

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

15-VIII-2016 г.

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

**Экспериментальная установка.** Схема установки приведена на рис. 2А. Напряжение сети (220 В, 50 Гц) через разделительный понижающий трансформатор Тр подаётся на реостат  $R_1$ , включённый как потенциометр. Регулируемое напряжение  $\sim 6,3$  В подведено к средним точкам переключателя  $K_0$ : в положении «П» (петля) напряжение подводится к клеммам «6,3» на панели установки, в положении «Д» (делитель) — к клеммам делителя напряжения.

С клемм «6,3» регулируемое напряжение подаётся на намагничивающую обмотку  $N_0$  исследуемого образца.

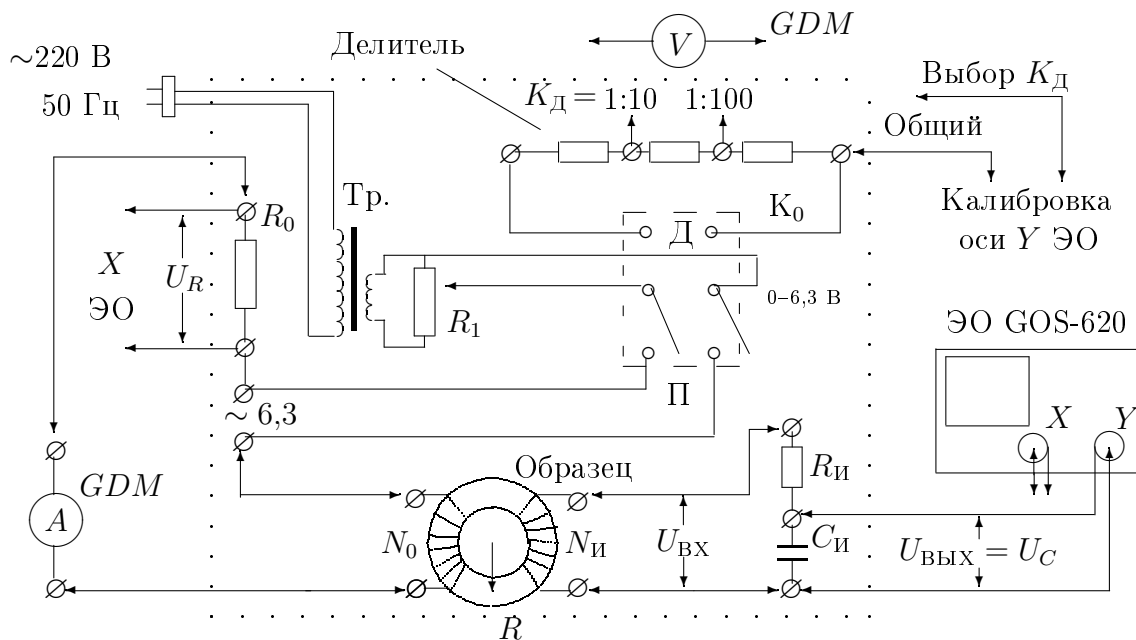


Рис. 2. А. Схема установки для исследования намагничивания образцов

Ток в обмотке  $N_0$  измеряется мультиметром А. Напряжение с сопротивления  $R_0$ , включенного последовательно с обмоткой  $N_0$ , 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  $U_{ВХ}$ , пропорциональное производной  $\dot{B}$ , а с выхода снимается напряжение  $U_{ВЫХ} = U_C$ , пропорциональное величине  $B$ , и подаётся на вход  $Y$ .

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).

**Измерение напряжения с помощью осциллографа.** Исследуемый сигнал подаётся на вход  $X$  ЭО; длина  $2x$  горизонтальной черты, наблюдаемой на экране, характеризует удвоенную амплитуду сигнала.

Если известна чувствительность усилителя  $K_X$  в вольтах на деление шкалы экрана (В/см), 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 рассчитать 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 ЭО в А/м.

