

Лабораторная работа 3.4.5

Петля гистерезиса (динамический метод)

Татаурова Юлия Романовна

19 ноября 2024 г.

Цель работы: изучение петель гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных полях.

Оборудование: автотрансформатор, понижающий трансформатор, интегрирующая цепочка, амперметр, вольтметр, электронный осциллограф, делитель напряжения, тороидальные образцы с двумя обмотками.

Теоретические сведения

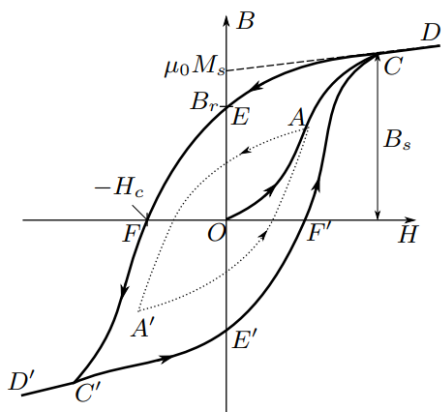


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

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.

Если к ферромагнитному образцу прикладывать переменное внешнее магнитное поле, то его состояние на плоскости HB будет изменяться по замкнутой кривой — петле гистерезиса. Пересечение предельной петли с вертикальной осью соответствует остаточной индукции B_r , пересечение с горизонтальной осью — коэрцитивному полю H_c .

Экспериментальная установка

Напряжение от сети (220 В, 50 Гц) с помощью трансформаторного блока Т, состоящего из автотрансформатора и реостата R_1 , включенного как потенциометр, подается на намагничивающую обмотку N_0 исследуемого образца.

В цепь катушки, на которую подается напряжение $U_0 = 6.3$ В, последовательно включены амперметр А и резистор R_0 . Напряжение на R_0 подается на канал Х осциллографа.

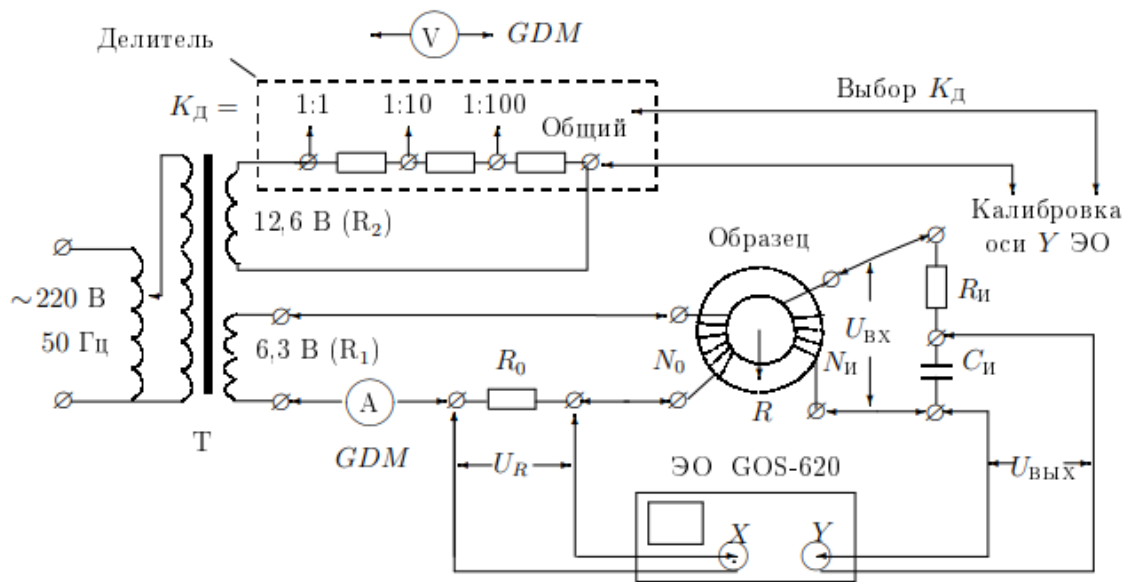


Рис. 2: Схема установки для намагничивания образцов

Напряженность H в образце прямо пропорциональна току I_0 по теореме о циркуляции:

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

Чтобы измерить магнитную индукцию B , с измерительной обмотки N на вход интегрирующей RC -цепочки подается напряжение $U_{\text{вх}}$, пропорциональное dB/dt , а с выхода снимается напряжение $U_C = U_{\text{вых}}$, пропорциональное B . Оно же и подается на канал Y осциллографа.

$$B = \frac{R_{\text{и}} C_{\text{и}}}{SN_{\text{и}}} U_{\text{вых}} \quad (2)$$

На экране появляется замкнутая кривая в некотором масштабе. Чтобы получить численные данные, необходимо откалибровать каналы X и Y осциллографа.

