

3.4.5 (4.14). ПЕТЛЯ ГИСТЕРЕЗИСА (ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД) ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ

23 октября 2021 г.

В работе используются: автотрансформатор, понижающий трансформатор (или реостат), интегрирующая ячейка, амперметр и вольтметр (мультиметры), резистор, делитель напряжения, электронный осциллограф, тороидальные образцы с двумя обмотками.

К ферромагнетикам принадлежат железо, никель, кобальт, гадолиний, их многочисленные сплавы с другими металлами. К ним примыкают ферриты — диэлектрики со структурой антиферромагнетика.

Магнитная индукция B и напряжённость магнитного поля H в ферромагнитном материале неоднозначно связаны между собой: индукция зависит не только от напряжённости, но и от предыстории образца. Связь между индукцией и напряжённостью поля типичного ферромагнетика иллюстрирует рис. 1.

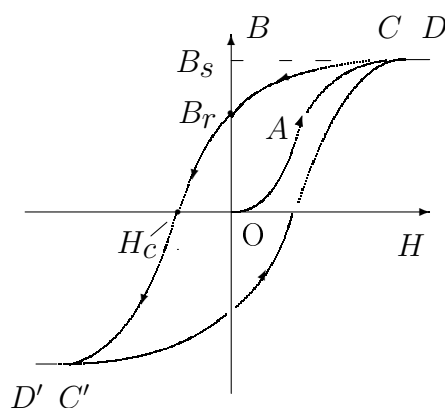


Рис. 1. Петля гистерезиса ферромагнетика

Экспериментальная установка. Схема установки изображена на рис. 3. Напряжение от сети (220 В, 50 Гц) с помощью трансформаторного блока Т, состоящего из регулировочного автотрансформатора и разделительного понижающего трансформатора (или реостата R_1 , включённого как потенциометр), подаётся на намагничивающую обмотку N_0 исследуемого образца.

