

Лабораторная работа №3.4.5  
Петля гистерезиса (динамический метод)

Рожков А. В.

6 октября 2024 г.

**Цель работы:** изучение петель гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных токах.

**В работе используются:** автотрансформатор, понижающий трансформатор, интегрирующая цепочка, амперметр, вольтметр, электронный осциллограф, делитель напряжения, тороидальные образцы с двумя обмотками (с сердечниками из феррита, пермаллоя и кремнистого железа).

## 1 Теоретическая справка

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 рисунок 1.

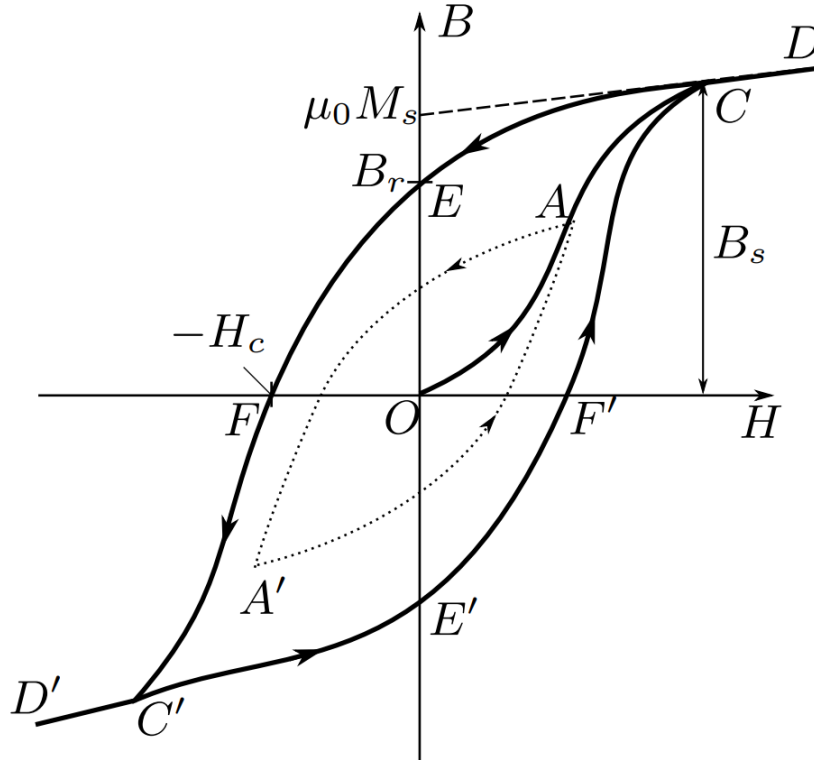


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

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

**Измерение магнитной индукции.** Магнитную индукцию  $B$  удобно определять с помощью ЭДС, возникающей при измерении магнитного потока  $\Phi$  в катушке, намотанной на образец. Пусть катушка с  $N$  витками плотно охватывает образец сечением  $S$ , и индукция  $B$  в образце однородна. Тогда

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

Таким образом, для определения  $B$  нужно проинтегрировать сигнал, наведённый меняющимся магнитным полем в измерительной катушке, намотанной на образец.

Для интегрирования в работе используется *интегрирующая RC-цепочка*. 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  $I = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}}{R_{\text{и}}} \approx \frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{и}}}$ , и входное и выходное сопротивление связаны соотношением

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

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

$$|B| = \frac{1}{SN} \int U_{\text{вх}} dt = \frac{\tau_{\text{и}}}{SN} U_{\text{вх}}.$$