Калибровка канала X ЭО проводится с помощью амперметра при закороченной обмотке N_0 . Тогда амперметр измеряет эффективное значение силы тока $I_{\text{эф}}$. Ширина горизонтальной развертки на экране ЭО ($2x$) соответствует удвоенной амплитуде напряжения на R_0 . Тогда чувствительность канала X K_X :

$$K_X = 2\sqrt{2}R_0 I_{\text{эф}}/(2x) \quad (3)$$

Калибровка канала Y ЭО проводится с помощью вольтметра. Сигнал с обмотки понижающего трансформатора подается на делитель напряжения. Часть этого напряжения снимается с делителя с коэффициентом деления K (1:100) и подается на вход Y ЭО. Вольтметр измеряет напряжение $U_{\text{эф}}$ на этих же клеммах делителя. Если $2y$ - длина вертикальной прямой на ЭО, то тогда чувствительность канала Y K_Y :

$$K_Y = 2\sqrt{2}U_{\text{эф}}/(2y) \quad (4)$$

Измерение параметров интегрирующей ячейки. С обмотки на вход RC -цепочки подается синусоидальное напряжение $U_{\text{вх}}$ с частотой $\nu = \omega/2\pi = 50$ Гц. На канал Y ЭО

поочередно подаются сигналы со входа и выхода RC -цепочки. Тогда измерив амплитуды этих сигналов можно рассчитать постоянную времени $\tau = RC$ как:

$$\tau = RC = \frac{U_{\text{вх}}}{\omega U_{\text{вых}}} \quad (5)$$

Экспериментальные данные и вычисления

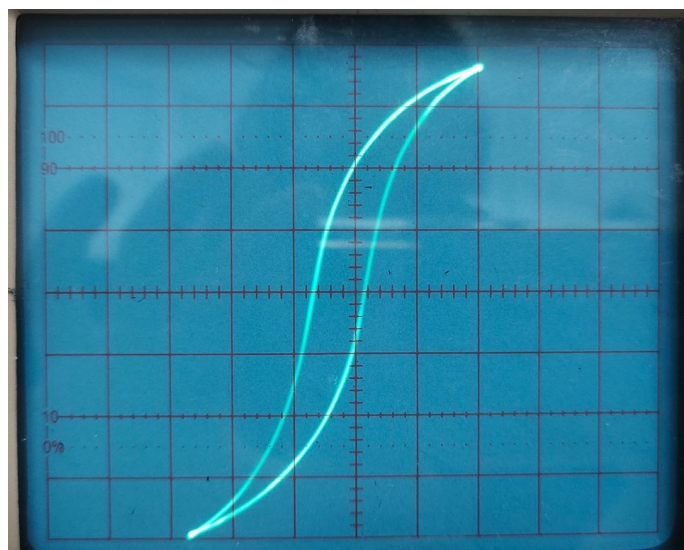
Для изучения гистерезиса в работе использовались тороиды из кремнистого железа, пермаллоя и феррита. Для них были получены петли гистерезиса и вычислены некоторые параметры.

$R_{\text{и}}, \text{кОм}$	$C_{\text{и}}, \text{мкФ}$	$R_0, \text{Ом}$
20	20	0.22