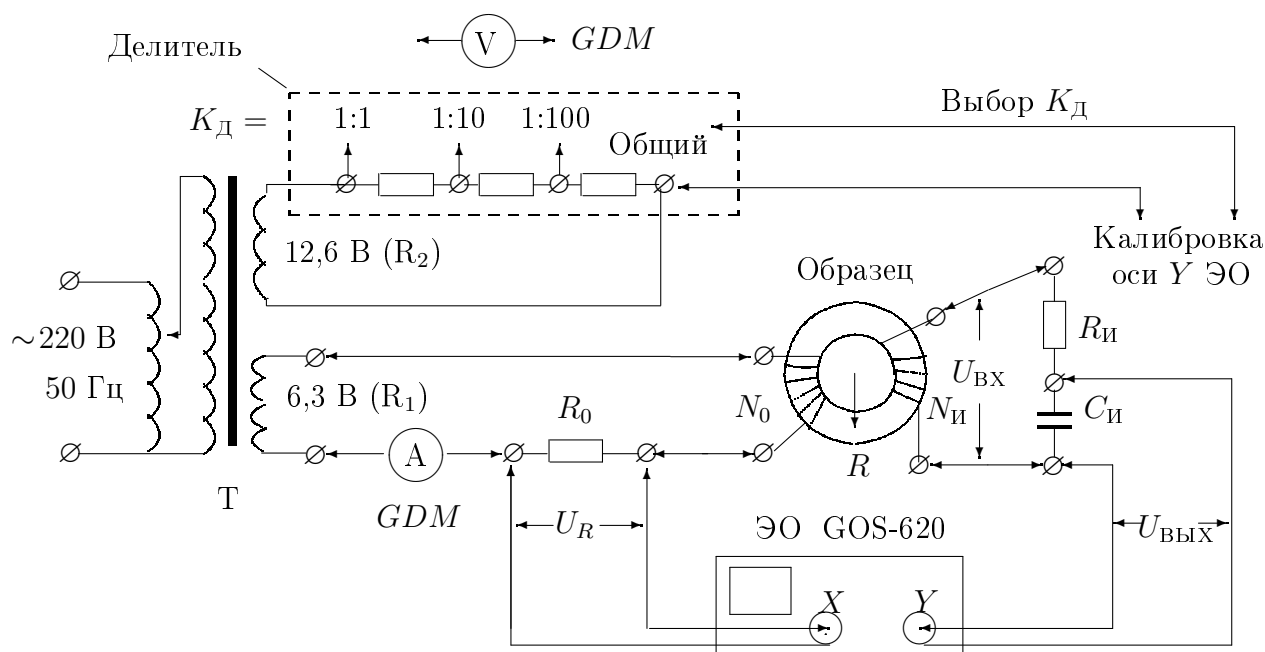


Рис. 3. Схема установки для исследования намагничивания образцов

В цепь намагничивающей катушки, на которую подаётся напряжение $U_0 = 6,3$ В, последовательно включены амперметр А (мультиметр GDM, измеряющий действующее или эффективное значение переменного тока I_0 в обмотке N_0) и резистор с сопротивлением R_0 .

Напряжение на R_0 , равное $U_R = R_0 I_0$, подаётся на канал X электронного осциллографа (ЭО). Связь между напряжённостью H в образце и током I_0 рассчитывается по теореме о циркуляции [см. формулу (4.16) Введения к разделу].

Для измерения магнитной индукции B с измерительной обмотки $N_{\text{И}}$ на вход интегрирующей RC -цепочки подаётся напряжение $U_{\text{И}} = U_{\text{ВХ}}$, пропорциональное производной dB/dt , а с выхода цепочки (с интегрирующей ёмкости C) снимается напряжение $U_C = U_{\text{ВЫХ}}$, пропорциональное величине B , и подаётся на канал Y ЭО. Значение индукции поля B рассчитывается по формуле (3).

Замкнутая кривая, возникающая на экране ЭО, воспроизводит в некотором масштабе (различном для осей X и Y) петлю гистерезиса. Чтобы придать этой кривой количественный смысл, необходимо установить масштабы изображения: сначала проверить калибровку каналов X и Y ЭО, т.е. узнать, каким напряжениям или токам соответствуют амплитуды сигналов, видимых на экране, а затем рассчитать, каким значениям B и H соответствуют эти напряжения или токи.

Наличие в схеме амперметра и вольтметра позволяет провести *независимую* калибровку усилителей ЭО, т.е. проверить значения коэффициентов усиления K_X и K_Y (ручки регулировки усиления ЭО могут быть сбиты).

Проверка калибровки канала X ЭО с помощью амперметра проводится при закороченной обмотке N_0 (т.к. катушка с ферромагнитным образцом является нелинейным элементом, ток в ней не имеет синусоидальной формы, поэтому связать амплитуду тока с показаниями амперметра можно лишь с очень большой погрешностью).

При закороченной обмотке N_0 ток синусоидален, амперметр A измеряет *эффективный* ток $I_{\text{ЭФ}}$, текущий через R_0 . Сигнал с этого сопротивления подаётся на вход X ЭО. Ширина горизонтальной развёртки на экране ЭО соответствует удвоенной *амплитуде* напряжения на R_0 .

Измерив $2x$ — длину горизонтальной прямой на экране, можно рассчитать K_X — чувствительность канала X :

$$K_X = 2R_0\sqrt{2}I_{\text{ЭФ}}/(2x) \quad [\text{В/дел}]. \quad (6)$$

Проверка калибровки канала Y ЭО с помощью вольтметра. Сигнал с обмотки 12,6 В понижающего трансформатора (рис. 3) подаётся на делитель напряжения. Часть этого напряжения снимается с делителя с коэффициентом деления $K_{\text{Д}}$ (1/10 или 1/100) и подаётся на вход Y ЭО (вместо напряжения U_C). Мультиметр V измеряет напряжение $U_{\text{ЭФ}}$ на этих же клеммах делителя. Измерив $2y$ — длину вертикальной прямой на экране, можно рассчитать чувствительность канала Y :

$$K_Y = 2\sqrt{2}U_{\text{ЭФ}}/(2y) \quad [\text{В/дел}]. \quad (7)$$

При этом тороид должен быть отключён, так как несинусоидальный ток нагрузки в первичной обмотке тороида приводит к искажению формы кривой напряжения и на обмотке трансформатора, питающей делитель.

