

Петля гистерезиса (динамический метод) (3.4.5)

Стеценко Георгий, Б02-312

1 Цель работы

Изучение петель гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных полях.

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).

Измерение магнитной индукции. 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

$$|B| = \frac{1}{SN} \int \mathcal{E} dt.$$

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

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

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

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

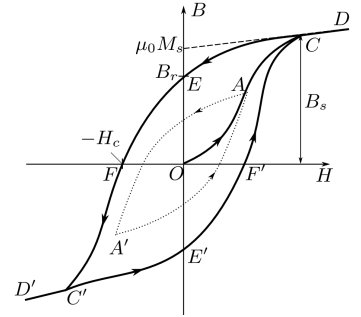


Рис. 1: Теоретический вид петли гистерезиса.

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 Методика измерений и результаты

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

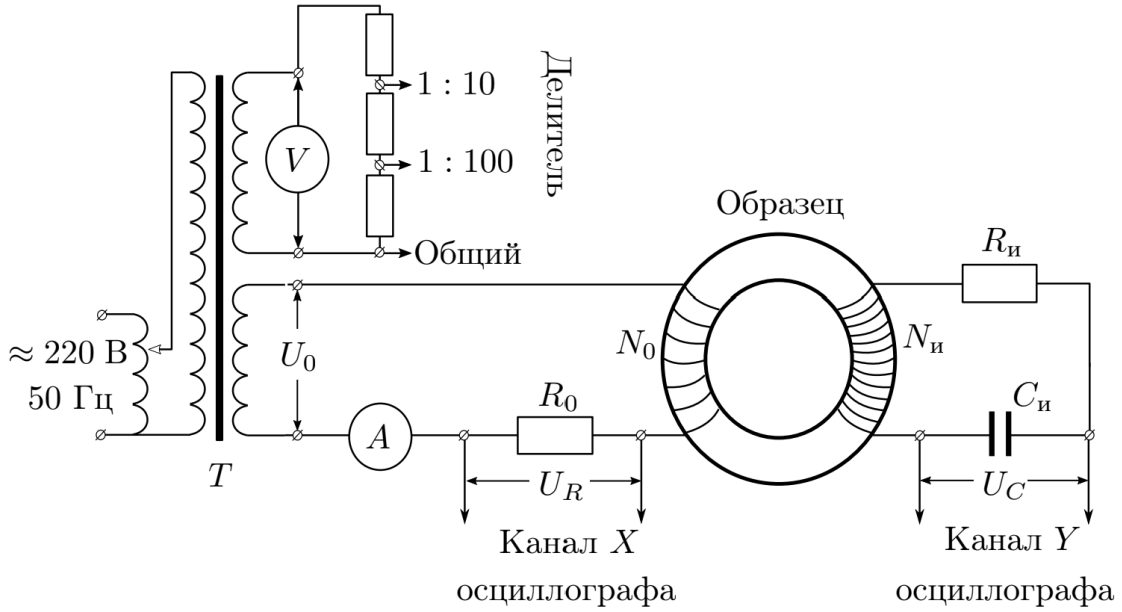


Рис. 2: Схема установки

Пользуясь уравнениями Максвелла, поймём, как в нашей работе связаны мгновенные значения напряжений с индукцией и напряжённостью магнитного поля.

$$H = \frac{N_0 U_R}{R_0 \cdot 2\pi R} \quad (1)$$

$$B = \frac{R_{\text{и}} C_{\text{и}} U_C}{N_{\text{и}} S} \quad (2)$$

3.1 Подготовка. Проверка калибровки осциллографа

Горизонтальная ось. Здесь контакты, которые шли на намагничивающий контур N_0 закорачиваются. При масштабе клетки в 10 mV действующему значению тока в 56.12 mA через резистор $R_0 = 0.3 \Omega$ соответствовал размах на осциллографе, равный 5.0 клеткам.

$$I_{\text{osc}}^{\text{д}} = \frac{50 \text{ mV}}{2 \cdot 0.3 \Omega} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 58.9 \text{ mA},$$

что достаточно хорошо совпадает с измеренным на амперметре действующим значением. Корректировка значений с осциллографа не требуется.

Вертикальная ось. Здесь измерение происходит в калибровочном контуре (верхняя вторичная обмотка на трансформаторе T). При масштабе клетки в 50 mV действующему значению напряжения в 13.5 V на калибровочном делителе $1:100$ соответствовал размах на осциллографе, равный 7.8 клеткам.

$$U_{osc}^d = 7.8 \cdot 50 \text{ mV} \cdot 100 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 13.8 \text{ V},$$

что достаточно хорошо совпадает с измеренным на вольтметра действующим значением. Корректировка значений с осциллографа не требуется.

