

# Изучение свойств ферромагнетиков.

13 сентября 2022 г.

## 1. Аннотация.

В работе измеряются величины остаточной индукции магнитного поля  $B_r$ , коэрцитивной силы  $H_c$ , амплитуда магнитной индукции  $B_s$  и напряжённости магнитного поля  $H_s$  предельной петли гистерезиса для ферромагнитных образцов из трёх различных материалов: феррита, пермаллоя и кремнистого железа — тороидной формы. Для измерений используются фигуры лиссажу, получаемые при помощи электронного осциллографа, подключённого к установке, возбуждающей колебания. Схему установки см. на рис. 1.

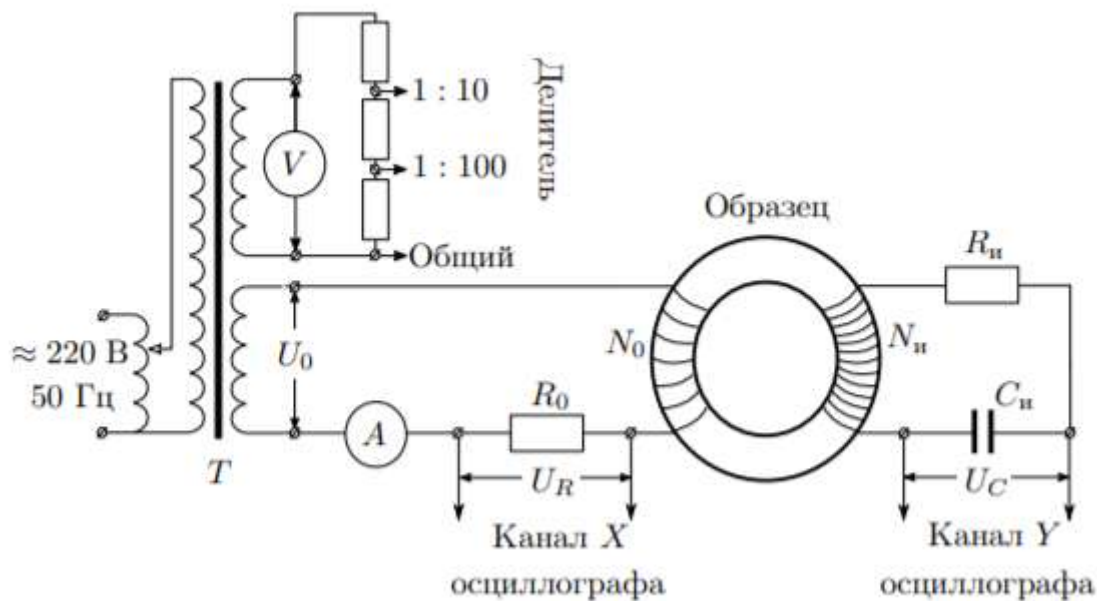


Рис. 1: Схема экспериментальной установки.

## 2. Теоретическое введение.

Для нахождения напряжённости поля в образце воспользуемся формулой, следующей из теоремы о циркуляции:

$$H = \frac{IN_0}{2\pi R}, \quad (1)$$

где  $I$  — величина намагничивающего тока,  $N_0$  — число витков в намагничивающей обмотке, а  $R$  — средний радиус тора.

Намагничивающий ток измеряется при помощи ЭО с использованием закона Ома (см. рис. 1). Окончательно, исходя из 1, получим

$$H = \frac{U_X N_0}{2\pi R R_0}, \quad (2)$$

Методика измерения магнитной индукции в образце основывается на формуле

$$B = \frac{R_i C_i}{S N_i} U_{out}, \quad (3)$$

где  $U_{out} = U_Y$  — выходное напряжение интегрирующей ячейки,  $R_i$  и  $C_i$  — её сопротивление и ёмкость соответственно,  $S$  — площадь поперечного сечения образца, а  $N_i$  — число витков в его вторичной обмотке.

Подключая  $U_X$  и  $U_Y$  к соответствующим каналам удаётся получить на экране осциллографа петлю гистерезиса. Для измерения её параметров используется сетка на экране.

Для калибровки масштаба шкал осциллографа в случае оси  $X$  используется синусоидальный ток эффективное значение которого  $I_{eff}$  измеряется независимо при помощи цифрового амперметра, пропускаемый через известное сопротивление  $R_0$  (катушка образца на время калибровки закорачивалась). Рабочая формула в этом случае:

$$K_X = \frac{2R_0 \sqrt{2} I_{eff}}{2x}, \quad (4)$$

где  $K_X$  — масштаб по оси  $X$ , а  $2x$  — длина горизонтального отрезка на экране. В случае же оси  $Y$  было произведено независимое (при помощи цифрового вольтметра и ЭО) измерение синусоидаль напряжения на клеммах "1/100" и "общий" делителя напряжений (см. рис. 1) (измерения также проводятся без подключения образца). Рабочая формула в этом случае:

$$K_Y = \frac{2\sqrt{2} U_{eff}}{2y}, \quad (5)$$

где  $K_Y$  — измеряемый масштаб,  $U_{eff}$  — эффективное напряжение, измеряемое вольтметром, а  $2y$  — длина вертикального отрезка на экране осциллографа.