Измерение параметров интегрирующей ячейки. Постоянную времени RC -цепочки можно определить экспериментально. С обмотки 6,3 В на вход интегрирующей цепочки подаётся синусоидальное напряжение $U_{ВХ}$ с частотой $\nu = \omega/2\pi = 50$ Гц. На канал Y ЭО или на цифровой вольтметр поочерёдно подаются сигналы со входа ($U_{ВХ}$) и выхода ($U_{ВЫХ} = U_C$) RC -цепочки. Измерив амплитуды этих сигналов с помощью ЭО, можно рассчитать постоянную времени $\tau = RC$. Как следует из формулы (5),

$$\tau = RC = U_{ВХ}/(\omega U_{ВЫХ}). \quad (8)$$

Кроме того, сопротивление и ёмкость RC -цепочки можно независимым образом измерить мультиметром.

ЗАДАНИЕ

В работе предлагается при помощи ЭО исследовать предельные петли гистерезиса и начальные кривые намагничивания для нескольких ферромагнитных образцов; определить магнитные характеристики материалов, чувствительность каналов X и Y осциллографа и постоянную времени τ интегрирующей цепочки.

1. Измерение петли гистерезиса

1. Для наблюдения петли гистерезиса на экране ЭО соберите схему согласно рис. 3. (соединительные провода показаны на рисунке стрелками). Подготовьте приборы к работе:

установите автотрансформатор (или потенциометр R_1) на минимальное выходное напряжение;

настройте осциллограф согласно ТО, расположенному в папке.

После проверки схемы преподавателем включите её в сеть.

Подготовьте к работе мультиметр А (см. ТО в конце папки).

2. С помощью автотрансформатора (или потенциометра) подберите ток питания в намагничивающей обмотке так, чтобы на экране наблюдалась *предельная* петля гистерезиса. При этом с увеличением тока в намагничивающей обмотке на вершинах петли появляются почти горизонтальные «усы» (участки CD и $C'D'$ на рис. 1), а площадь петли остаётся практически неизменной. Уменьшите ток до исчезновения «усов».
3. Подберите коэффициенты усиления каналов ЭО так, чтобы предельная петля занимала большую часть экрана (чувствительность каналов соответствует цифрам, указанным возле дискретных переключателей, только при установке ручек плавной регулировки усилителей НА МАКСИМУМ — поворотом по часовой стрелке до щелчка).

Проверьте центрировку вертикального и горизонтального лучей (заземляя ручками «32» и «19» ЭО соответствующий канал).

Сфотографируйте и зарисуйте на кальку предельную петлю и оси координат; отметьте на осях деления шкалы. Укажите (на кальке!) материал образца, параметры тороида, значения коэффициентов усиления K_X и K_Y , ток $I_{ЭФ}$ в намагничивающей обмотке.

4. По экрану ЭО измерьте полную ширину и высоту предельной петли ($2X_s$ и $2Y_s$), соответствующие удвоенной амплитуде колебания напряжённости H_s и индукции B_s поля в образце в состоянии насыщения.
5. По экрану ЭО измерьте двойные амплитуды для коэрцитивного поля $[2X_c]$ (ширина петли на пересечении с осью абсцисс) и остаточной индукции $[2Y_r]$ (высота петли на пересечении с осью ординат).

Запишите соответствующие значения K_X и K_Y (здесь можно подобрать свои значения K_X и K_Y для более точного измерения отдельной величины).

6. Снимите на ту же кальку начальную кривую намагничивания: плавно уменьшая ток намагничивания от насыщения до нуля, отмечайте на кальке вершины (8–10 точек) наблюдаемых частных петель (точки А на рис. 1). Кривая, соединяющая эти вершины, проходит вблизи начальной кривой намагничивания.
7. Для одного из образцов рассчитайте на месте цену деления шкалы ЭО для петли в А/м для оси X по ф-ле (4.16) Введения:

$$H = \frac{IN_0}{2\pi R},$$

где ток $I = K_X/R_0$, а R и N_0 указаны на установке;
и в теслах на деление для оси Y по ф-ле

$$B = \frac{R_{II}C_{II}}{SN_{II}}U_{\text{ВЫХ}}, \quad (3)$$

где $U_{\text{ВЫХ}} = K_Y$, а R_{II} и C_{II} указаны на установке.