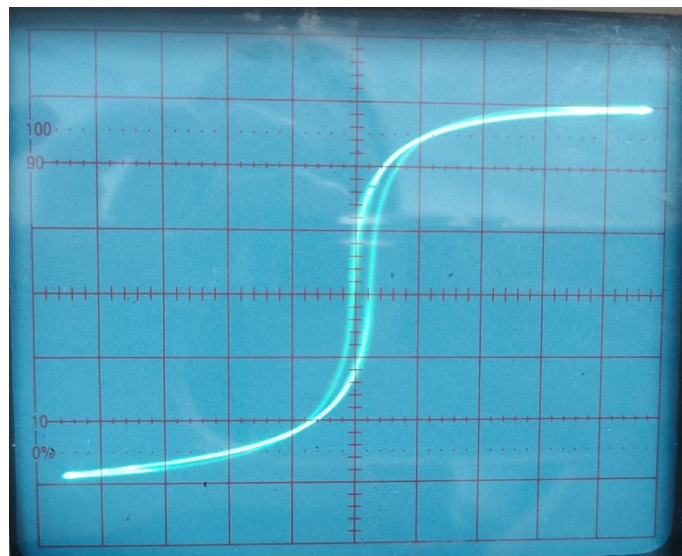
Таблица 1: Параметры установки

Материал	N_0	$N_{\text{и}}$	$S, \text{см}^2$	$2\pi R, \text{см}$
Кремнистое железо	20	200	2	11
Пермаллой	15	300	0.66	14.1
Феррит	45	400	3	25

Таблица 2: Параметры установки для различных материалов



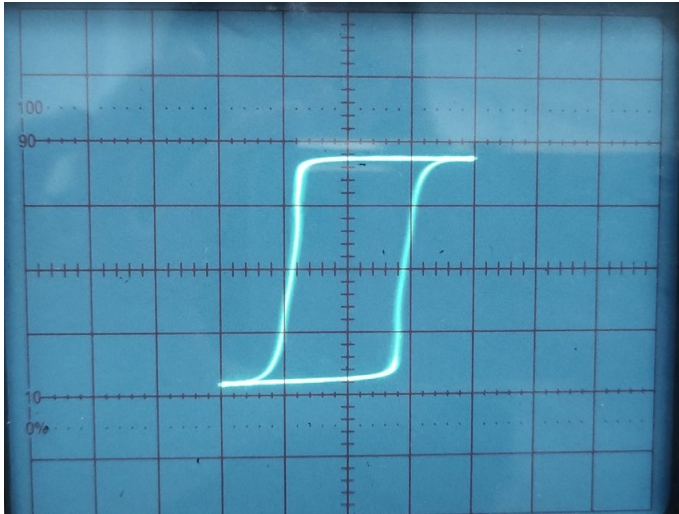
(a) Предельная петля гистерезиса кремнистого железа



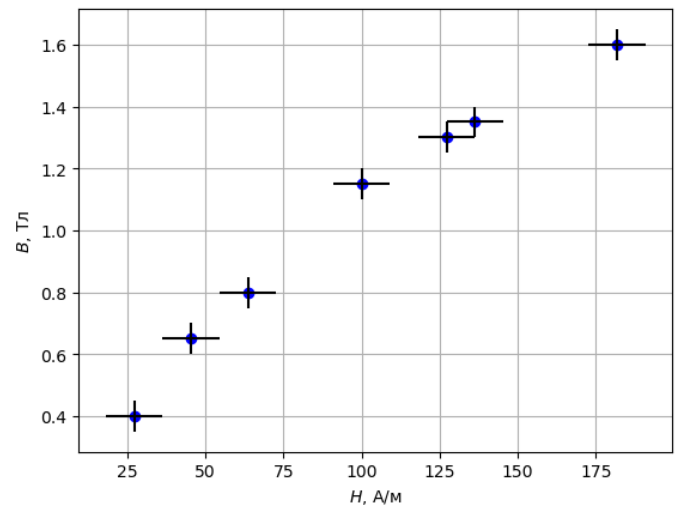
(b) Предельная петля гистерезиса феррита

Материал	$2X_s, \text{дел}$	$2Y_s, \text{дел}$	$2X_c, \text{дел}$	$2Y_r, \text{дел}$
Кремнистое железо	24 ± 0.5	38.5 ± 0.5	4.5 ± 0.5	14 ± 0.5
Пермаллой	20 ± 0.5	18 ± 0.5	10 ± 0.5	18 ± 0.5
Феррит	46 ± 0.5	29 ± 0.5	1.5 ± 0.5	11 ± 0.5

