

### Работа 3.4.5.

Петля гистерезиса (динамический метод)

*Корнеев Е.С.*

## Петля гистерезиса (динамический метод)

**Цель работы:** изучение петель гистерезиса ферромагнитных материалов с помощью осциллографа.

**Оборудование:** автотрансформатор, понижающий трансформатор, интегрирующая цепочка, амперметр, вольтметр, электронный осциллограф, делитель напряжения, тороидальные образцы с двумя обмотками.

Ферромагнитные материалы часто применяются в трансформаторах, дросселях, машинах переменного тока, то есть в устройствах, где они подвергаются периодическому перемагничиванию. Изучение магнитных характеристик ферромагнетиков в переменных полях представляет поэтому большой практический интерес. Основные характеристики ферромагнетиков - их коэрцитивная сила, магнитная проницаемость, мощность, рассеиваемая в виде тепла при перемагничивании, и т. д. - зависят от частоты перемагничивающего поля. В настоящей работе кривые гистерезиса ферромагнитных материалов изучаются в поле частоты 50 Гц с помощью электронного осциллографа.

**Измерение магнитной индукции в образцах.** Магнитную индукцию удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при изменении магнитного потока  $\Phi$  в катушке, намотанной на образец:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Пусть катушка плотно охватывает образец, и индукция  $B$  в образце однородна. В этом случае

$$\Phi = BSN, \quad (2)$$

где  $N$  - число витков в измерительной катушке, а  $S$  - площадь витка. Подставляя это значение  $\Phi$  в формулу (1), после интегрирования найдём

$$|B| = \frac{1}{SN} \int \varepsilon dt \quad (3)$$

Таким образом, для определения  $B$  нужно проинтегрировать сигнал, наведённый меняющимся магнитным полем на измерительную катушку, намотанную на образец.

Для интегрирования сигнала применяют разного рода интегрирующие схемы. Простейшая из них состоит из соединённых последовательно резистора  $R$  и конденсатора  $C$  (рис. 1) и выполняет своё назначение, если сопротивление  $R$  резистора заметно превышает сопротивление конденсатора (если выходной сигнал много меньше входного:  $U_{\text{вых}} \ll U_{\text{вх}}$ ).

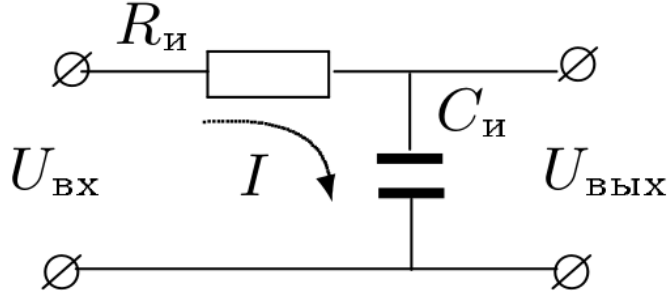


Рис. 1: Интегрирующая  $RC$ -цепочка

В самом деле, при выполнении этого условия ток в цепи пропорционален входному напряжению:  $I \approx U_{\text{вх}}/R$ , а напряжение на ёмкости  $C$

$$U_{\text{вых}} = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I dt \approx \frac{1}{RC} \int U_{\text{вх}} dt \quad (4)$$

Этот вывод тем ближе к истине, чем больше постоянная времени  $\tau = RC$  превосходит характерное время процесса (например, его период). Для синусоидальных напряжений

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вх}}}{RC\Omega} \quad (5)$$

где  $\Omega$  - частота сигнала.

Обозначив параметры интегрирующей ячейки через  $R_{\text{и}}$  и  $C_{\text{и}}$ , выразим индукцию  $B$  с помощью формул (3) и (4) через  $U_{\text{вых}}$  - напряжение на ёмкости интегрирующей ячейки:

$$|B| = \frac{1}{SN} \int \varepsilon dt = \frac{1}{SN} \int U_{\text{вх}} dt = \frac{R_{\text{и}} C_{\text{и}}}{SN} U_{\text{вых}} \quad (6)$$

**Экспериментальная установка.** Схема установки изображена 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.

Действующее значение переменного тока в обмотке  $N_0$  измеряется амперметром А. 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  $N$  на вход  $RC$ -цепочки подаётся напряжение  $U_{\text{и}}$  ( $U_{\text{вх}}$ ), пропорциональное согласно (6) производной  $\dot{B}$ , а с интегрирующей ёмкости  $C_{\text{и}}$  снимается напряжение  $U_C$  ( $U_{\text{вых}}$ ), 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).