3.2 Подготовка. Проверка предположения о линейности переходной характеристики интегрирующей цепи

Подадим на участок RC переменное напряжение, и снимем показания напряжения на всём участке и только на конденсаторе. $2U_{C.m} = 7.6 \cdot 20 \text{ mV} = 152 \text{ mV}$, $2U_{RC.m} = 3.8 \cdot 5 \text{ V} = 19 \text{ V}$, $\frac{Z_C}{Z_{CR}} \approx \frac{1}{\omega \cdot CR} \approx 0.8\% \ll 1$. Значит, наше предположение выполнено, и CR -делитель действительно можно считать интегрирующей цепочкой.

3.3 Петля гистерезиса на экране осциллографа

На рис. 2 изображена схема экспериментальной установки. Напряжение с латра, работающего в диапазоне $0 \sim 250 \text{ V}$, понижается на трансформаторе T и подаётся на контур с исследуемой катушкой. Ток в первичной обмотке, пропорциональный напряженности магнитного поля, измеряется токоизмерительным резистором R_0 , а интеграл ЭДС индукции во вторичной обмотке, пропорциональное индукции магнитного поля, измеряется по величине напряжения на конденсатора C_n в интегрирующей цепочке.

Перечислим свойства исследуемых катушек:

Таблица 1: Характеристики катушек

Материал	N_0	N_n	$S^2, \text{ см}^2$	$2\pi R, \text{ см}$
Феррит	35	400	3.0	25
Пермаллой	40	200	3.8	24
Крем. железо	25	250	2.0	11

Снимем предельные петли гистерезиса и будем медленно их уменьшать, чтобы по концам петель восстановить кривую намагничивания. Результаты измерений приведены в векторизированном виде на рис. 3.

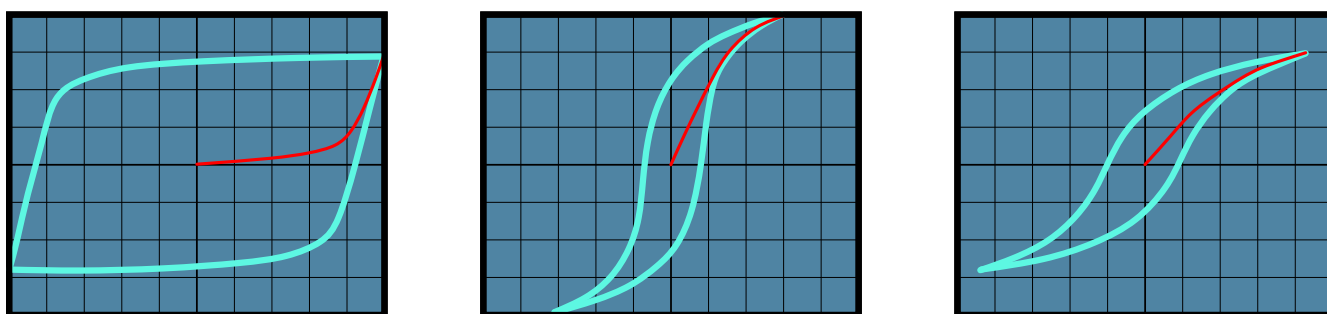


Рис. 3: Кривые гистерезиса (зелёным цветом) и кривые намагничивания (красным).

Слева направо: пермаллой, кремнистое железо, феррит

Видно, что была допущена ошибка при измерении для пермаллоя: начальная кривая намагничивания не выходит на насыщение. Это означает, что была снята не предельная петля гистерезиса,

а одна из меньших. Тем не менее, дифференциальную магнитную проницаемость всё ещё можно измерить.

Пользуясь соотношениями (1) и (2), пересчитаем масштаб по осям для каждой катушки:

Таблица 2: Коэффициенты усиления

Материал	$K_x, \text{mV/div}$	$K_y, \text{mV/div}$	$B_0, \text{mT/div}$	$H_0, \text{A/m/div}$
Пермаллой	10	50	52.6	11.1
Крем. железо	20	10	80.0	15.2
Феррит	50	50	167	23.3

Тогда по графикам найдём и искомые величины:

Таблица 3: Полученные характеристики сплавов

Материал	$H_c, \text{A/m}$	B_r, mT	$\mu_{\text{dif}}^{\text{max}}, 1$	B_s, mT
Пермаллой	–	–	9800	–
Крем. железо	12	184	8800	360
Феррит	21	220	6300	580

4 Обсуждение результатов и вывод

Были получены кривые гистерезиса для катушек из трёх различных материалов. Для них так же были построены кривые начального намагничивания. В ходе обработки обнаружилось, что для одного из образцов точно была снята характеристика, далёкая от предельной. Тем не менее, была показана возможность пользоваться описанной схемой для построения петли гистерезиса в реальном времени и получены некоторые численные результаты, которые хоть и достаточно далеки от табличных, всё же близки к ним по порядку.