

Отчет о выполненной лабораторной работе 3.4.5

Воронин Денис, Б04-407

September 13, 2025

Петля гистерезиса (динамический метод)

Цели 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.

1 Введение

Помимо диа- и парамагнетиков, которые слабо реагируют на внешнее магнитное поле, в природе существуют вещества, способные сильно намагничиваться даже в небольших полях. Такие вещества относят к классу ферромагнетиков.

Зависимость намагниченности M от напряжённости магнитного поля H у всех ферромагнетиков оказывается нелинейной: магнитная восприимчивость χ не является константой и зависит от H .

Предположим, что намагниченность элемента среды пропорциональна некоторому эффективному полю $H_{эфф}$, складывающемуся из поля H в данной точке, созданного сторонними токами, и среднего «коллективного» поля, пропорционального величине намагниченности M (1):

$$M = \chi_{пар} H_{эфф}$$

$$H_{эфф} = H + \beta M$$

где $\chi_{пар}$ парамагнитная восприимчивость отдельного атома, β — некоторая безразмерная константа, определяемая из опыта.

Модель среднего поля позволяет уточнить закон Кюри. Определяя магнитную восприимчивость по-прежнему как $\chi = \frac{M}{H}$ найдем из 1:

$$\chi = \frac{1}{\chi_{пар}^{-1} - \beta} \propto \frac{1}{T - \Theta} \quad (2)$$

где параметр $\Theta = \beta \frac{m_a^2 \mu_0 n}{3k_B}$ имеет размерность температуры.

Соотношение 2 называют законом Кюри–Вейсса. В частности, этот закон предсказывает существование особой точки, в которой χ обращается в бесконечность. Действительно, существует температура Θ_k , называемая точкой Кюри, в которой имеет место фазовый переход (2-го рода) между парамагнитным (при $T > \Theta_k$) и ферромагнитным (при $T < \Theta_k$) состояниями среды.

2 Теоретические сведения

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 рисунок 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 (например, петля AA' , обозначенная пунктиром на рисунке 1). Если амплитуда напряжённости достаточно велика, то образец будет периодически достигать *насыщения*, что на рисунке 1 соответствует кривой $CERC'E'F'C$ (*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 рисунке 1), лежат на *начальной кривой намагничивания* (OAC).

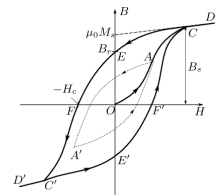


Рисунок 1: Теоретический вид петли гистерезиса.

Магнитную индукцию B удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при измерении 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

$$|B| = \frac{1}{SN} \int \varepsilon dt$$

Таким образом, для определения B нужно проинтегрировать сигнал, наведённый меняющимся магнитным полем в измерительной катушке, намотанной на образец.

Для интегрирования в работе используется *интегрирующая RC-цепочка*. Входное напряжение от источника $U_{\text{вх}}(t)$ подаётся на последовательно соединённые резистор $R_{\text{и}}$ и конденсатор $C_{\text{и}}$. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}(t)$ снимается с конденсатора. Предположим, что (1) сопротивление источника мало по сравнению с $R_{\text{и}}$; (2) выходное сопротивление (сопротивление на входе осциллографа), напротив, велико: $R_{\text{вых}} \gg R_{\text{и}}$; и, наконец, (3) сопротивление $R_{\text{и}}$ достаточно велико, так что почти всё падение напряжения приходится на него, а $U_{\text{вых}} \ll U_{\text{вх}}$. В таком случае ток цепи равен $I = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}}{R_{\text{и}}} \approx \frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{и}}}$, и входное и выходное сопротивление связаны соотношением

$$U_{\text{вых}} \frac{q}{C_{\text{и}}} = \frac{1}{C_{\text{и}}} \int_0^t I dt \approx \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \int_0^t U_{\text{вх}} dt,$$

где $\tau_{\text{и}} = R_{\text{и}} C_{\text{и}}$ – постоянная времени RC-цепочки. Для индукции поля получаем

$$|B| = \frac{1}{SN} \int U_{\text{вых}} dt = \frac{\tau_{\text{и}}}{SN} U_{\text{вх}}.$$

Уточним, когда наше предположение справедливо. Необходимо, чтобы было выполнено

$$U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = \frac{\frac{1}{\omega C_{\text{и}}}}{\sqrt{R_{\text{и}}^2 + \frac{1}{\omega^2 C_{\text{и}}^2}}},$$

то есть $R \gg \frac{1}{\omega C}$, что равносильно $\tau_{\text{и}} = R_{\text{и}} C_{\text{и}} \gg \frac{1}{\omega}$ (характерное время релаксации много больше периода вынужденных колебаний).