Запишите на кальке результаты расчётов.

8. Повторите измерения п.п. 2–6 для двух других катушек.

II. Проверка калибровки осциллографа

9. Проведите калибровку горизонтальной оси ЭО. Для этого «закоротите» обмотку N_0 (соедините оба провода, идущих к обмотке, на одной из её клемм).

С помощью автотрансформатора (или R_1) подберите такой ток через сопротивление R_0 , при котором горизонтальная прямая занимает большую часть экрана ЭО для *рабочего* коэффициента K_X (использованного при зарисовке петли).

Рассчитайте на месте чувствительность канала X по формуле (6) и сравните с выбранным коэффициентом K_X .

Повторите проверку для всех K_X , которые использовались в работе.

Разберите цепь тороида (измерения с тороидами закончены).

10. Для проверки калибровки оси Y ЭО с помощью вольтметра соедините вход Y ЭО с клеммами делителя «1/100» и «Общий» (земля). Не меняя рабочего коэффициента K_Y , подберите с помощью трансформатора (или потенциометра R_2) напряжение, при котором вертикальная прямая занимает почти весь экран. Измерьте длину прямой $2y$ в см (двойную амплитуду сигнала).

Подготовьте к работе мультиметр V (см ТО), подключите его к тем же точкам делителя и определите эффективное значение напряжения (здесь около 100 мВ).

Запишите напряжение $U_{ЭФ}$, величину сигнала на экране $2y$ в см и коэффициент усиления осциллографа K_Y .

Рассчитайте на месте чувствительность канала Y по формуле (7) и сравните с выбранным коэффициентом K_Y .

Оцените погрешности измерения амплитуд с помощью ЭО.

Повторите проверку для всех K_Y , которые использовались в работе.

III. Определение τ — постоянной времени интегрирующей ячейки

- Для измерения напряжений на входе и выходе интегрирующей ячейки [см. формулу (8)] можно использовать и ЭО, и вольтметр. Подайте на вход ячейки напряжение с обмотки «6,3 В» трансформатора (см. рис 3).

Подключите канал Y ЭО ко входу интегрирующей ячейки и отключите канал X ЭО. Установите чувствительность $K_Y \simeq n$ В/дел. Подберите с помощью трансформатора такой ток, при котором вертикальная прямая занимает большую часть экрана, и определите входное напряжение на RC -цепочке: $U_{ВХ} = 2y \cdot K_Y$.

- Не меняя тока, соедините канал Y ЭО с выходом ячейки (конденсатором C) и аналогичным образом определите напряжение $U_{ВЫХ}$. Естественно, коэффициент K_Y при этом следует изменить.

- Рассчитайте на месте постоянную времени $\tau = RC$ по формуле (8) и сравните с расчётом через параметры $R_{И}$ и $C_{И}$, указанные на установке (или измеренные с помощью мультиметра). Проверьте условие $R \gg 1/(\omega C)$.

Запишите параметры RC -цепочки, характеристики амперметра, вольтметра и значение R_0 .

Отключите приборы от сети и разберите схему.

IV. Обработка результатов

- Рассчитайте коэффициенты преобразования отклонений по осям ЭО в напряжённость H и индукцию B (см. п. 7 в папке).
- По результатам измерений в п. 4 для каждого образца рассчитайте амплитуду H_{max} , соответствующую состоянию насыщения (предельное поле). Вычислите индукцию насыщения B_s .
- По результатам измерений в п. 5 рассчитайте коэрцитивное поле H_c и остаточную индукцию B_r для каждого образца.
- По начальным кривым намагничивания оцените начальные и максимальные значения дифференциальной магнитной проницаемости $\mu_{диф} = dB/dH$.
- Оцените погрешности. Сведите результаты в таблицу и сравните со справочными.

Ампл.	Fe-Ni	Fe-Si	Феррит
$H_c, \frac{A}{м}$	эксп.		
$B_s, Т$	справ.		
$\mu_{нач}$			
μ_{max}			

Исправлено 23-X-2021 г.