



Группа Р3131 К работе допущен \_\_\_\_\_  
Студент Зубахин Д. С. Работа выполнена \_\_\_\_\_  
Преподаватель Нурьев Р. К. Отчет принят \_\_\_\_\_

## Рабочий протокол и отчет по лабораторной работе №3.07

### Изучение свойств ферромагнетика

#### 1. Цель работы.

Изучить свойства ферромагнетика.

#### 2. Задачи, решаемые при выполнении работы.

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

#### 3. Объект исследования.

Ферромагнетик.

#### 4. Метод экспериментального исследования.

Изменение напряженности магнитного поля.

#### 5. Рабочие формулы и исходные данные.

5.1. Коэффициент  $\alpha$ :  $\alpha = \frac{N_1}{l \cdot R_1}$

5.2. Коэффициент  $\beta$ :  $\beta = \frac{R_2 \cdot C_1}{N_2 \cdot S}$

5.3. Магнитная проницаемость  $\mu$ :  $\mu = \frac{B_m}{\mu_0 \cdot H_m}$

5.4. Коэффициент  $\chi$ :  $\chi = K_x K_y \cdot \frac{N_1 R_2 C_1}{N_2 R_1} \cdot f$

5.5. Остаточная индукция  $B$ :  $B = \beta \cdot K_y \cdot Y$

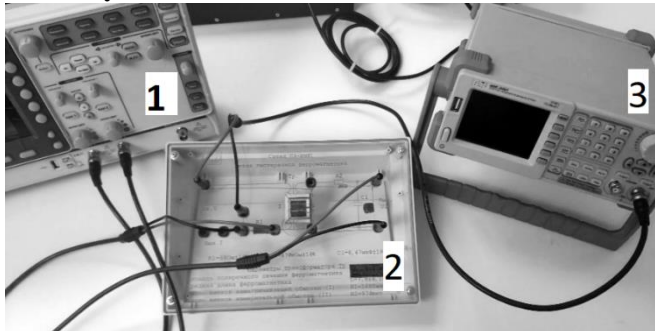
5.6. Коэрцитивная сила  $H$ :  $H = \alpha \cdot K_x \cdot X$

5.7. Средняя мощность  $P$ , расходуемая на перемагничивание образца:  $P = \chi \cdot S_{\text{пл}}$

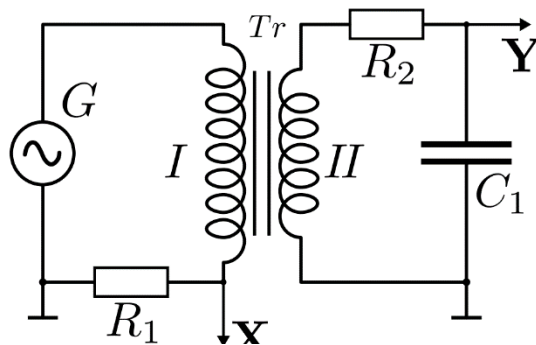
## 6. Измерительные приборы.

№ п/п	Наименование	Цена деления	Диапазон	$\Delta_{\text{и}}$
1	Цифровой запоминающий осциллограф	-	-	-

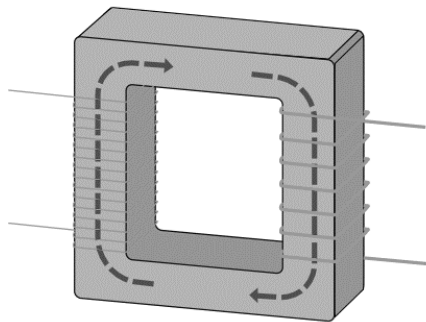
## 7. Схема установки.



1. Генератор сигналов АКИП-3409/2
2. Стенд с образцом
3. Цифровой запоминающий осциллограф (ЦЗО)



Принципиальная схема установки



В лабораторной работе в качестве образца для изучения магнитных свойств ферромагнитного материала выбран сердечник (магнитопровод) трансформатора, размещенного на лабораторном стенде. Объект измерений имеет прямоугольную форму с прямоугольным же поперечным сечением.

