

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Лабораторная работа 3.4.5

Петля гистерезиса (динамический метод)

Выполнил:

Гисич Арсений

Б03-102

Долгопрудный

2022

1 Аннотация

В данной работе изучались петли гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных полях.

2 Теоретические сведения

Основные характеристики ферромагнетиков — их коэрцитивное поле H_c , магнитная проницаемость μ , рассеиваемая в виде тепла при перемагничивании мощность — зависят от частоты перемагничивающего поля. В данной работе кривые гистерезиса ферромагнитных материалов изучаются в поле частоты $\nu_0 = 50 \text{ Гц}$ с помощью электронного осциллографа.

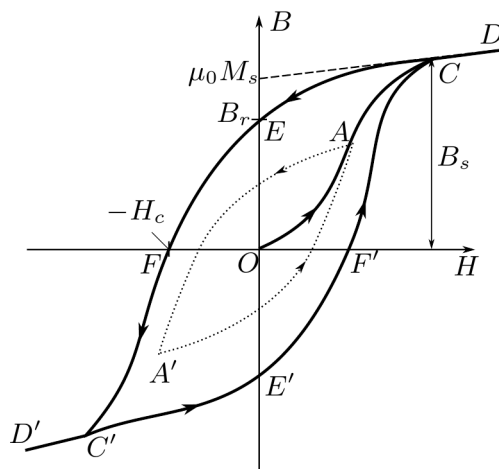


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

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 рис. 1.

Если к ферромагнитному образцу прикладывать переменное внешнее магнитное поле, то его состояние на плоскости $B - H$ будет изменяться по замкнутой кривой — петле гистерезиса. Размер петли определяется максимальным значением напряжённости H в цикле (например, петля AA' , обозначенная пунктиром на рис. 1). Если амплитуда напряжённости достаточно велика, то образец будет периодически достигать насыщения, что на рисунке соответствует кривой $CEFC'E'F'C$ (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 рис. 1), лежат на начальной кривой намагничивания (OAC).

Измерение магнитной индукции. Магнитную индукцию B удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при изменении 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

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

Для интегрирования в работе используется интегрирующая RC -цепочка (рис. 2). «Входное» напряжение от источника $U_{\text{вх}}(t)$ подаётся на последовательно соединённые резистор $R_{\text{и}}$ и конденсатор $C_{\text{и}}$. «Выходное» напряжение $U_{\text{вых}}(t)$ снимается с конденсатора. Предположим, что 1) сопротивление источника мало по сравнению с $R_{\text{и}}$, 2) выходное сопротивление (сопротивление на входе осциллографа), напротив, велико: $R_{\text{вых}} \gg R_{\text{и}}$ и, наконец, 3) сопротивление $R_{\text{и}}$ достаточно велико, так что почти всё падение напряжения приходится на него, а $U_{\text{вых}} \ll U_{\text{вх}}$. В таком случае ток цепи равен $I = (U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}})/R_{\text{и}} \approx U_{\text{вх}}/R_{\text{и}}$, и входное и выходное сопротивление связаны соотношением

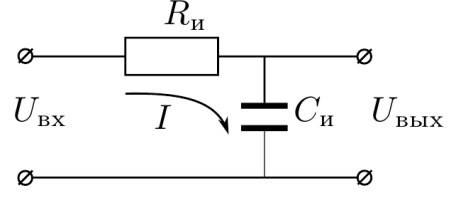


Рис. 2: Интегрирующая ячейка

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

где $\tau_{\text{и}} = R_{\text{и}} C_{\text{и}}$ - постоянная времени RC - цепочки. Для индукции поля из (2) получаем

$$|B| = \frac{1}{SN} \int U_{\text{вх}} dt = \frac{\tau_{\text{и}}}{SN} U_{\text{вых}}. \quad (2)$$

Замечание. Уточним критерий применимости соотношения (1). Пусть на вход интегрирующей ячейки подан синусоидальный сигнал с частотой ω_0 . Тогда, пользуясь методом комплексных амплитуд, нетрудно найти отношение амплитуд входного и выходного напряжений:

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1/\omega_0 C}{\sqrt{R^2 + 1/(\omega_0 C)^2}}.$$

Тогда неравенство $U_{\text{вых}} \ll U_{\text{вх}}$ реализуется, если

$$\tau \equiv RC \gg \frac{1}{\omega_0}$$

(импеданс конденсатора мал по сравнению сопротивлением резистора). В таком случае для синусоидального сигнала имеем

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \approx \frac{1}{\omega_0 \tau}.$$

В общем случае, если ω_0 — частота самой низкой гармоники в спектре произвольного входного сигнала, то при $\omega_0 \tau \gg 1$ неравенство $U_{\text{вых}} \ll U_{\text{вх}}$ выполняется на любой частоте $\omega > \omega_0$.

3 Методика измерений

Схема установки изображена на рис. 3. Напряжение сети (220 В, 50 Гц) с помощью трансформаторного блока Т, состоящего из регулировочного автотрансформатора и разделительного понижающего трансформатора, подаётся на намагничивающую обмотку N_0 исследуемого образца.