Для выяснения характерного времени разрядки конденсатора интегрирующей ячейки воспользуемся формулой  $\tau_i = C_i R_i$ . Параметры  $C_i$  и  $R_i$  указаны на установке. Подставляя их в формулу находим, что  $\tau \gg \frac{1}{\omega}$ , где  $\omega$  — частота напряжения, указанная на установке. Используемые значения:  $R_i = 20$  кОм,  $C_i = 20$  мкФ  $\omega = 50$  Гц

### 3. Приборы и материалы

Указанные на установке параметры представлены в таблице

Таблица 1: Параметры измерительной установки, согласно маркировке

$R_0$ , Ом	$R_i$ , кОм	$C_i$ , мкФ
0,22	20	20

В следующей таблице указаны параметры используемых образцов

Таблица 2: Параметры используемых образцов, согласно маркировке

Материал	$N_0$ , шт	$N_i$ , шт	$S$ , см <sup>2</sup>	$2\pi R$ , см
Феррит	42	400	3,0	25
Пермаллой	20	400	0,76	13,3
Кремнистое железо	25	250	2,5	11

### 4. Результаты измерений и обработка данных.

Полученные результаты измерений представлены ниже. Под  $K_X$  и  $K_Y$  понимается масштаб соответствующей оси осциллографа, согласно значениям на ручках прибора.

Таблица 3: Измеренные значения напряжения

Материал	$h$ , дел/5	$K_Y$ , $\frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$	$w$ , дел/5	$K_X$ , $\frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$	$2X_c$ , дел/5	$K_X$ , $\frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$	$2Y_r$ , дел/5	$K_Y$ , $\frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$
Феррит	40	20	37	200	30	10	31	10
Пермаллой	20	50	10	50	46	10	18	50
Кремнистое железо	25	50	36	200	32	20	24	20

В таблице ниже представлены значения, полученные при калибровке ЭО. Под  $K_X$  и  $K_Y$  понимается масштаб соответствующей оси осциллографа, согласно значениям на ручках прибора.  $K_X^m$  и  $K_Y^m$  — рассчитанный по измерениям масштаб соответствующих осей ЭО.

Таблица 4: Проверка калибровки ЭО.

$K_X$ , $\frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$	$I_{eff}$ , мА	$K_X^m$ , $\frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$	$K_Y$ , $\frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$	$U_{eff}$ , мВ	$K_Y^m$ , $\frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$
10	152	9,45	10	27	9,54
20	306	19,05	20	55	19,44
50	765	47,60	50	136	48,08
200	1550	192,90	—	—	—

Исходя из этих данных, можно заключить, что осциллограф откалиброван достаточно точно, чтобы использовать в расчётах величины  $K_X$  и  $K_Y$ .

В таблице далее представлены рассчитанные по данным из таблицы 3 величины коэрцитивной силы ( $H_c$ ), остаточной индукции ( $B_r$ ) и амплитуд напряжённости ( $H_s$ ) и индукции поля ( $B_s$ ) для предельной петли гистерезиса каждого образца.

Таблица 5: Рассчитанные характеристики используемых образцов

Материал	Феррит	Пермаллой	Кремниевое железо
$H_c$ , $\frac{\text{А}}{\text{м}}$	22.9	31.4	66.1
$\sigma_{H_c}$ , $\frac{\text{А}}{\text{м}}$	1.4	1.9	4.0
$B_r$ , Тл	0.03	1.56	0.12
$\sigma_{B_r}$ , мТл	1.8	93.6	7.2
$H_s$ , $\frac{\text{А}}{\text{м}}$	1221	136	1033
$\sigma_H$ , $\frac{\text{А}}{\text{м}}$	73	8	62
$B_s$ , Тл	0.16	1.73	0.92
$\sigma_B$ , Тл	0.01	0.10	0.05

Оцененная относительная погрешность полученных величин составила  $\varepsilon \approx 11\%$

В следующей таблице можно найти максимальные значения дифференциальной магнитной проницаемости  $\mu_{max}$  для используемых материалов.

