

# Отчет о выполнении лабораторной работы 3.4.5 Петля гистерезиса (динамический метод)

Выполнил: Голубович Тимур, группа Б01-108

10.09.2022

## Цель работы

Изучение петель гистерезиса различных ферромагнитных материалов в переменных полях.

## Оборудование и приборы

Автотрансформатор; понижающий трансформатор; амперметр и вольтметр (мультиметры); резистор; делитель напряжения; интегрирующая цепочка; электронный осциллограф; тороидальные образцы с двумя обмотками.

## Теоретическое введение

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

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.

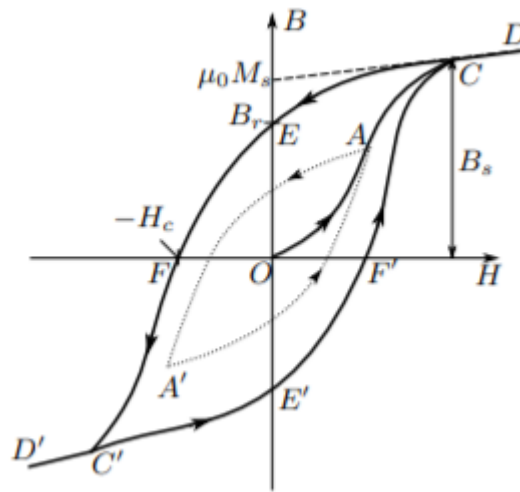


Рис. 1: Петля гистерезиса ферромагнетика

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  $\Phi$  в катушке, намотанной на образец. Пусть катушка с  $N$  витками плотно охватывает образец сечением  $S$ , и индукция  $B$  в образце однородна. Тогда

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

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» на-

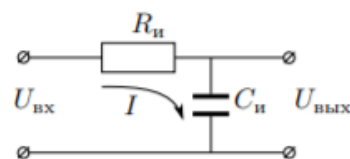


Рис. 2: Интегрирующая ячейка

пряжение  $U_{\text{вых}}(t)$  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

$$U_{\text{вых}} = \frac{q}{C_{\text{и}}} = \frac{1}{C_{\text{и}}} \int_0^t I dt \approx \frac{1}{\tau_{\text{и}}} \int_0^t U_{\text{вх}} dt, \quad (2)$$

где  $\tau_{\text{и}} = R_{\text{и}}C_{\text{и}}$  - постоянная времени  $RC$  - цепочки. Для индукции поля из (1) получаем

$$|B| = \frac{1}{SN} \int U_{\text{вх}} dt = \frac{\tau_{\text{и}}}{SN} U_{\text{вых}}. \quad (3)$$

**Замечание.** Уточним критерий применимости соотношения (2). Пусть на вход интегрирующей ячейки подан синусоидальный сигнал с частотой  $\omega_0$ . Тогда, пользуясь методом комплексных амплитуд, нетрудно найти отношение амплитуд входного и выходного напряжений:

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1/\omega_0 C}{\sqrt{R^2 + 1/(\omega_0 C)^2}}. \quad (4)$$

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

$$\tau \equiv RC \gg \frac{1}{\omega_0} \quad (5)$$

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

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \approx \frac{1}{\omega_0 \tau}. \quad (6)$$

В общем случае, если  $\omega_0$  — 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  $\omega > \omega_0$ .

Рассчитать дифференциальную магнитную проницаемость можно по формуле:

$$\mu_{\text{диф}} = \frac{dB}{dH} = \frac{B_{\text{дел}}}{H_{\text{дел}}} \cdot \frac{dy}{dx} \quad (7)$$

## Экспериментальная установка

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.