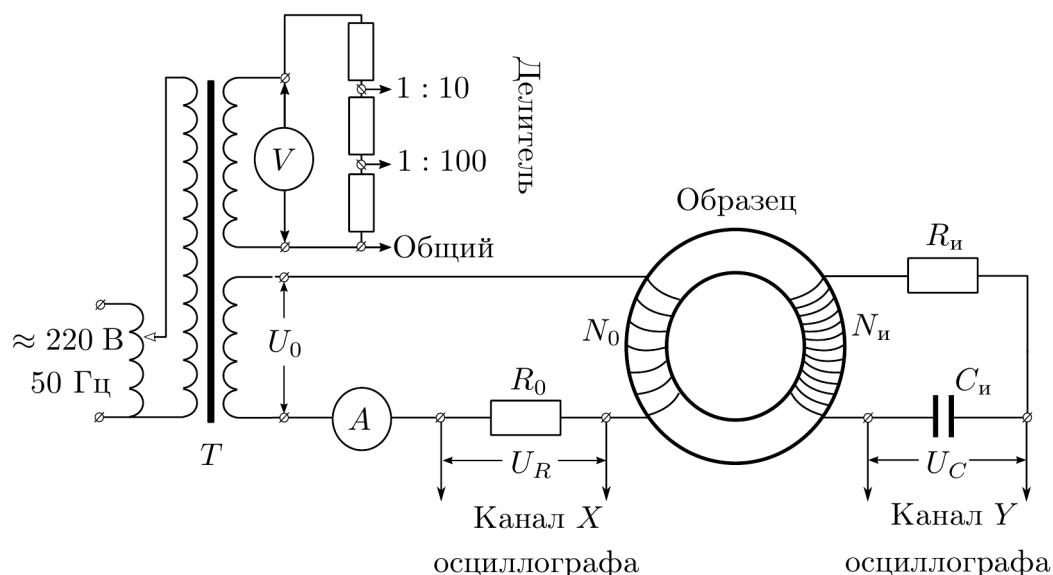


Рис. 3: Схема установки для исследования намагничивания образцов

В цепь намагничивающей катушки, на которую подаётся некоторое напряжение U_0 , последовательно включено сопротивление R_0 . Напряжение на R_0 , равное $U_R = R_0 I_0$, где I_0 — ток в намагничивающей обмотке N_0 , подаётся на канал X осциллографа. Связь напряжённости H в образце и тока I_0 рассчитывается по теореме о циркуляции. Действующее значение переменного тока в обмотке N_0 измеряется амперметром A . Для измерения магнитной индукции B с измерительной обмотки $N_{\text{и}}$ на вход RC -цепочки подаётся напряжение $U_{\text{и}}$ ($U_{\text{вх}}$), пропорциональное производной dB/dt . С интегрирующей ёмкости $C_{\text{и}}$ снимается напряжение U_C ($U_{\text{вых}}$), пропорциональное величине B , и подаётся на вход Y осциллографа. Значение индукции поля B рассчитывается по формуле (2). 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 осциллографа.

4 Используемое оборудование

1. автотрансформатор;
2. понижающий трансформатор;
3. интегрирующая цепочка;
4. амперметр;
5. вольтметр;
6. электронный осциллограф;
7. делитель напряжения;
8. тороидальные образцы с двумя обмотками.

5 Результаты измерений и обработка данных

Параметры установки:

$$R = 3,5 \text{ Ом}$$

$$R_1 = 1008 \text{ Ом}$$

$\nu, \text{кГц}$	$\delta_\nu, \text{кГц}$	$U, \text{В}$	$\delta_U, \text{В}$
31,38	0,01	0,682	0,001
31,44	0,01	0,715	0,001
31,51	0,01	0,765	0,001
31,58	0,01	0,822	0,001
31,69	0,01	0,910	0,001
31,73	0,01	0,951	0,001
31,78	0,01	0,992	0,001
32,08	0,01	1,187	0,001
32,86	0,01	0,705	0,001
32,81	0,01	0,735	0,001
32,68	0,01	0,825	0,001
32,48	0,01	0,986	0,001
32,30	0,01	1,127	0,001
32,12	0,01	1,189	0,001

Таблица 1: Амплитудно-частотная характеристика колебательного контура для 1-ой ёмкости

6 Обсуждение результатов и выводы

В данной работе был исследован резонанс токов в параллельном колебательном контуре с изменяемой ёмкостью, были определены параметры контура, получены амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики контура при 2 различных значениях ёмкости конденсатора. По графику АЧХ были определены добротности соответствующих контуров. Полученные значения:

$$Q_1 = 29 \pm 1, \quad Q_7 = 16 \pm 1.$$

Также добротности были определены с помощью графика ФЧХ 2-мя способами. Значения, полученные 1-ым способом (по углу наклона прямой вблизи резонанса):

$$Q_1 = 18 \pm 5, \quad Q_7 = 13 \pm 4.$$

Результат, полученный 2-ым способом (по расстоянию между $y(-1/4)$ и $y(1/4)$ по оси x):

$$Q_1 = 17 \pm 1, \quad Q_7 = 13 \pm 1.$$

Значения добротности, рассчитанные теоретически:

$$Q_1 = 30, \quad Q_7 = 17.$$

Результат, рассчитанный по АЧХ совпадает с теоретическим в пределах погрешности. Однако результаты, полученные при исследовании ФЧХ, совпадают по порядку, но существенно отличаются от рассчитанных теоретически. Это может быть связано с высокой погрешностью предложенного метода измерения сдвига фаз между E и U ввиду его сложности. Например, графики ФЧХ для обоих контуров не пересекают прямую $y = -1/4$, что говорит о наличии систематической погрешности измерений.

Также была определена зависимость активного сопротивления катушки R_L от резонансной частоты ν_0 . Как видно из графика, R_L возрастает с возрастанием частоты. Это может быть вызвано скин-эффектом. Резкое скачкообразное изменение значений R_L может быть связано с изменением амплитуды ЭДС в процессе эксперимента.