3 Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2.

Действующее значение переменного тока в обмотке N0 измеряется амперметром А (мультиметром GDM). Последовательно с амперметром включено сопротивление R_0 , напряжение с которого подается на вход X электронного осциллографа (ЭО). Это напряжение пропорционально току в обмотке N_0 , а следовательно и напряженности H магнитного поля в образце.

Для измерения магнитной индукции B с измерительной обмотки N на вход интегрирующей RC -цепочки подается напряжение U ($U_{\text{ВХ}}$), пропорциональное производной \dot{B} , а с выхода снимается напряжение $U_C(U)$, пропорциональное величине B , и подается на вход Y осциллограа. 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.

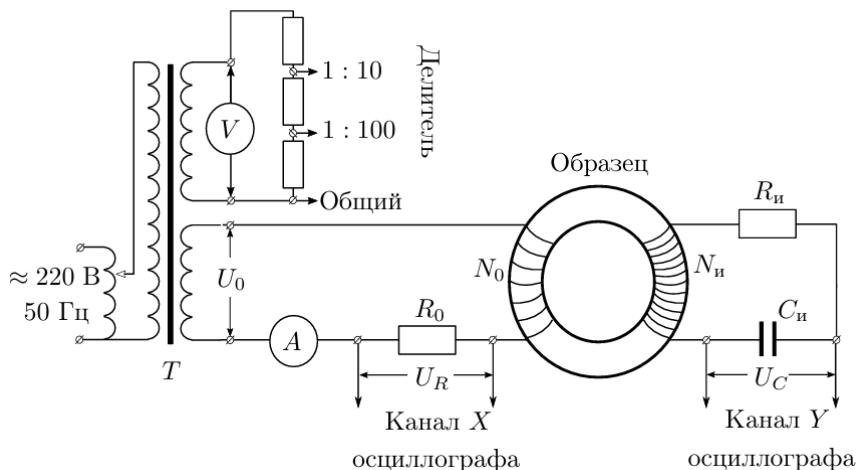


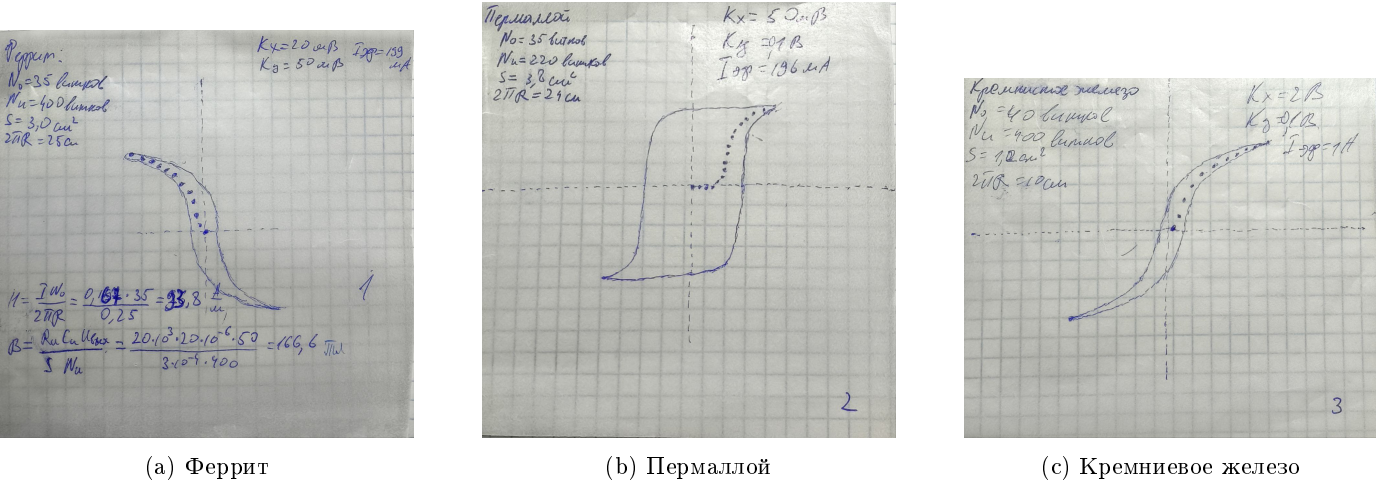
Рисунок 2: Схема установки для исследования намагничивания образцов

