

### 3.4.5 (4.14). ПЕТЛЯ ГИСТЕРЕЗИСА (ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД)

ДОПОЛНИТЕЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ

23 августа 2016 г.

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

**Экспериментальная установка.** Схема установки приведена на рис. 2. Напряжение сети (220 В, 50 Гц) с помощью регулировочного автотрансформатора Ат через разделительный понижающий трансформатор Тр подаётся на намагничивающую обмотку  $N_0$  исследуемого образца.

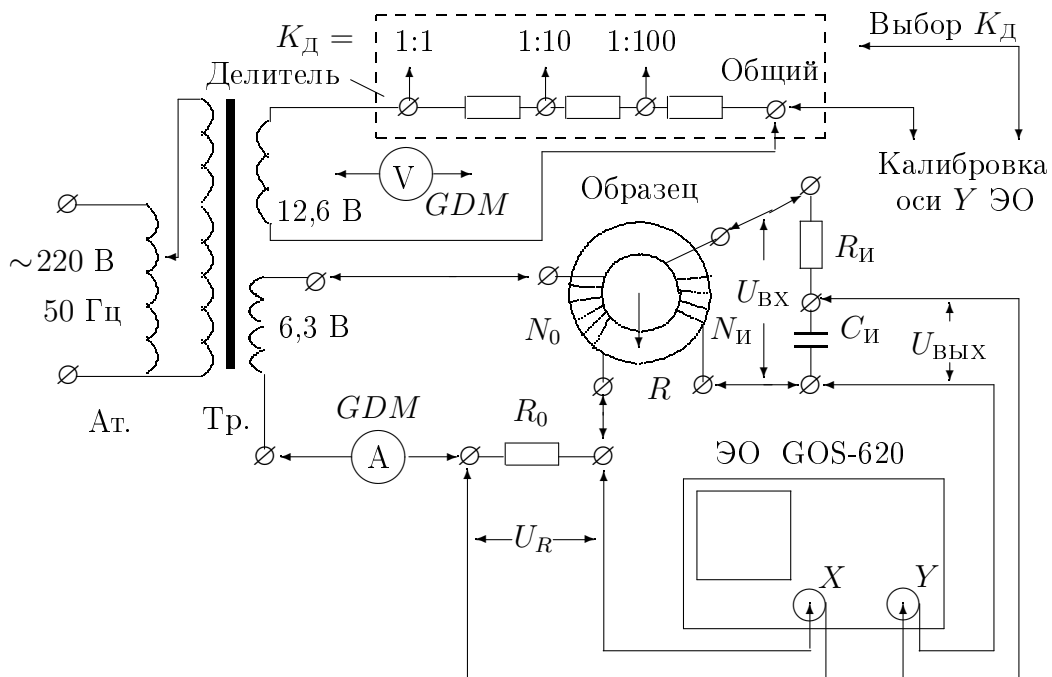


Рис. 2. Схема установки для исследования намагничивания образцов

Действующее значение переменного тока в обмотке  $N_0$  измеряется амперметром А (мультиметром 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  $N_{II}$  на вход интегрирующей RC-цепочки подаётся напряжение  $U_{II}(U_{ВХ})$ , пропорциональное производной  $\dot{B}$ , а с выхода снимается напряжение  $U_C(U_{ВЫХ})$ , 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).

**Измерения напряжения с помощью осциллографа.** 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 (4.7) (см. введение к теме), определить цену деления шкалы в А/м.

Используя формулу (4.6) Введения, можно рассчитать цену деления вертикальной шкалы ЭО в теслах (в формулу вместо  $U_{ВЫХ}$  следует подставить  $K_Y$ ).

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

**Проверка калибровки горизонтальной оси ЭО с помощью амперметра** проводится при закороченной обмотке  $N_0$ . Эта обмотка с помещённым в неё ферромагнитным образцом является нелинейным элементом, так что ток в ней не имеет синусоидальной формы, и это не позволяет связать амплитуду тока с показаниями амперметра.

При закороченной обмотке  $N_0$  амперметр А измеряет эффективное значение синусоидального тока  $I_{ЭФ}$ , текущего через известное сопротивление  $R_0$ . Сигнал с этого сопротивления подаётся на вход  $X$  ЭО. Измерив  $2x$  — длину горизонтальной прямой на экране, можно рассчитать  $m_X$  — чувствительность канала  $X$ :

$$m_X = 2R_0\sqrt{2}I_{ЭФ}/(2x) \quad [\text{В/дел}]. \quad (7)$$

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

$$m_Y = 2\sqrt{2}U_{ЭФ}/(2y) \quad [\text{В/дел}]. \quad (8)$$

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.