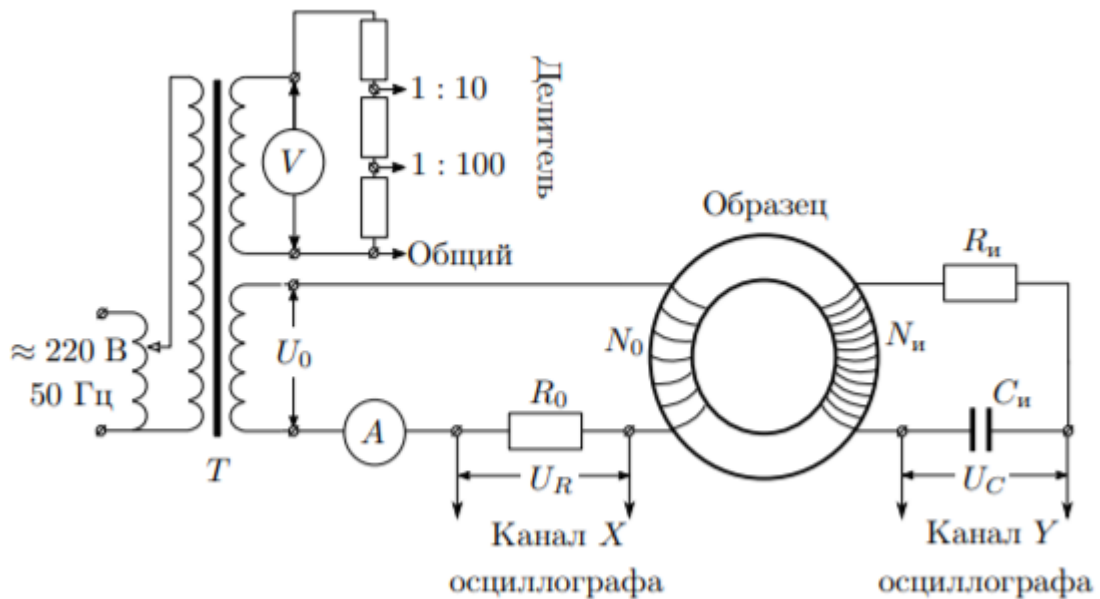


Рис. 3: Схема установки для исследования намагничивания образцов

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 А. 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 (3). 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 м

## Ход работы

### Измерение петель гистерезиса

Соберем схему согласно рис. 3. Подберем ток питания в намагничивающей обмотке с помощью автотрансформатора и коэффициенты усиления ЭО таким образом, чтобы предельная петля гистерезиса занимала большую часть экрана. Приведем характерные значения катушек разных материалов в таблице 1.

|                     | Феррит | Пермаллой | Кремниевое железо |
|---------------------|--------|-----------|-------------------|
| $N_0$               | 42     | 20        | 25                |
| $N_{\text{и}}$      | 400    | 300       | 250               |
| $S^2, \text{см}^2$  | 3,00   | 0,76      | 2,00              |
| $2\pi R, \text{см}$ | 25,0   | 13,3      | 11,0              |

Таблица 1: Характеристики катушек

Для каждого образца получим предельные петли гистерезиса, по коэффициентам усиления ЭО  $K_x$  и  $K_y$  рассчитаем масштабы, определим двойные амплитуды коэрцитивной силы  $2x(c)$  и индукции насыщения  $2y(s)$ . Масштабы по осям  $X$  и  $Y$  рассчитаем по формулам  $H = \frac{IN_0}{2\pi R}$ ,  $I = \frac{K_x}{R_0}$ ;  $B = \frac{R_{\text{и}} C_{\text{и}} U_{\text{вых}}}{S N_{\text{и}}}$ , где  $U_{\text{вых}} = K_y$ . Результаты измерений и вычислений занесём в таблицу 2.

|  | Феррит | Пермаллой | Кремниевое железо |
|--|--------|-----------|-------------------|
| $2x(c), \text{дел}$                        | 5,4    | 4,5       | 5,0               |
| $2y(s), \text{дел}$                        | 6,0    | 2,0       | 4,0               |
| $K_x, \text{мВ/дел}$                       | 20     | 20        | 20                |
| $K_y, \text{мВ/дел}$                       | 1      | 1         | 1                 |
| $I_{\text{эфф}}, \text{мА}$                | 100    | 100       | 100               |
| $H, \text{А}\cdot\text{м}^{-1}/\text{дел}$ | 16,80  | 15,04     | 22,73             |
| $B, \text{Тл/дел}$                         | 0,33   | 1,75      | 0,80              |

Таблица 2: Результаты измерений

Теперь, зная масштабы по осям, можно определить значения коэрцитивной силы  $H_c$  и индукции насыщения  $B_s$ . Результаты заносим в таблицу 3.

|                      | Феррит | Пермаллой | Кремниевое железо |
|----------------------|--------|-----------|-------------------|
| $H_c$ , А/м          | 50     | 60        | 91                |
| $\sigma_{H_c}$ , А/м | 6      | 8         | 10                |
| $B_s$ , Тл           | 0,90   | 3,9       | 2,0               |
| $\sigma_{B_s}$ , Тл  | 0,08   | 0,2       | 0,10              |

Таблица 3: Результаты вычислений

Также в следующую таблицу 4 занесём табличные данные для значений коэрцитивной силы  $H_c$  и индукции насыщения  $B_s$ .

|             | Феррит | Пермаллой | Кремниевое железо |
|-------------|--------|-----------|-------------------|
| $H_c$ , А/м | 20     | 11-40     | 50-100            |
| $B_s$ , Тл  | 0,27   | 1,51      | 1,21              |

Таблица 4: Табличные данные

Сравнивая полученные данные с табличными можно утверждать, что они совпадают, по крайней мере по порядку величины. Также приведём фотографии предельных петель гистерезиса.