4 Обработка результатов

4.1 Измерение петли гистерезиса

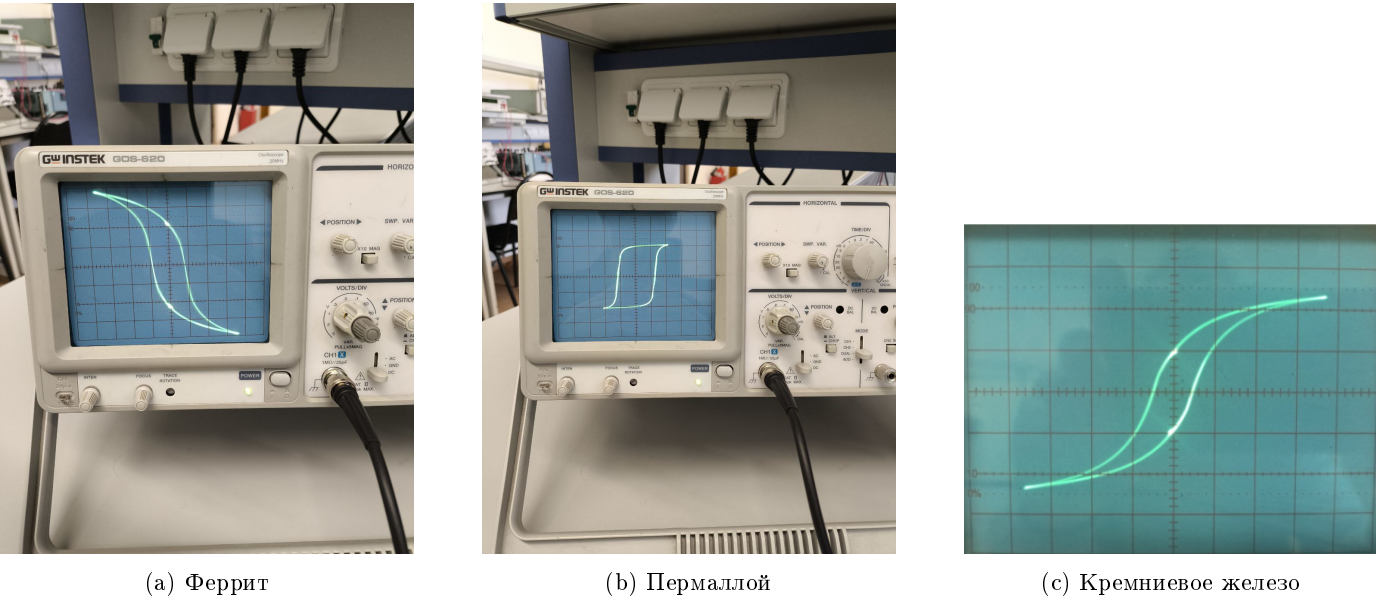
Подберем ток питания в намагничивающей обмотке, так чтобы была видна предельная петля гистерезиса. Затем уменьшим ток до исчезновения усов.

Подберем коэффициенты усиления для улучшения картинки на осциллографе. Далее зарисуем и сфотографируем предельную петлю(рис.3 и рис.4)



(a) Феррит (b) Пермаллой (c) Кремниевое железо

Рисунок 3: Рисунки на кальке



(a) Феррит (b) Пермаллой (c) Кремниевое железо

Рисунок 4: Фотографии с осциллографа

Измерим полную ширину и высоту предельной петли ($2X_s 2Y_s$), соответствующие удвоенной амплитуде колебаний напряженности H_s и индукции B_s

	Феррит	Пермаллой	Кремниевое железо
$2X_s$	20 дел	22 дел	26 дел
$2Y_s$	20 дел	22 дел	8 дел

Измерим двойные амлитуды для коэртитивного поля $2X_c$ и остаточной индукции $2Y_r$

	Феррит	Пермаллой	Кремниевое железо
$2X_c$	4 дел	12 дел	3 дел
$2Y_r$	6 дел	20 дел	8 дел