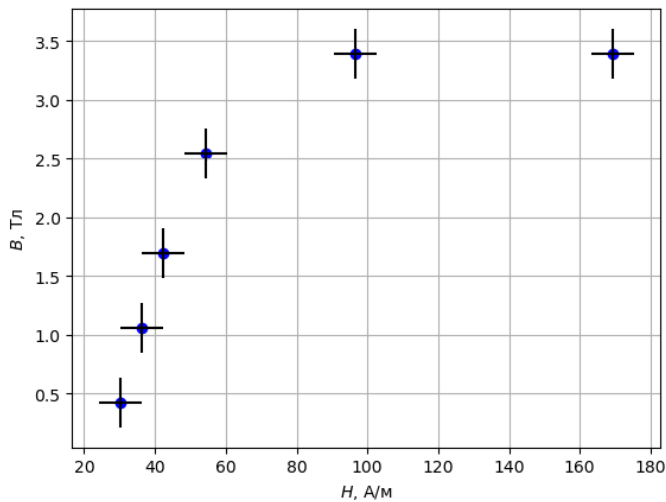
Таблица 3: Индукция и напряженность магнитного поля в разных ферромагнетиках



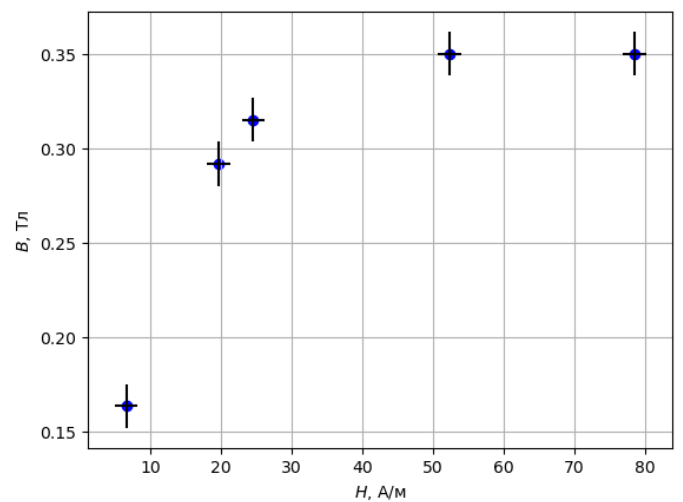
(a) Предельная петля гистерезиса пермаллоя



(b) Начальная кривая намагничивания для крем. железа



(c) Начальная кривая намагничивания для пермаллоя



(d) Начальная кривая намагничивания для феррита

По начальным кривым намагничивания оценим максимальные значения дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}} = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB}{dH} \big|_{H=0}$.

Материал	B_s , Тл	H_c , А/м	$\mu_{\text{нач}} \cdot 10^3$	B_r , Тл
Кремнистое железо	1.9 ± 0.5	63 ± 9	11 ± 3	0.7 ± 0.05
Пермаллой	3.8 ± 0.2	48 ± 6	11 ± 4	3.8 ± 0.2
Феррит	0.34 ± 0.05	1.6 ± 0.7	20 ± 2	0.12 ± 0.01

Таблица 4: Результаты вычислений

Теперь по формуле 5 посчитаем постоянную времени интегрирующей цепочки и сравним результаты с значением $\tau_0 = C_{\text{и}} R_{\text{и}} = 0.4$ с.

$$U_{\text{вых}} = 0.045 \text{ В}, U_{\text{вх}} = 4 \text{ В}, \nu = 50 \text{ Гц} \Rightarrow \tau = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}} 2\pi\nu} = 0.28 \pm 0.02 \text{ с}.$$

Результаты и выводы

Получили петли гистерезиса для кремнистого железа, пермаллоя и феррита. По ним построили начальные кривые намагничивания и вычислили индукцию насыщения B_s , остаточную индукцию B_r , коэрцитивное поле H_c и оценили дифференциальную магнитную проницаемость $\mu_{\text{диф}}$ для каждого ферромагнетика. Результаты представлены в таблице ниже вместе с табличными значениями для этих материалов.

Материал	B_s , Тл	H_c , А/м	$\mu_{\text{нач}} \cdot 10^3$	B_r , Тл
Кремнистое железо	1.9 ± 0.5	63 ± 9	11 ± 3	0.7 ± 0.05
Пермаллой	3.8 ± 0.2	48 ± 6	11 ± 4	3.8 ± 0.2
Феррит	0.34 ± 0.05	1.6 ± 0.7	20 ± 2	0.12 ± 0.01

Таблица 5: Экспериментальные результаты

Материал	B_s , Тл	H_c , А/м	$\mu_{\text{нач}} \cdot 10^3$	$\mu_{\text{max}} \cdot 10^3$
Кремнистое железо	1.95	40	0.5	7
Пермаллой	1.6	5.6	1.2	3.5
Феррит	0.3-0.4	4-100	0.5-20	-

Таблица 6: Табличные данные