

---

Группа: K3221

Студенты: *Доценников Никита, Карпов Иван*

Преподаватель: *Попов Антон Сергеевич*

К работе допущен:

Работа выполнена:

Отчет принят:

## Рабочий протокол и отчет по лабораторной работе №3.07

---

### Цели работы.

1. Измерение зависимости магнитной индукции в ферромагнетике от напряженности магнитного поля  $B = B(H)$
2. Определение по предельной петле гистерезиса индукции насыщения, остаточной индукции и коэрцитивной силы
3. Получение зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля  $\mu = \mu(H)$  и оценка максимального значения величины магнитной проницаемости
4. Расчет мощности потерь энергии в ферромагнетике в процессе его перемагничивания

**Рабочие формулы и исходные данные.**

Формула	Пояснение
$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{J})$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\vec{B}</math> - индукция магнитного поля</li> <li>• <math>\mu_0\vec{H}</math> - индукция поля, созданного макроскопическими токами</li> <li>• <math>\mu_0\vec{J}</math> - индукция поля, созданного самим материалом</li> <li>• <math>\vec{H}</math> - напряженность магнитного поля</li> <li>• <math>\vec{J}</math> - намагниченность материала</li> <li>• <math>\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}</math> Гн/м - магнитная постоянная</li> </ul>
$\mu = 1 + \frac{J}{H} = \frac{B}{\mu_0 H}$	Магнитная проницаемость.
$H = \frac{N_1}{l} \cdot I_1$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>N_1</math> - количество витков на первичной обмотке</li> <li>• <math>H</math> - напряженность поля</li> <li>• <math>l</math> - средняя длина магнитопровода</li> <li>• <math>I_1</math> - сила тока на первичной обмотке</li> </ul>
$H = \frac{N_1}{lR_1} \cdot K_x \cdot x = \alpha \cdot K_x \cdot x$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>R_1</math> - сопротивление резистора, подключенного последовательно с первичной обмоткой</li> <li>• <math>K_x</math> - цена деления горизонтальной шкалы</li> <li>• <math>x</math> - координата по горизонтальной оси <math>OX</math> экрана осциллографа относительно центра петли гистерезиса</li> </ul>
$B = \frac{R_2 C_1}{N_2 S} \cdot K_y \cdot y = \beta \cdot K_y \cdot y$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>B</math> - индукция магнитного поля</li> <li>• <math>R_2</math> - сопротивление резистора в RC-цепочке</li> <li>• <math>C_1</math> - емкость конденсатора в RC-цепочке</li> <li>• <math>N_2</math> - число витков вторичной обмотки</li> <li>• <math>S</math> - площадь поперечного сечения магнитопровода</li> <li>• <math>K_y</math> - цена деления вертикального отклонения</li> <li>• <math>y</math> - вертикальный размер осциллограммы</li> </ul>
$P = \chi \cdot S_{\text{III}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>P</math> - средняя мощность, расходуемая внешним источником тока при циклическом перемагничивании ферромагнитного образца</li> <li>• <math>S_{\text{III}}</math> - площадь петли гистерезиса (в делениях шкалы осциллографа)</li> <li>• <math>\chi</math> - коэффициент</li> </ul>
$\chi = K_x K_y \frac{N_1 R_2 C_1}{N_2 R_1} f$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>f</math> - частота сигнала, подаваемого на первичную обмотку трансформатора</li> </ul>

Табл. 1: Основные формулы

### Схема установки

Параметр	Значение
$R_1$	68 Ом
$R_2$	470 кОм = $470 \cdot 10^3$ Ом
$C_1$	0.47 мкФ = $0.47 \cdot 10^{-6}$ Ф

Табл. 2: Параметры установки

Параметр	Значение
$S$	$0.64 \text{ см}^2 = 6.4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$
$L$	7.8 см = 0.078 м
$N_1$	1665 вит
$N_2$	970 вит

Табл. 3: Параметры трансформатора

### Результаты прямых измерений

$$K_x = 0.2 \text{ В/дел} \quad K_y = 0.05 \text{ В/дел}$$

$X_c$ , дел	$Y_r$ , дел	$H_c$ , А/м	$B_r$ , Тл
0.5	1.7	31.49	0.303

Табл. 4:

$X_m$ , дел	$Y_m$ , дел	$H_m$ , А/м	$B_m$ , Тл	$\mu_m$
4.1	3.9	258.23	0.694	2138.67

Табл. 5:

$U$ , В	$X$ , дел	$K_x$ , В/дел	$H$ , А/м	$Y$ , дел	$K_y$ , В/дел	$B$ , Тл	$\mu$
20	3.9	0.2	245.63	4.1	0.05	0.73	2365.56
19	3.3	0.2	207.84	4.1	0.05	0.73	2795.66
18	3.1	0.2	195.24	3.9	0.05	0.69	2830.85
17	2.9	0.2	182.65	3.7	0.05	0.66	2870.90
16	2.7	0.2	170.05	3.5	0.05	0.62	2916.88
15	2.3	0.2	144.86	3.3	0.05	0.59	3228.49
14	2.1	0.2	132.26	3.1	0.05	0.55	3321.67
13	3.8	0.1	119.67	2.9	0.05	0.52	3434.46
12	3.3	0.1	103.92	2.7	0.05	0.48	3682.08
11	2.9	0.1	91.32	2.5	0.05	0.45	3879.59
10	2.7	0.1	85.03	2.3	0.05	0.41	3833.61
9	2.3	0.1	72.43	2.1	0.05	0.37	4108.99
8	2.1	0.1	66.13	1.9	0.05	0.34	4071.72
7	3.5	0.05	55.11	1.7	0.05	0.30	4371.74
6	3.3	0.05	51.96	3.5	0.02	0.25	3818.46
5	3.0	0.05	47.24	2.9	0.02	0.21	3480.25

Табл. 6:

### Расчеты

По условию:

$$H = \alpha \cdot K_x \cdot x, \quad \alpha = \frac{N_1}{lR_1}, \quad B = \beta \cdot K_y \cdot y, \quad \beta = \frac{R_2 C_1}{N_2 S}$$

Подставив числа, получим:

$$\alpha = \frac{1665}{0.078 \cdot 68} \approx 313.914 \text{ А/м}, \quad \beta = \frac{470000 \cdot 0.47 \cdot 10^{-6}}{970 \cdot 6.4 \cdot 10^{-5}} = 3.5583 \text{ Т}$$

Объем образца:

$$V = l \cdot S = 0.078 \cdot 6.4 \cdot 10^{-5} = 4.992 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

Вычисление коэрцитивной силы  $H_c$ :

$$H_c = \alpha \cdot K_x \cdot X_c = 313.914 \cdot 0.2 \cdot 0.5 \approx 31.49 \text{ А/м}$$

Рассчитаем погрешность:

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)^2} = \sqrt{(0.01282)^2 + (0.01)^2} \approx 0.01625$$

Для  $H_c = \alpha K_x X_c$ :

$$\frac{\Delta H_c}{H_c} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\Delta K_x}{K_x}\right)^2 + \left(\frac{\Delta X_c}{X_c}\right)^2} = \sqrt{0.01625^2 + 0.01^2 + 0.10^2} \approx 0.1018$$

$$H_c = 31.49 \pm 3.21 \text{ А/м.}$$

Вычисление остаточной индукции  $B_r$ :

$$B_r = \beta \cdot K_y \cdot Y_r = 3.5583 \cdot 0.05 \cdot 1.7 \approx 0.303 \text{ Т}$$

Посчитаем погрешность:

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_2}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_1}{C_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2} = \sqrt{0.01^2 + 0.05^2 + 0.02^2} \approx 0.05477$$

Для  $B_r = \beta K_y Y_r$ :

$$\frac{\Delta B_r}{B_r} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\beta}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{\Delta K_y}{K_y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Y_r}{Y_r}\right)^2} = \sqrt{0.05477^2 + 0.01^2 + 0.02941^2} \approx 0.06297$$

$$B_r = 0.303 \pm 0.019 \text{ Т}$$

Вычисление напряженности  $H_m$ :

$$H_m = \alpha \cdot K_x \cdot X_m = 313.914 \cdot 0.2 \cdot 4.1 \approx 257.41 \text{ А/м}$$

Вычисление индукции  $B_m$ :

$$B_m = \beta \cdot K_y \cdot Y_m = 3.5583 \cdot 0.05 \cdot 3.9 \approx 0.6939 \text{ Т}$$