Используя формулу (6) (см. книгу), можно рассчитать цену деления вертикальной шкалы ЭО в теслах (в формулу вместо  $U_{\text{ВЫХ}}$  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  $A$  измеряет эффективное значение синусоидального тока  $I_{\text{ЭФ}}$ , 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  $X$ :

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

**Проверка калибровки вертикальной оси ЭО с помощью вольтметра.** Сигнал с потенциометра  $R_1$  подаётся на вход делителя напряжения ( $K_0$  в положении «Д»). Часть этого напряжения снимается с делителя с коэффициентом деления  $K_D$  (1/10 или 1/100) и подаётся на вход  $Y$  ЭО (вместо напряжения  $U_C$ ). Цифровой вольтметр  $V$  измеряет напряжение  $U_{\text{ЭФ}}$  на этих же клеммах делителя. Измерив  $2y$  — длину вертикальной прямой на экране, можно рассчитать чувствительность канала  $Y$ :

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

При калибровке 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 клемм 6,3 на вход интегрирующей цепочки подаётся синусоидальное напряжение  $U_{ВХ}$ . На вход  $Y$  осциллографа поочередно 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),

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

## ЗАДАНИЕ

В работе предлагается исследовать с помощью ЭО предельные петли гистерезиса и начальные кривые намагничивания для нескольких ферромагнитных образцов; определить магнитные характеристики материалов; рассчитать чувствительность каналов  $X$  и  $Y$  осциллографа и постоянную времени  $\tau$  интегрирующей цепочки.

### 1. Петля гистерезиса на экране ЭО

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

установите реостат  $R_1$  на минимальное выходное напряжение, ключ  $K_0$  — в положение «П» — петля;

настройте осциллограф согласно техническому описанию, расположенному на установке.

2. После проверки схемы преподавателем включите её в сеть.

Подготовьте к работе амперметр А (мультиметр GDM) (см. ТО).

Подберите ток питания в намагничивающей обмотке (с помощью реостата  $R_1$ ) 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» 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  $[2y(s)]$  (в делениях экрана). 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):

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

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

Запишите на кальке результаты расчётов.

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 ней, на одной из её клемм.

С помощью реостата  $R_1$  на выходе автотрансформатора 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» и переведите  $K_0$  в положение «Д». Не меняя рабочего коэффициента  $K_Y$ , подберите с помощью реостата  $R_1$  напряжение, при котором вертикальная прямая занимает почти весь экран. Измерьте длину прямой  $2y$  в см — двойную амплитуду сигнала.

Подготовьте к работе вольтметр  $V$  (мультиметр  $GDM$ ) и подключите его к тем же точкам делителя. Определите эффективное значение напряжения (здесь около 100 мВ).

Запишите напряжение  $U_{\text{ЭФ}}$ , 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)] подайте на вход ячейки синусоидальное напряжение непосредственно с обмотки «6,3» В ( $K_0$  в положении «П»).

Подключите  $Y$ -вход ЭО ко входу интегрирующей ячейки и отключите  $X$ -вход ЭО. Установите чувствительность  $K_Y \simeq n \text{ V/дел}$ . Подберите с помощью реостата  $R_1$  такой ток, при котором вертикальная прямая занимает большую часть экрана, и определите входное напряжение на  $RC$ -цепочке:  $U_{\text{ВХ}} = 2y \cdot K_Y$ .

Не меняя тока, переключите  $Y$ -вход ЭО к интегрирующей ёмкости и аналогичным образом определите выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$ . Естественно, коэффициент  $K_Y$  при этом следует изменить.

Рассчитайте на месте постоянную времени  $\tau = RC$  по формуле (9) и сравните с расчётом через параметры  $R_{\text{И}}$  и  $C_{\text{И}}$ , 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  $R_{\text{И}}$  и  $C_{\text{И}}$ , 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  $\mu_{\text{диф}}$  по основным кривым намагничивания.
6. Оцените погрешности. Сведите результаты в таблицу и сравните со справочными.

Ампл.	Fe-Ni	Fe-Si	Феррит
$H_c \frac{\text{А}}{\text{м}}$	эксп. табл.		
$B_s \text{ Т}$			
$\mu_{\text{диф}}$			

### ПАРАМЕТРЫ ТОРОИДОВ

№ образца	1	2	3
Материал сердечника	1000НН Феррит	Fe-Ni сплав 50 НП Пермаллой	Fe-Si сплав Кремнистое железо
Число витков $N_0$	85	40	75
Число витков $N_{\text{И}}$	300	200	400
Сечение $S \text{ см}^2$	3	4,5	2,85
Периметр $2\pi R \text{ см}$	24	23	12,8

Исправлено 15-VIII-2016 г.