

Петля гистерезиса (динамический метод)

Цель работы

Изучение петель гистерезиса ферромагнитных материалов с помощью осциллографа.

Оборудование

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

Экспериментальная установка

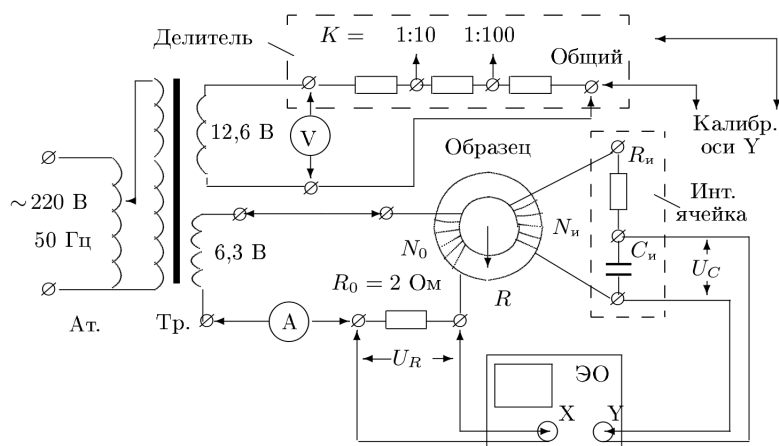


Рис. 1: Схема установки для исследования намагничивания образцов

Теоретическая часть

Действующее значение переменного тока в обмотке N_0 измеряется амперметром A (мультивольтметром GDM). Последовательно с амперметром включено сопротивление R_0 , напряжение с которого подаётся на вход X электронного осциллографа (ЭО). Это напряжение пропорционально току в обмотке N_0 , а следовательно и напряжённости H магнитного поля в образце.

Для измерения магнитной индукции B с измерительной обмотки N_i на вход интегрирующей RC -цепочки подаётся

напряжение $U_{\text{и}}(U_{\text{вх}})$, пропорциональное производной \dot{B} , а с выхода снимается напряжение $U_{\text{с}}(U_{\text{вых}})$, пропорциональное величине B , и подаётся на вход Y осциллографа.

Замкнутая кривая, возникающая на экране, воспроизводит в некотором масштабе (различном для осей X и Y) петлю гистерезиса. Чтобы придать этой кривой количественный смысл, необходимо установить масштабы изображения, т.е. провести калибровку каналов X и Y ЭО. Для этого, во-первых, надо узнать, каким напряжениям (или токам) соответствуют амплитуды сигналов, видимых на экране, и во-вторых — каким значениям B и H соответствуют эти напряжения (или токи).

Исследуемый сигнал подаётся на вход X ; длина $2x$ горизонтальной черты, наблюдаемой на экране, характеризует удвоенную амплитуду сигнала.

Если известна чувствительность усилителя K_X в вольтах на деление шкалы экрана, то удвоенная амплитуда напряжения определяется произведением

$$2U_{X,0} = 2x \cdot K_X.$$

Напряжение, подаваемое на ось Y , измеряется аналогично.

Калибровку осей осциллографа (K_X и K_Y) можно использовать для построения кривой гистерезиса в координатах B и H , зная величину сопротивления R_0 с которого снимается сигнал, можно определить чувствительность канала по току $K_{XI} = K_X/R_0$ [А/дел]; затем, используя формулу, определить цену деления шкалы в А/м. Таким же образом определяется цена деления оси Y :

$$m_x = \frac{2R_0\sqrt{2}I_{\text{ЭФ}}}{2x} \frac{\text{В}}{\text{дел}},$$

$$m_y = \frac{2\sqrt{2}KU_{\text{ЭФ}}}{2y} \frac{\text{В}}{\text{дел}}.1$$

Обработка результатов экспериментов

Рассчитаем значения m_X и m_Y и сравним с величинами K_X и K_Y , использованных при калибровке:

$$I_{\text{ЭФ}} = 1.74 \text{ А}; 2x = 9.6 \text{ дел} \Rightarrow m_x = 1.025 \frac{\text{В}}{\text{дел}}, K_X = 1 \text{ В}$$

$$U_{\text{ЭФ}} = 128.9 \text{ мВ}; 2y = 7.5 \text{ дел} \Rightarrow m_y = 48.6 \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}, K_Y = 50 \text{ мВ}$$