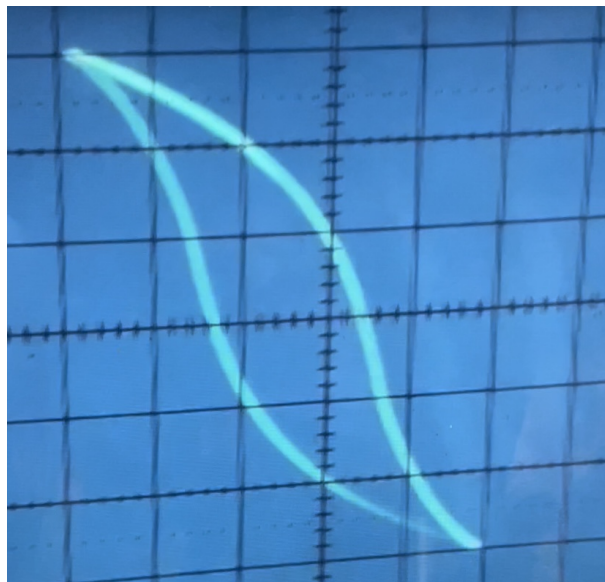


Рис. 4: Предельная петля гистерезиса феррита

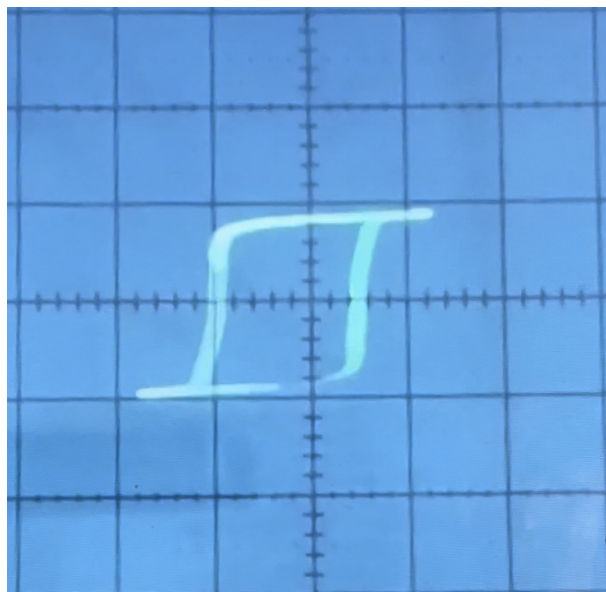


Рис. 5: Предельная петля гистерезиса пермаллоя

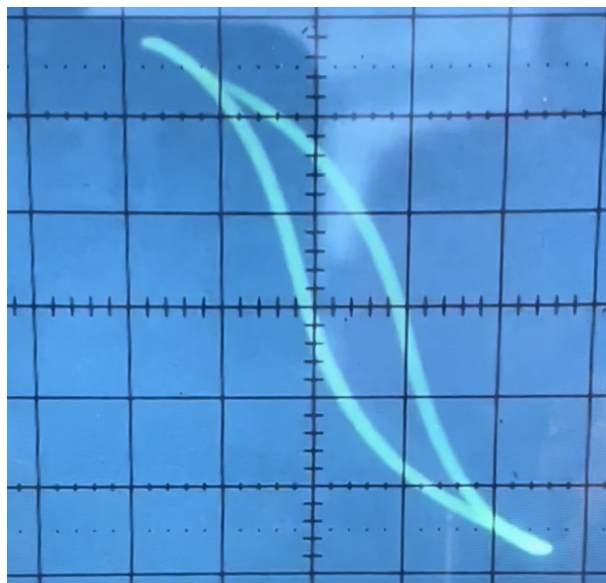


Рис. 6: Предельная петля гистерезиса для кремнистого железа

### Построение начальных кривых намагничивания

Построим графики начальных кривых намагничивания по таблице 5. После этого проведём интерполяцию полиномами и рассчитаем значе-

### Работа 3.4.5

ния начальных и максимальных значений дифференциальной магнитной проницаемости. Соответствующие значения запишем в таблицу 6.