Вычисление магнитной проницаемости  $\mu_m$ :

$$\mu_m = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} \approx \frac{0.69387}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 257.41} \approx 2.15 \cdot 10^3$$

Рассчитаем погрешность:

$$\frac{\Delta\mu_m}{\mu_m} = \sqrt{\left(\frac{\Delta B_m}{B_m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H_m}{H_m}\right)^2}$$

$$\mu_m = (2.15 \pm 0.13) \cdot 10^3$$

Вычисление коэффициента  $\chi$ :

$$\chi = V \cdot \alpha \cdot \beta \cdot f = 4.992 \cdot 10^{-6} \cdot 313.914 \cdot 3.5583 \cdot 30 \approx 0.16728 \text{ Вт/дел}^2$$

Вычисление потерей при перемагничивании  $P$ :

$$P = \chi \cdot S_{\text{III}} = 0.16728 \cdot 8 \approx 1.33824 \text{ Вт}$$

Погрешность.

$$\frac{\Delta\chi}{\chi} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_2}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C_1}{C_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2} = \sqrt{0.01^2 + 0.05^2 + 0.01^2 + 0.01^2} \approx 0.0529$$

$$\frac{\Delta P}{P} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\chi}{\chi}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S_{\text{III}}}{S_{\text{III}}}\right)^2} = \sqrt{0.0529^2 + 0.05^2} \approx 0.0728$$

$$P = 1.34 \pm 0.10 \text{ Вт.}$$

Кривая начального намагничивания  $B_m = B_{m(H_m)}$  (Рис. 1)

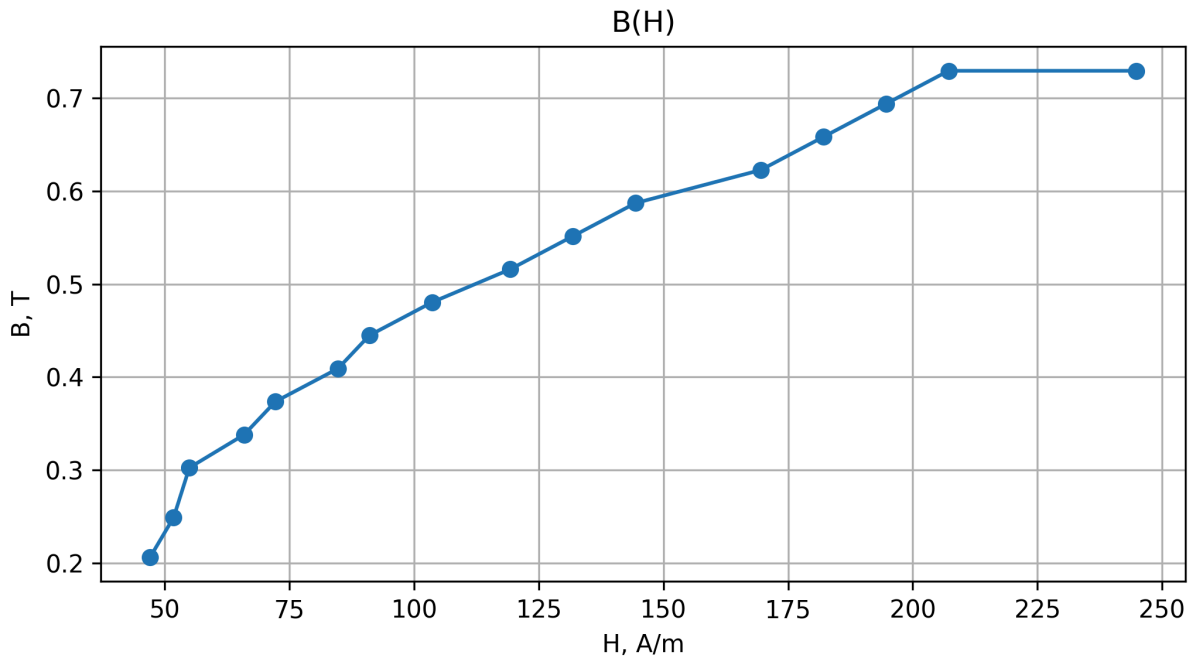


Рис. 1: Кривая начального намагничивания  $B_m = B_m(H_m)$ .