Рассчитаем постоянную времени $\tau = RC$, рассчитанную по формуле $\tau = U_{\text{ВХ}}/(\Omega U_{\text{ВЫХ}})$, с расчётом через параметры $R_{\text{И}}$ и $C_{\text{И}}$, указанные на установке:

$$U_{\text{ВХ}} = 7.2 \text{ В}; U_{\text{ВЫХ}} = 0.057 \text{ В} \Rightarrow \tau = 0.402 \text{ с}$$

$$R_{\text{И}} = 20 \cdot 10^3 \text{ Ом}; C_{\text{И}} = 20 \cdot 10^{-6} \Rightarrow \tau = 0.4 \text{ с}$$

$$R = 20 \cdot 10^3 \text{ Ом} \gg \frac{1}{\Omega C} = 159 \text{ с}$$

С достаточной точностью выполняется условие $R \gg 1/(\Omega C)$.

Для каждого образца рассчитаем цену деления ЭО: для оси X — в А/м на одно деление, для оси Y — в Тс на одно деление. Рассчитаем коэрцитивную силу H_c и индукцию насыщения B_S для каждого образца, оценим максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{\text{диф}}$ по начальным кривым намагничивания:

Пермаллой (Fe - Ni)

$$N_0 = 20 \text{ в.}; N_{\text{И}} = 300 \text{ в.}; S = 0.76 \text{ см}^2; 2\pi R = 13.3 \text{ см}$$

$I, \text{ А}$	$x, \text{ дел}$	$y, \text{ дел}$
0.129	4.1	2.7
0.111	3	1.7
0.96	2.5	1.3
0.85	2.2	1.0
0.67	1.6	0.6

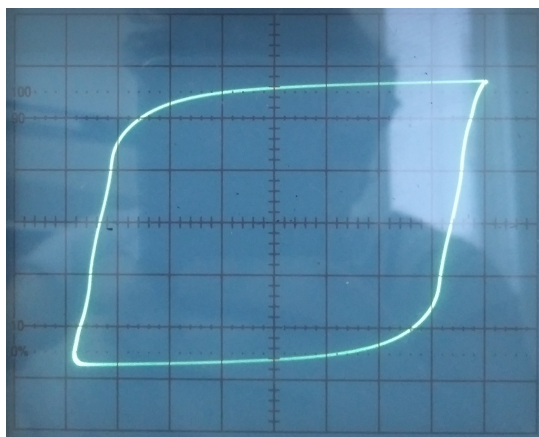


Рис. 2: Максимальная петля гистерезиса для пермаллоя

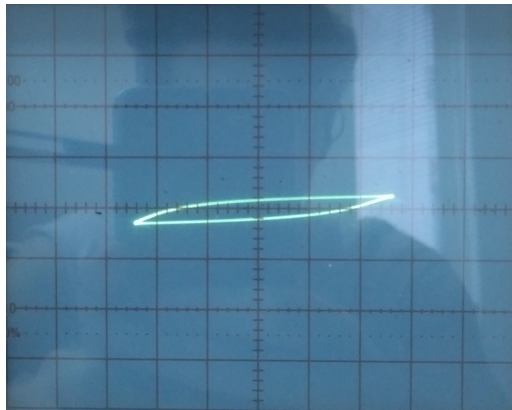


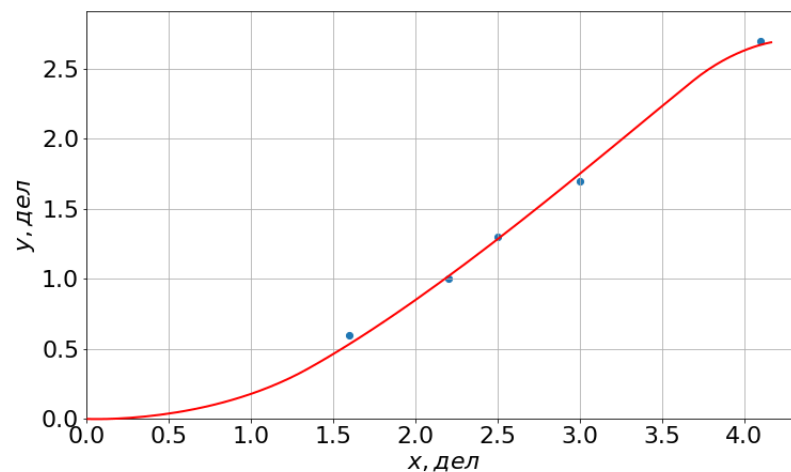
Рис. 3: Петля гистерезиса меньшего размера для пермаллоя