## 2 Экспериментальная установка

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

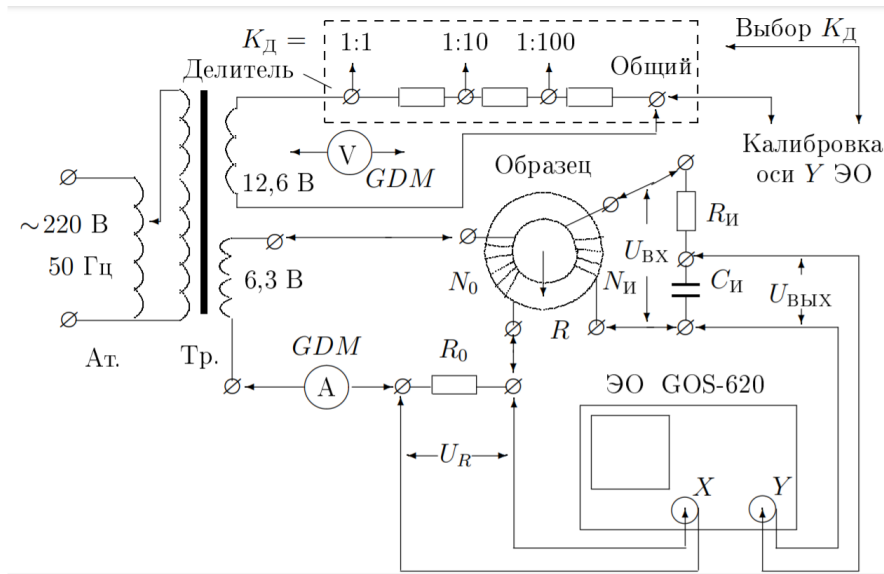


Рис. 2: Схема установки для исследования намагничивания образцов

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  $N_{\text{и}}$  на вход интегрирующей RC-цепочки подаётся напряжение  $U_{\text{и}}$  ( $U_{\text{вх}}$ ), пропорциональное производной  $\dot{B}$ , а с выхода снимается напряжение  $U_{\text{с}}$  ( $U_{\text{вых}}$ ), 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).

**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  $K_{XI} = \frac{K_X}{R_0} \left[ \frac{A}{\text{дел}} \right]$  и затем определить цену деления шкалы в  $\frac{A}{m}$ .

Зная чувствительность  $K_Y$ , можно рассчитать цену деления вертикальной шкалы ЭО в теслах.

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  $X$ :

$$m_X = \frac{2\sqrt{2}R_0I_{\text{эф}}}{2x} \left[ \frac{B}{\text{дел}} \right].$$

**Проверка калибровки вертикальной оси ЭО с помощью вольтметра.** Сигнал с обмотки 12,6 В понижающего трансформатора (2) подаётся на делитель напряжения. Часть этого напряжения снимается с делителя с коэффициентом деления  $K_d$  ( $\frac{1}{10}$  или  $\frac{1}{100}$ ) 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  $Y$ :

$$m_Y = \frac{2\sqrt{2}R_0U_{\text{эф}}}{2x} \left[ \frac{B}{\text{дел}} \right].$$

При этом тороид должен быть отключен, 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 напряжения  $U_{\text{вх}}$ . На вход  $Y$  осциллографа поочерёдно подаются сигналы со входа ( $U_{\text{вх}}$ ) и выхода ( $U_{\text{вых}}$ ) RC-цепочки. Измерив амплитуды этих сигналов с помощью осциллографа, можно рассчитать постоянную времени  $\tau = RC$ . Тогда

$$RC = \frac{U_{\text{вх}}}{\Omega U_{\text{вых}}}.$$

## 3 Ход работы

### 3.1 Проверка калибровки шкал осциллографа

Результат в таблице 1

| $K_x, \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$ |         | $K_y, \frac{\text{мВ}}{\text{дел}}$ |         |
|-------------------------------------|---------|-------------------------------------|---------|
| Осцилл.                             | Калибр. | Осцилл.                             | Калибр. |
| 20                                  | 18.3    | 20                                  | 20.5    |
| 100                                 | 94      | 10                                  | 0.08    |

Таблица 1: Результаты калибровки шкал осциллографа

### 3.2 Измерение параметров RC-ячейки

$$\tau = \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}\omega_0} = \frac{5.65 \text{ В}}{0.042 \text{ В} \cdot 2\pi 50 \text{ Гц}} = 0.43 \text{ с}$$

$$\tau = RC = 20 \text{ кОм} \cdot 20 \text{ мкФ} = 0.4 \text{ с}$$

Как видим, результаты почти совпали. Также выполняется условие  $R \gg \frac{1}{\omega C}$  ( $20000 \gg 159$ ).

### 3.3 Обработка результатов

Графики и таблица итоговых результатов представлены ниже.