График зависимости магнитной проницаемости  $\mu = \mu(H_m)$  от напряженности магнитного поля. (Рис. 2)

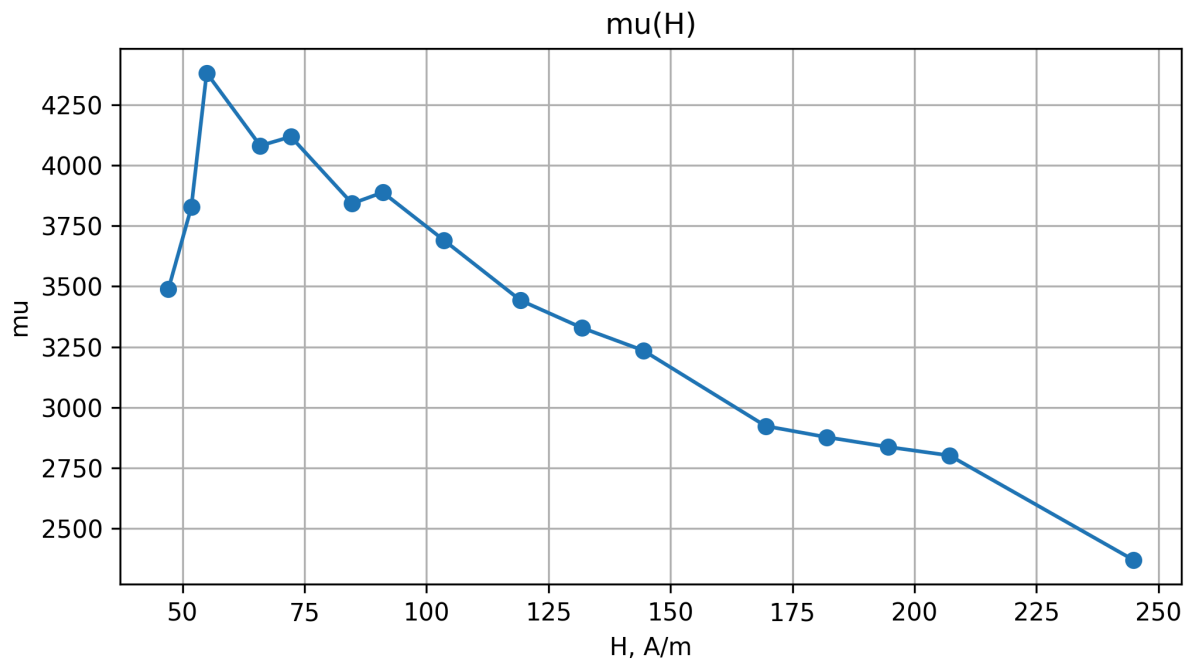


Рис. 2: График зависимости магнитной проницаемости  $\mu = \mu(H_m)$ .

Вычисление  $\mu_{\max}$ :

$$\mu_{\max} = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/м.}$$

Подставив значения, получим:

$$\mu_{\max} = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{0.3}{1.25663706 \cdot 10^{-6} \cdot 55.11} = 4330.3 \quad \text{при } H = 55.11 \text{ А/м}$$

Посчитаем погрешность.

$$\frac{\Delta \mu_{\max}}{\mu_{\max}} = \sqrt{(0.06297)^2 + (0.02384)^2} \approx 0.06736$$

$$\mu_{\max} = 4330 \pm 290$$

### Результаты и выводы

В ходе проделанной работы удалось рассчитать значение коэрцитивной силы ( $H_c \approx 31.49 \pm 3.21$  А/м), остаточной индукции ( $B_r \approx 0.303 \pm 0.019$  Т) и магнитной проницаемости ( $\mu_m \approx (2.15 \pm 0.13) \cdot 10^3$ ) в состоянии насыщения. Также была рассчитана мощность потерь на перемагничивание ферромагнетика ( $P \approx 1.34 \pm 0.10$  Вт). Были построены графики зависимостей магнитной индукции (Рис. 1) и проницаемости (Рис. 2) от напряженности. Максимальное значение проницаемости ( $\mu_{\max} \approx 4330.3 \pm 290$ ) и напряженность поля ( $H \approx 55.11$  А/м), при которой она наблюдается.