$$K_X = 0.1 \text{ В}; K_Y = 50 \text{ мВ}; I_{\Phi} = 0.129 \text{ А}$$

$$2x(c) = 8 \text{ дел}; 2y(s) = 5.2 \text{ дел}$$

$$H = \frac{IN_0}{2\pi R} = 7.5 \frac{\text{А}}{\text{м}}; H_c = 0.23 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

$$B = \frac{R_{\text{И}} C_{\text{И}} U_{\text{ВЫХ}}}{S N_{\text{И}}} = 0.877 \text{ Тл}; B_s = 1.4 \text{ Тл}$$



Кремнистое железо (Fe - Si)

$$N_0 = 25 \text{ в.}; N_{\text{И}} = 250 \text{ в.}; S = 2.00 \text{ см}^2; 2\pi R = 11.0 \text{ см}$$

I, A	$x, \text{ дел}$	$y, \text{ дел}$
1.384	4.2	3.4
0.986	2.8	2.7
0.799	2.3	2.4
0.561	1.6	2.0
0.345	1.0	1.4

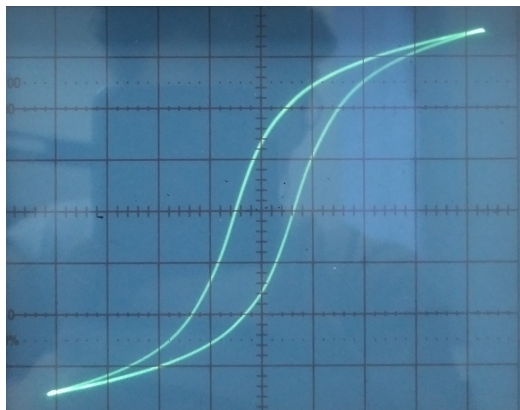


Рис. 4: Максимальная петля гистерезиса для кремнистого железа

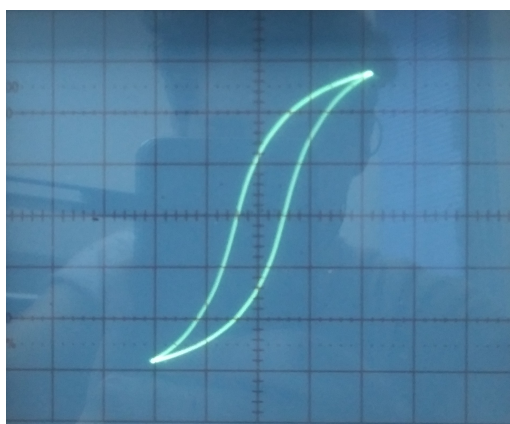


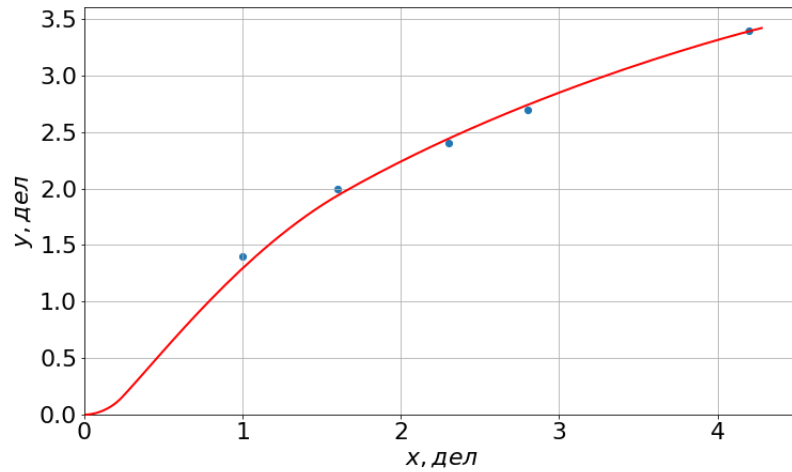
Рис. 5: Петля гистерезиса меньшего размера для кремнистого железа