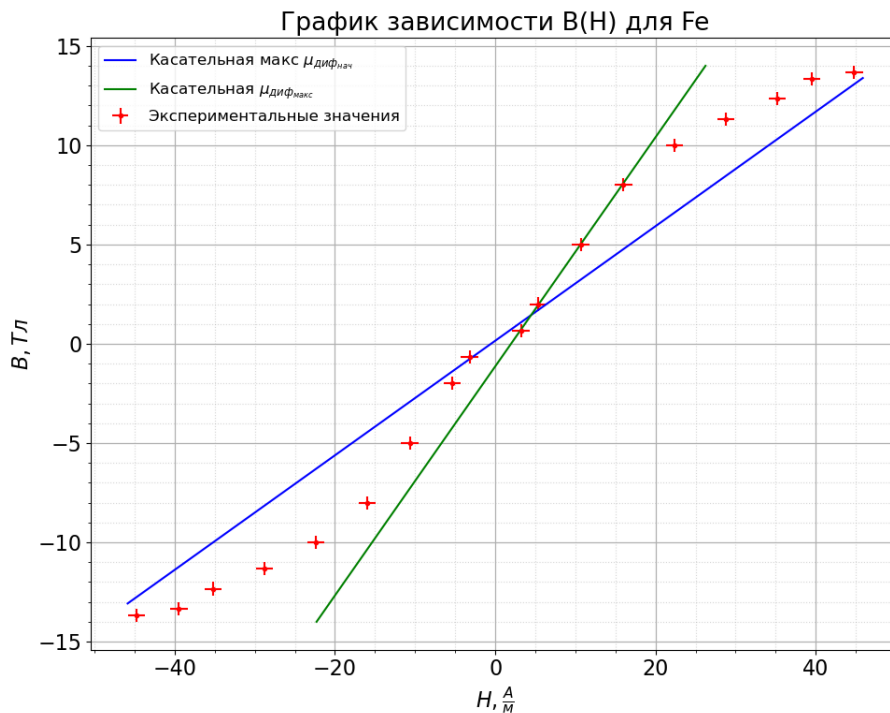


Рис. 3: График зависимости  $B(H)$  для феррита

## 4 Вывод

Изучили петли гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных токах.

Сравним полученные результаты с табличными значениями:

Значения индукции насыщения достаточно сильно отличаются от табличных. Это можно объяснить неточностью определения момента, в который петля становится предельной.

Проверки калибровки показала хороший результат.

Измеренные параметры RC-ячейки почти совпали с указанными на установке.