Таблица 6: Измеренные значения максимальной магнитной проницаемости

Материал	Феррит	Пермаллой	Кремнистое железо
$\mu_{max}$	1.50	1.65	0.77

На рис. 2 представлены кривые намагничивания, по которым производилась оценка

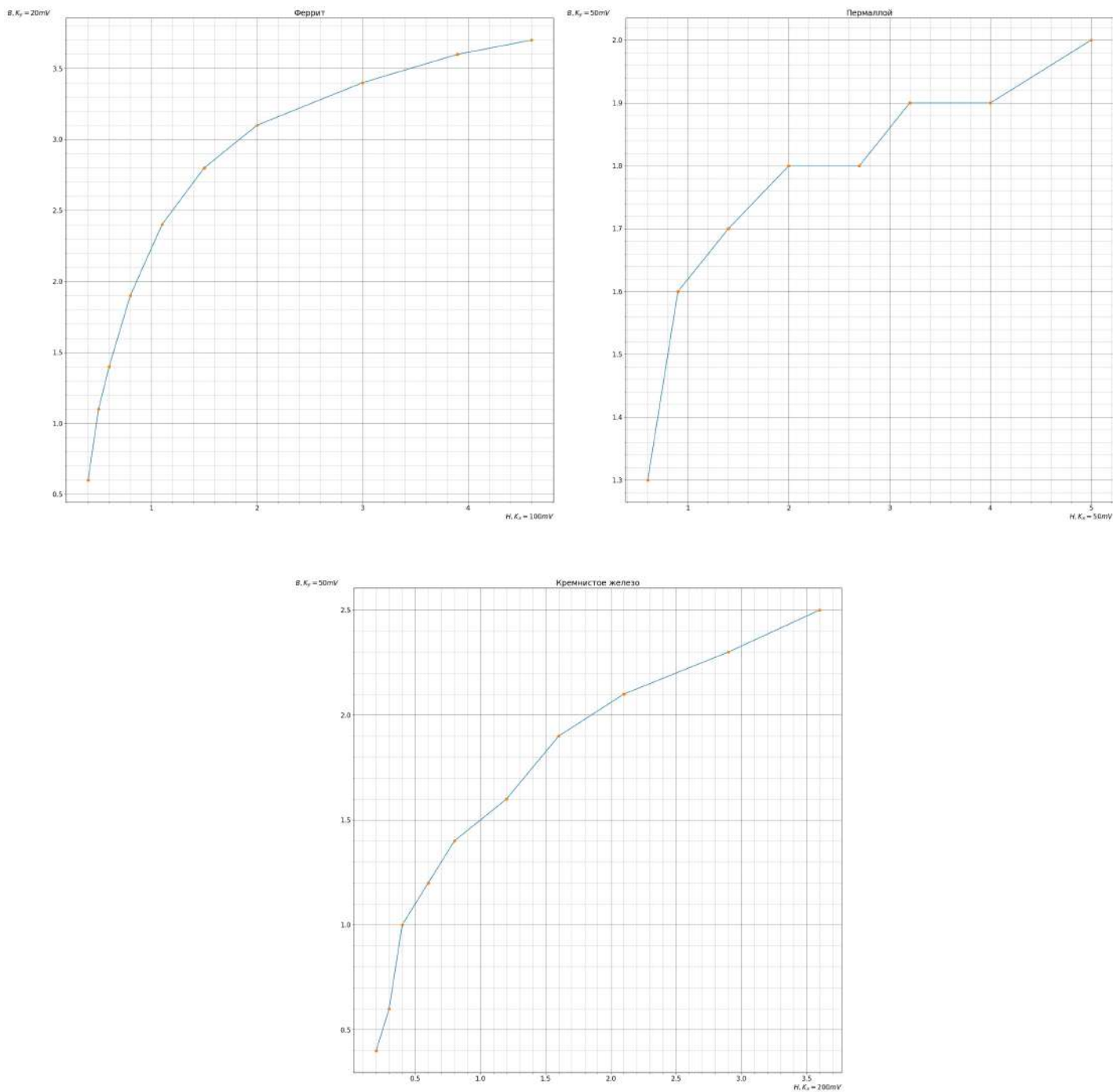


Рис. 2: кривые начального намагничивания изучаемых образцов

## 5. Обсуждение результатов и выводы

В работе удалось измерить магнитные свойства трёх ферромагнитных материалов. Основной вклад в погрешность вносит считывание данных с ЭО. Погрешность можно было бы существенно уменьшить, используя цифровой прибор.

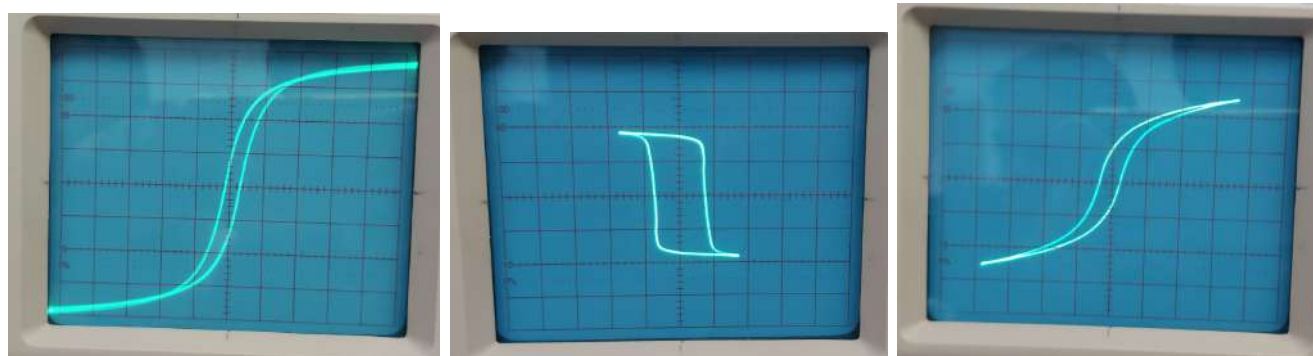


Рис. 3: Петли гистерезиса для феррита, пермаллоя и кремнистого железа соответственно