**Постоянную времени  $RC$ -цепочки** можно определить экспериментально. С обмотки 6,3 В на вход интегрирующей цепочки подаётся синусоидальное напряжение  $U_{ВХ}$ . На вход  $Y$  осциллографа поочерёдно подаются сигналы со входа ( $U_{ВХ}$ ) и выхода ( $U_{ВЫХ} = U_C$ )  $RC$ -цепочки. Измерив амплитуды этих сигналов с помощью осциллографа, можно рассчитать постоянную времени  $\tau = RC$ . Как следует из формулы (5),

$$RC = U_{ВХ}/(\Omega U_{ВЫХ}). \quad (9)$$

## 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  $\tau$  интегрирующей цепочки.

### I. Петля гистерезиса на экране ЭО

1. Соберите схему согласно рис. 2 (соединительные провода показаны на рисунке стрелками). Подготовьте приборы к работе:

установите автотрансформатор (или реостат  $R_1$ ) на минимальное выходное напряжение;

настройте осциллограф согласно ТО, расположенному в папке.

2. После проверки схемы преподавателем включите её в сеть.

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

Подберите ток питания в намагничивающей обмотке с помощью автотрансформатора (реостата) и коэффициенты усиления ЭО так, чтобы предельная петля гистерезиса 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).

При достижении предельной петли её вертикальный размер мало меняется с увеличением тока, а на вершинах появляются почти горизонтальные «усы». Уменьшите ток до исчезновения «усов».

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

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

3. Снимите на ту же кальку начальную кривую намагничивания: плавно уменьшая ток намагничивания до нуля, отмечайте на кальке вершины наблюдаемых частных петель. Кривая, соединяющая эти вершины, проходит вблизи начальной кривой намагничивания.

4. Восстановите предельную петлю. Измерьте на экране (это точнее, чем по кальке) двойные амплитуды для коэрцитивной силы  $[2x(c)]$  и индукции насыщения  $[2y(s)]$ . Запишите соответствующие значения  $K_X$  и  $K_Y$  (здесь можно подобрать свои значения  $K_X$  и  $K_Y$  для более точного измерения отдельной величины).

Рассчитайте на месте цену деления ЭО для петли в А/м для оси  $X$  по ф-ле (4.7) введения к теме:

$$H = IN_0/(2\pi R),$$

где ток  $I = K_X/R_0$ ,

и в теслах на деление для оси  $Y$  по ф-ле (6):

$$B = R_{II}C_{II}U_{ВЫХ}/(SN_{II}),$$

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

Запишите на кальке результаты расчетов.

5. Повторите измерения п.п. 2–4 для двух других катушек.

### II. Проверка калибровки оси $X$ ЭО с помощью амперметра

6. Отключите намагничивающую обмотку  $N_0$  от цепи, соединив 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  $K_X$ ).

Рассчитайте на месте чувствительность канала  $m_X$  по формуле (7) и сравните с выбранным коэффициентом  $K_X$ .

### III. Проверка калибровки оси $Y$ ЭО с помощью вольтметра

7. Разберите цепь тороида (измерения с тороидами закончены).

Соедините вход  $Y$  ЭО с клеммами делителя «1/100–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  $m_Y$  по формуле (8) и сравните с выбранным коэффициентом  $K_Y$ . Оцените величину расхождения.

Повторите проверку для всех  $K_Y$ , которые использовались в работе.

### IV. Определение $\tau$ — постоянной времени $RC$ -цепочки

8. Для определения напряжений на входе и выходе интегрирующей ячейки [см. формулу (9)] соедините вход ячейки с обмоткой «6,3 В» трансформатора.

Подключите  $Y$ -вход ЭО ко входу интегрирующей ячейки и отключите  $X$ -вход 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, переключите  $Y$ -вход ЭО к выходу ячейки (конденсатору  $C$ ) и аналогичным образом определите напряжение  $U_{ВЫХ}$ . Естественно, коэффициент  $K_Y$  при этом следует изменить.

Рассчитайте на месте постоянную времени  $\tau = RC$  по формуле (9) и сравните с расчётом через параметры  $R_{И}$  и  $C_{И}$ , указанные на установке.

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

10. Отключите приборы от сети и разберите схему.

### V. Обработка результатов

1. Сравните рассчитанные значения  $m_X$  и  $m_Y$  с величинами  $K_X$  и  $K_Y$ , использованными при калибровке.
2. Сравните постоянную времени  $\tau = RC$ , рассчитанную по формуле (9), с расчётом через параметры  $R_{И}$  и  $C_{И}$ , указанные на установке. Проверьте условие  $R \gg 1/(\Omega C)$ .
3. Для каждого образца рассчитайте цену деления ЭО: для оси  $X$  — в А/м на одно деление; для оси  $Y$  — в теслах на деление. Укажите эти масштабы на кальках.
4. Рассчитайте коэрцитивную силу  $H_c$  и индукцию насыщения  $B_s$  для каждого образца.
5. Оцените максимальные значения дифференциальной магнитной проницаемости  $\mu_{диф}$  по начальным кривым намагничивания.
6. Оцените погрешности. Сведите результаты в таблицу и сравните со справочными.

Ампл.	Fe-Ni	Fe-Si	Феррит
$H_c, \frac{A}{M}$	эксп. табл.		
$B_s, T$			
$\mu_{диф}$			