$$K_X = 1 \text{ В}; K_Y = 50 \text{ мВ}; I_{\text{ЭФ}} = 0.298 \text{ А}$$

$$2x(c) = 8.3 \text{ дел}; 2y(s) = 6.7 \text{ дел}$$

$$H = \frac{IN_0}{2\pi R} = 113.64 \frac{\text{А}}{\text{м}}; H_c = 4.5 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

$$B = \frac{R_{\text{И}} C_{\text{И}} U_{\text{ВЫХ}}}{S N_{\text{И}}} = 0.4 \text{ Тл}; B_s = 1.1 \text{ Тл}$$



Феррит

$N_0 = 42$ в.; $N_{II} = 400$ в.; $S = 3.00$ см²; $2\pi R = 25.0$ см

I, A	$x, \text{ дел}$	$y, \text{ дел}$
0.297	-4.1	-2.5
0.248	-3.5	-2.3
0.219	-3.0	-2.1
0.191	-2.7	-2.0
0.166	-2.3	-1.7
0.068	-1.0	-0.8

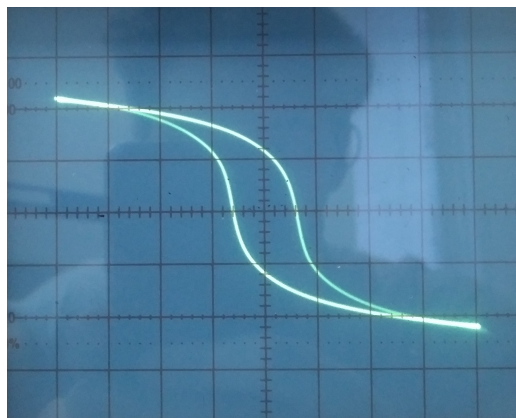
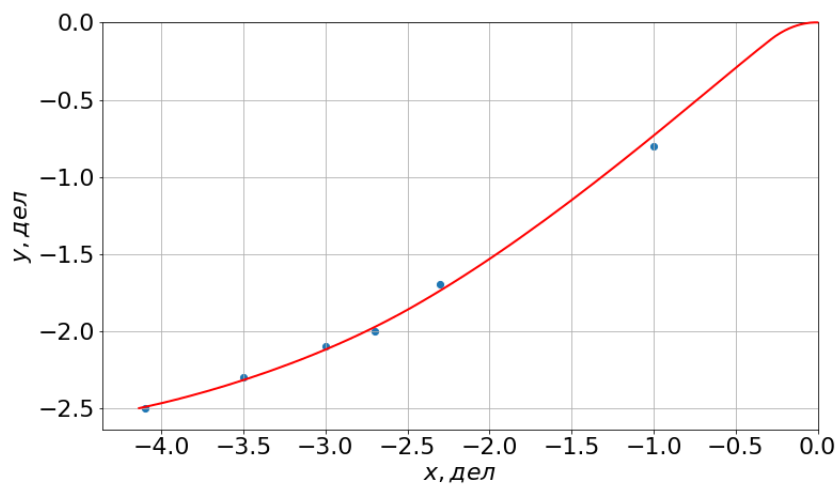


Рис. 6: Петля гистерезиса для феррита

$$K_X = 1 B; K_Y = 50 \text{ мВ}; I_{\Phi} = 0.298 A$$

$$2x(c) = 8.3 \text{ дел}; 2y(s) = 6.7 \text{ дел}$$
$$H = \frac{IN_0}{2\pi R} = 113.64 \frac{A}{м}; H_c = 4.5 \frac{A}{м}$$
$$B = \frac{R_{и}C_{и}U_{вых}}{SN_{и}} = 0.4 \text{ Тл}; B_s = 1.1 \text{ Тл}$$



Вывод

Петля гистерезиса является качественной характеристикой намагничивания ферромагнетика, показывая такие эффекты, как домены, скачки Баркгаузена (которые можно было бы увидеть при значительно большем масштабе, но в любом случае), в том числе площадь петли пропорциональна энергии, теряемой в единице объёма вещества за время цикла.