**Измерение напряжения с помощью осциллографа.** Исследуемый сигнал подаётся на ВХОД  $X$ ; величина сигнала характеризуется длиной  $2x$  горизонтальной черты, наблюдаемой на экране ( $x$  - отклонение от нуля - амплитуда 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:

$$2U_{y,0} = 2y \cdot K_y$$

где  $y$  - отклонение от нуля в делениях шкалы,  $K_y$  - чувствительность усилителя в В/дел.

Наличие в схеме амперметра и вольтметра позволяет провести калибровку усилителей ЭО, т.е. проверить значения коэффициентов  $K_x$  и  $K_y$ , (или определить их, если ручки плавной регулировки усиления при измерениях не были установлены на максимум).

**Калибровка горизонтальной оси ЭО** 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  $I_{эфф}$ , 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  $X$ :

$$m_x = \frac{2R_0\sqrt{2}I_{эфф}}{2x} \frac{\text{В}}{\text{Дел}} \quad (7)$$

**Калибровка вертикальной оси** проводится с помощью сигнала, снимаемого через делитель напряжения с обмотки 12,6 В понижающего трансформатора (рис. 2). Вольтметр  $V$  измеряет напряжение  $U_{эфф}$  на обмотке. Часть этого напряжения снимается с делителя с коэффициентом деления  $K$  и подаётся на вход  $Y$  ЭО (вместо напряжения ПО на рис. 2).

Измерив  $2y$  - длину вертикальной прямой на экране, можно рассчитать чувствительность канала  $Y$ :

$$m_y = \frac{2\sqrt{2}KU_{эфф}}{2y} \frac{\text{В}}{\text{Дел}} \quad (8)$$

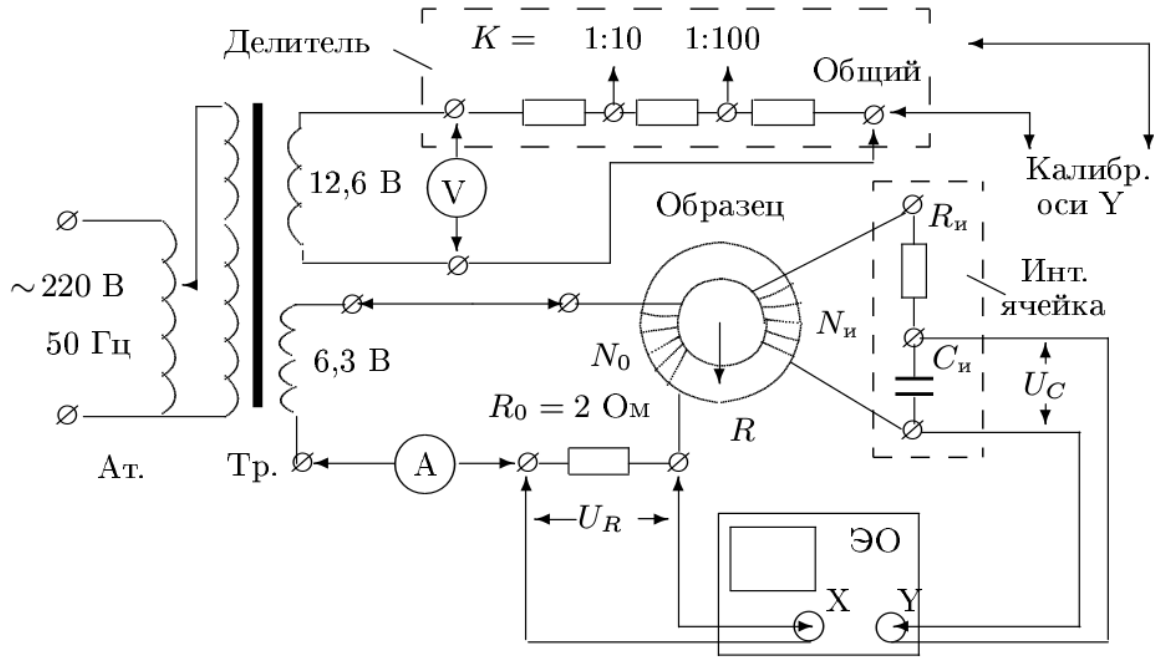


Рис. 2: Схема установки

При калибровке канала  $Y$  тороид должен быть отключён, так как несинусоидальный ток нагрузки в первичной обмотке  $N_0$  тороида приводит к искажению формы кривой напряжения и на обмотке трансформатора, питающей делитель.

Калибровку осей осциллографа можно использовать для построения кривой гистерезиса в координатах  $B$  и  $H$ . Значения  $H$  рассчитываются по теореме о циркуляции, значения  $B$  - по формуле (6).

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

$$RC = \frac{U_{\text{вх}}}{RU_{\text{вых}}} \quad (9)$$