| Феррит  |           |           | Кремниевое железо |           |           | Пермаллой |           |           |
|---------|-----------|-----------|-------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $I$ , А | $X$ , дел | $Y$ , дел | $I$ , А           | $X$ , дел | $Y$ , дел | $I$ , А   | $X$ , дел | $Y$ , дел |
| 357     | 2,7       | 3,0       | 360               | 2,7       | 3,0       | 319       | 3,4       | 1,0       |
| 316     | 2,2       | 2,9       | 317               | 2,3       | 2,8       | 288       | 3,0       | 1,0       |
| 286     | 2,0       | 2,8       | 284               | 1,9       | 2,6       | 246       | 2,3       | 1,0       |
| 247     | 1,8       | 2,6       | 247               | 1,6       | 2,2       | 217       | 2,0       | 1,0       |
| 213     | 1,4       | 2,1       | 210               | 1,4       | 2,0       | 184       | 1,4       | 1,0       |
| 175     | 1,2       | 1,8       | 182               | 1,2       | 1,6       | 146       | 0,9       | 0,8       |
| 147     | 1,0       | 1,4       | 120               | 0,7       | 0,8       | 111       | 0,3       | 0,4       |
| 117     | 0,8       | 1,0       | 90                | 0,5       | 0,5       | 50        | 0,2       | 0,2       |
| 87      | 0,6       | 0,7       | 57                | 0,3       | 0,2       | 0         | 0         | 0         |
| 47      | 0,4       | 0,3       | 28                | 0,2       | 0,1       |           |           |           |
| 0       | 0         | 0         | 0                 | 0         | 0         |           |           |           |