Рассчитаем цену деления шкалы ЭО для петли в $\frac{A}{м}$ для Феррита и для других материалов:

$$H = \frac{IN_0}{2\pi R} = \frac{0,67 * 35}{0,25} = 9,3 \pm 0,9 \frac{A}{м * дел}$$

$$B = \frac{R_n C_n U_{вых}}{SN_n} = \frac{20 * 10^3 * 20 * 10^{-6} * 50}{3 * 10^{-4} * 400} = 0,167 \pm 0,2 \frac{Тл}{дел}$$

- Кремниевое железо:

$$H = 90,9 \pm 0,9 \frac{A}{м}, \quad B = 0,20 \pm 0,2 \frac{Тл}{дел}$$

- Пермаллой:

$$H = 10,6 \pm 0,9 \frac{A}{м}, \quad B = 1,01 \pm 0,2 \frac{Тл}{дел}$$

4.2 Проверка калибровки осциллографа

Проведем калибровку горизонтальной оси. Закоротим обмотку и с помощью автотрансформатора подберем ток, чтобы горизонтальная прямая занимала большую часть.

Рассчитаем чувствительность канала X и сравним с выбранным коэффициентом K_x :

$$K_x = \frac{2R_0 \sqrt{2} I_{эф}}{2x} = 17,0 \pm 0,1 \frac{мВ}{дел} \text{ (для феррита)}$$

$$K_x = \frac{2R_0 \sqrt{2} I_{эф}}{2x} = 46,0 \pm 0,1 \frac{мВ}{дел} \text{ (для пермаллоя)}$$

$$K_x = \frac{2R_0 \sqrt{2} I_{эф}}{2x} = 21,1 \pm 0,1 \frac{В}{дел} \text{ (для кремнистого железа)}$$

Для проверки калибровки оси Y соединим вход Y осциллографа с клеммами делителя 1/100 и общий

Подберем коэффициент K_y с помощью трансформатора и далее с помощью мультиметра найдем величину $U_{эф}$. Далее по формуле рассчитаем чувствительность:

$$K_{y1} = \frac{2\sqrt{2} U_{эфф}}{2y} = \frac{2\sqrt{2} * 0,027}{6,4} = 35,3 \pm 0,1 \frac{мВ}{дел}$$

$$K_{y2} = \frac{2\sqrt{2} U_{эфф}}{2y} = \frac{2\sqrt{2} * 0,155}{5,4} = 81,1 \pm 0,1 \frac{мВ}{дел}$$

$$K_{y3} = \frac{2\sqrt{2} U_{эфф}}{2y} = \frac{2\sqrt{2} * 0,151}{5,8} = 73,2 \pm 0,1 \frac{мВ}{дел}$$

4.3 Определение τ - постоянной времени интегрирующей ячейки

Отключим канал X и подберем напряжение, чтобы прямая занимала большую часть экрана. Далее по формуле найдем входное напряжение:

$$U_{вх} = 2y * K_y = 6,8 * 2 = 13,6 \pm 0,2 В$$

Не меняя тока, соединим Y с выходом ячейки и найдем аналогичным образом $U_{вых}$:

$$U_{вых} = 2y * K_y = 6,8 * 20 * 10^{-3} = 0,108 \pm 0,01 В$$

Рассчитаем τ :

$$\tau = \frac{U_{вх}}{\omega * U_{вых}} = \frac{13,6}{0,108 * 6,28 * 50} = 0,401 \pm 0,012 с$$

$$\tau_{RC} = R_n * C_n = 0,4 с$$

Вывод

Изучил петлю гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных полях. Проверил теоретические значения со значениями, полученными на практике. Произвел работу с осциллографом и мультиметром для снятия значений. Сделал все необходимые расчеты и записал их.

Ампл.	Термаллой	Fe-Si	Феррит
$H_{max}, \frac{A}{M}$	0,20 \pm 0,03	2,4 \pm 0,8	0,186 \pm 0,031
$H_c, \frac{A}{M}$	0,12 \pm 0,07	0,27 \pm 0,28	0,0186 \pm 0,0014
B_r, T	0,020 \pm 0,005	0,005 \pm 0,001	0,0001 \pm 0,0043
B_s, T	0,020 \pm 0,008	0,002 \pm 0,001	0,003 \pm 0,001
$\mu_{нач}$	0,10 \pm 0,05	2,50 \pm 0,05	3,80 \pm 0,05
μ_{max}	3,30 \pm 0,05	2,90 \pm 0,05	4,00 \pm 0,05

Таблица 1: Параметры магнитных материалов