \text{ мкФ}; \quad (23)$$

$$RC = 0, 40 \text{ с}. \quad (24)$$

Отсюда условие (5) выполняется в пределах погрешности, следовательно, измерения корректны.

4. Снятие петли гистерезиса

Экспериментальная установка. Теперь на X — канал осциллографа подается сигнал с R_0 , а на Y — канал — с C . Таким образом, показания X — канала пропорциональны H (по т. о циркуляции), а Y — канала — B (из (4)). Обозначим K_x и K_y — соответствующие коэффициенты усиления осциллографа. Переградуировка осциллографа производится по формулам

$$C_x = \frac{K_x N_0}{2\pi R R_0}; \quad (25)$$

$$C_y = \frac{K_y C R_i}{S N_i}, \quad (26)$$

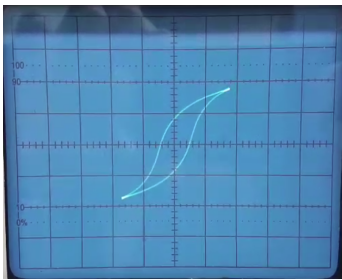
здесь R — радиус тороида, N_0 — число витков на первой обмотке, N_i — число витков на второй обмотке (подключенной к интегрирующей цепочке).

Обработка данных. В работе исследуются 3 образца — из Fe-Si, пермаллой и феррита. Рассчитаем сначала цену деления осциллографа для всех образцов. Данные занесены в таблицу 1.

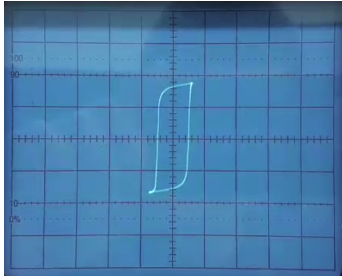
| | Fe-Si | Пермаллой | Феррит |
|--------------------------|-------|-----------|--------|
| N_0 | 40 | 40 | 40 |
| N_i | 400 | 200 | 400 |
| $S, \text{ см}^2$ | 1,2 | 3,8 | 3,0 |
| $2\pi R, \text{ см}$ | 10 | 24 | 25 |
| $C_x, \text{ А/(м·дел)}$ | 133 | 55,6 | 53,3 |
| $C_y, \text{ Тл}$ | 0,833 | 0,526 | 0,256 |

Таблица 1: Параметры образцов

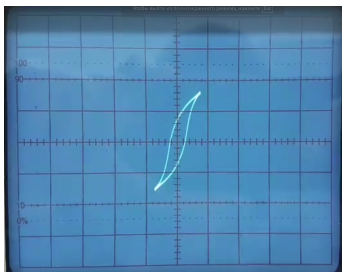
Фотографии петель гистерезиса и графики начальных кривых находятся на рис. 2. Отсюда



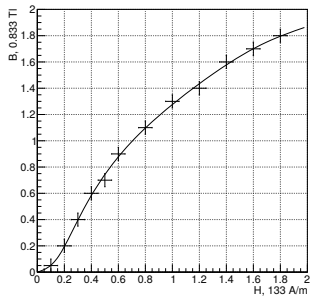
Fe-Si



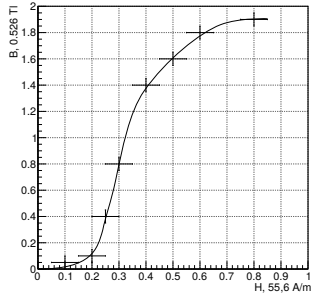
Пермаллой



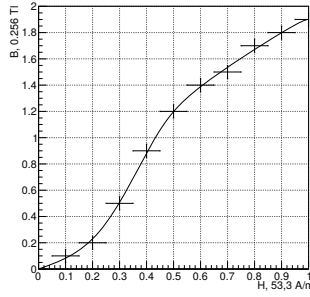
Феррит



Fe-Si



Пермаллой



Феррит

Рис. 2: Графическое представление экспериментальных данных

легко получаем искомые величины (таблица 2): Здесь величины были вычислены по опреде-

| | Fe-Si | Пермаллой | Феррит |
|-------------------|---------------|---------------|---------------|
| H_c , А/м | 67 ± 5 | 28 ± 2 | 10 ± 1 |
| B_r , Тл | $0,67\pm0,04$ | $0,84\pm0,03$ | $0,20\pm0,01$ |
| $\mu_{дифф\,m}ax$ | 20000 | 60000 | 15000 |

Таблица 2: Характеристики образцов

лениям с учетом известной цены деления, погрешность дифференциальной проницаемости не была посчитана, т.к. оценки довольно грубые (по 2 измеренным точкам, между которыми максимальный наклон).

5. Вывод

Цели работы были достигнуты, все величины были измерены. Хотя есть некоторые расхождения, значения, в целом, совпадают с табличными.