Таблица 5: Начальные кривые намагничивания

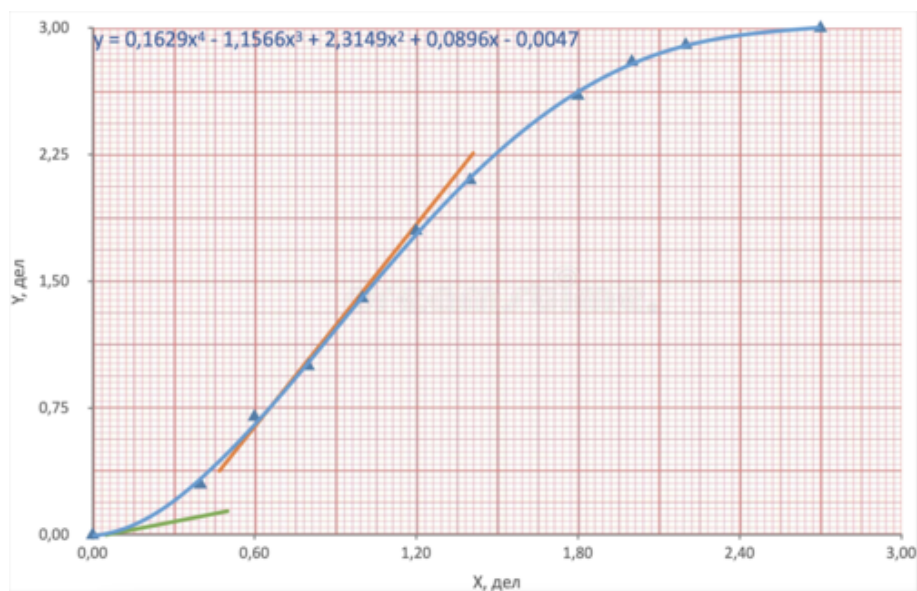


Рис. 7: Начальная кривая намагничивания феррита



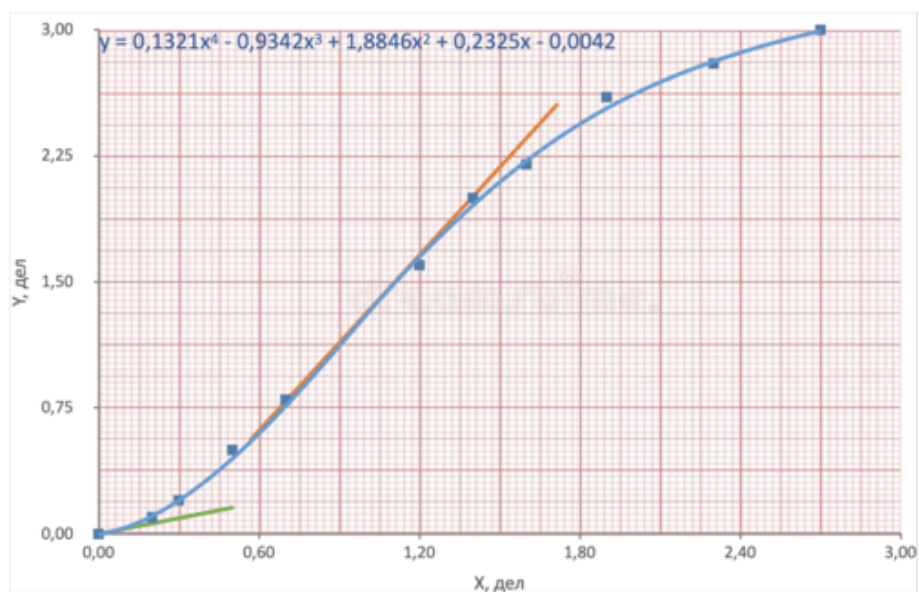


Рис. 8: Начальная кривая намагничивания кремнистого железа

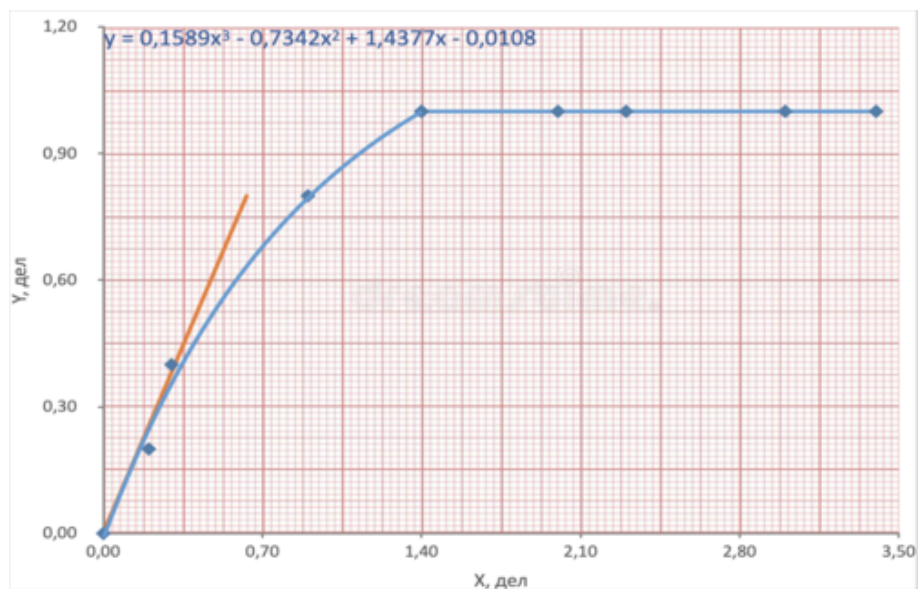


Рис. 9: Начальная кривая намагничивания пермаллоя

|   | Феррит | Пермаллой | Кремниевое железо |
|---|--------|-----------|-------------------|
| $\mu_{нач}, 10^{-3} \cdot \text{Тл} \cdot \text{А/м}$ | 6,2    | 27,1      | 44,5              |
| $\mu_{мах}, 10^{-3} \cdot \text{Тл} \cdot \text{А/м}$ | 39,6   | 203,0     | 44,5              |

Таблица 6: Значения дифференциальной магнитной проницаемости

## Расчёт постоянной времени цепочки

Рассчитаем постоянную времени по формуле (6) из таблицы 7.

$$\tau = \frac{2y \cdot K_y}{\Omega \cdot 2x \cdot K_x} = (0,35 \pm 0,02) \quad \varepsilon_\gamma = 6\%$$

| $2x(c)$ , дел | $2y(c)$ , дел | $K_x$ , мВ/дел | $K_y$ , В/дел | $U_{вх}$ , В | $U_{вых}$ , В | $\tau$ , с | $\sigma_\tau$ , с | $\varepsilon_\tau$ , % |
|---------------|---------------|----------------|---------------|--------------|---------------|------------|-------------------|------------------------|
| 5,4           | 6,0           | 20             | 2,00          | 12,000       | 0,108         | 0,35       | 0,02              | 6                      |

Таблица 7: Расчёт постоянной времени цепочки

Результат довольно хорошо согласуется с теоретическим значением  $\tau = 0,4$  с.

## Вывод

В результате работы были получены результаты для трёх образцов: феррита, кремниевого железа и пермаллоя. Была рассчитана индукция насыщения  $B_s$ , коэрцитивное поле  $H_c$ , остаточная индукция  $B_r$ , а также определены начальные и максимальные значения дифференциальной магнитной проницаемости. Измерена постоянная времени данной цепочки.

## Список литературы

- [1] Сивухин Д. В. *Общий курс физики. Том 3 Электричество и магнетизм*, 2004
- [2] Кириченко Н.А. *Электричество и магнетизм.*, 2011
- [3] *Лабораторный практикум по общей физике. В 3 томах. Том 2. Электричество и магнетизм: учебное пособие* под ред. А. В. Максимычева, М. Г. Никулина