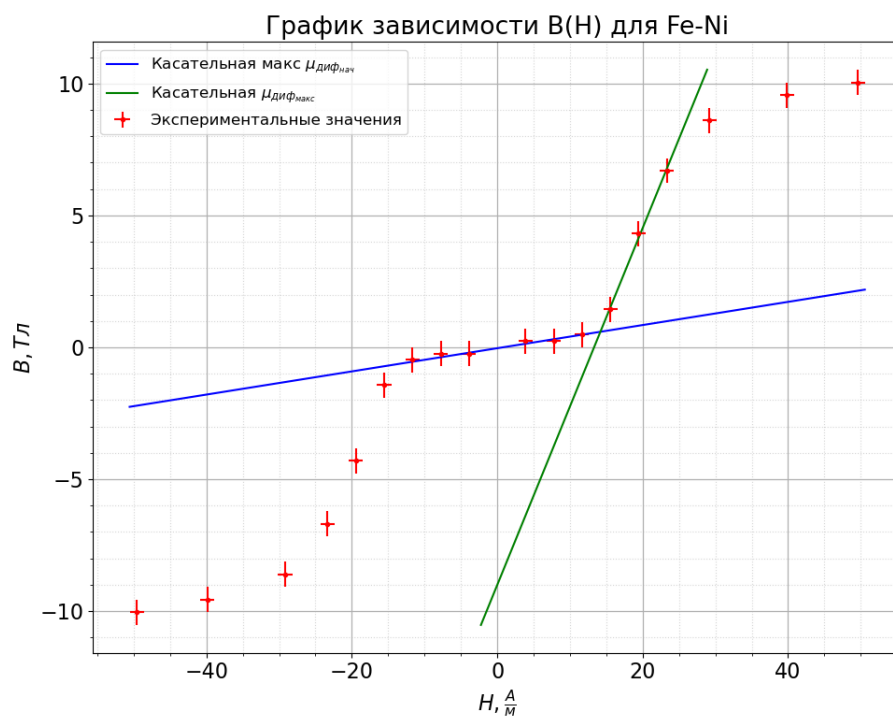


Рис. 4: График зависимости  $B(H)$  для пермаллоя

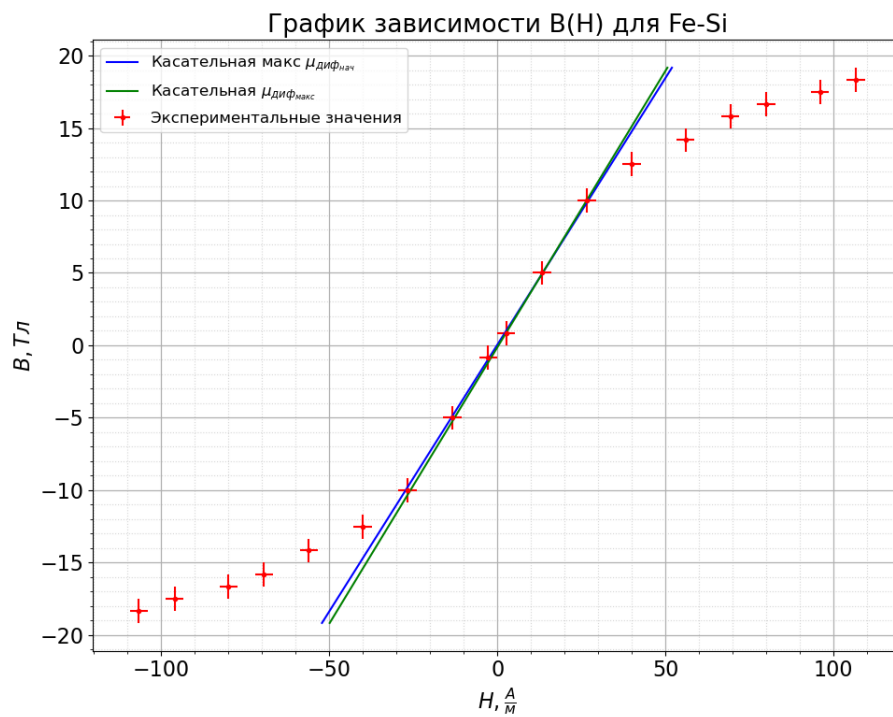


Рис. 5: График зависимости  $B(H)$  для кремнистого железа

| Материал                | Fe                | Fe-Ni             | Fe-Si             |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $I_{max}$ , мА          | $160.00 \pm 0.01$ | $200.00 \pm 0.01$ | $800.00 \pm 0.01$ |
| $K_x$ , $\frac{В}{дел}$ | 0.02              | 0.02              | 0.02              |
| $K_y$ , $\frac{В}{дел}$ | 0.01              | 0.1               | 0.01              |
| $H$ , $\frac{А/м}{дел}$ | 10.7              | 9.7               | 26.7              |
| $B$ , $\frac{Тл}{дел}$  | 3.3               | 4.8               | 8.3               |
| $H_{max}$ , А/м         | $45 \pm 1$        | $49.58 \pm 0.97$  | $107 \pm 3$       |
| $B_s$ , Тл              | $13.7 \pm 0.3$    | $10.0 \pm 0.5$    | $18.3 \pm 0.8$    |
| $H_c$ , А/м             | $6 \pm 1$         | $5.83 \pm 0.97$   | $16 \pm 3$        |
| $B_r$ , Тл              | $5.3 \pm 0.3$     | $7.7 \pm 0.5$     | $13.3 \pm 0.8$    |
| $\mu_{дифнач}$          | $0.29 \pm 0.08$   | $0.04 \pm 0.02$   | $0.37 \pm 0.02$   |
| $\mu_{дифмакс}$         | $0.58 \pm 0.01$   | $0.68 \pm 0.04$   | $0.382 \pm 0.004$ |

Таблица 2: Результаты расчётов

|      | Ампл.       | Fe-Ni           | Fe-Si          | Феррит         |
|------|-------------|-----------------|----------------|----------------|
| эксп | $H_c$ , А/м | $5.83 \pm 0.97$ | $16 \pm 3$     | $6 \pm 1$      |
| табл |             | 4               | 8              | 8              |
| эксп | $B_s$ , Тл  | $10.0 \pm 0.5$  | $18.3 \pm 0.8$ | $13.7 \pm 0.3$ |
| табл |             | 1.1             | 2              | 0.2-0.4        |

Таблица 3: Результаты расчётов и табличные значения