### Параметры установки

$R_1$	68 Ом
$R_2$	470 кОм
$C_1$	0,47 мкФ

### Параметры трансформатора

$S$	0,64 см <sup>2</sup>
$L$	7,8 см
$N_1$	1665 вит
$N_2$	970 вит

## 8. Результаты прямых измерений и расчетов

Таблица 1.

$X_c$ , дел.	$Y_r$ , дел.	$H_c$ , А/м	$B_r$ , Тл
1,4	1,3	38	0,23

Таблица 2.

$X_m$ , дел.	$Y_m$ , дел.	$H_m$ , А/м	$B_m$ , Тл	$\mu_m$
3,8	2,6	120	0,4	3086

Таблица 3.

$U$ , В	$X$ , дел.	$K_x, \frac{В}{дел}$	$H$ , А/м	$Y$ , дел.	$K_y, \frac{В}{дел}$	$B$ , Тл	$\mu$
20	3,80	0,1	119	2,6	0,05	0,5	3086
19	3,50	0,1	110	2,5	0,05	0,4	3222
18	3,20	0,1	100	2,3	0,05	0,4	3242
17	3,00	0,1	94	2,15	0,05	0,4	3232
16	2,90	0,1	91	2,1	0,05	0,4	3266
15	2,60	0,1	82	2	0,05	0,4	3469
14	2,40	0,1	75	1,8	0,05	0,32	3383
13	2,10	0,1	66	1,7	0,05	0,3	3651
12	2,00	0,1	63	1,6	0,05	0,28	3608
11	1,90	0,1	60	1,5	0,05	0,27	3561
10	3,30	0,05	52	3,7	0,02	0,26	4045
9	3,20	0,05	50	3,5	0,02	0,25	3946
8	3,00	0,05	47	3	0,02	0,21	3608
7	2,70	0,05	42	2,7	0,02	0,19	3608
6	2,60	0,05	41	2,4	0,02	0,17	3331

5	2,40	0,05	38	2	0,02	0,14	3007
---	------	------	----	---	------	------	------

## 9. Расчет результатов косвенных измерений.

Расчёт коэффициента  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{N_1}{l \cdot R_1} = \frac{1665}{0,078 \cdot 68} = 313,91403 = \frac{1}{\text{м} \cdot \text{Ом}} = 314 \frac{1}{\text{м} \cdot \text{Ом}}$$

Расчёт коэффициента  $\beta$ :

$$\beta = \frac{R_2 \cdot C_1}{N_2 \cdot S} = \frac{470000 \cdot 0,47 \cdot 10^{-6}}{970 \cdot 0,64 \cdot 10^{-4}} = 3,55831 \frac{\text{Ом} \cdot \Phi}{\text{м}^2} = 4 \frac{\text{Ом} \cdot \Phi}{\text{м}^2}$$

Расчёт коэрцитивной силы  $H_c$ :

$$H_c = \alpha \cdot K_x \cdot X_c = 313,91403 \cdot 0,1 \cdot 1,4 = 43,947 \text{ А/м} = 44 \text{ А/м}$$

Расчёт остаточной индукции  $B_r$ :

$$B_r = \beta \cdot K_y \cdot Y_r = 3,55831 \cdot 0,05 \cdot 1,3 = 0,231 \text{ Тл} = 0,23 \text{ Тл}$$

Расчёт коэрцитивной силы  $H_m$ :

$$H_m = \alpha \cdot K_x \cdot X_m = 313,91403 \cdot 0,01 \cdot 3,8 = 119,287 \text{ А/м} = 120 \text{ А/м}$$

Расчёт остаточной индукции  $B_m$ :

$$B_m = \beta \cdot K_y \cdot Y_r = 3,55831 \cdot 0,05 \cdot 2,6 = 0,4626 \text{ Тл} = 0,4 \text{ Тл}$$

Расчёт магнитной проницаемости  $\mu$ :

$$\mu = \frac{B_m}{\mu_0 \cdot H_m} = \frac{0,4626}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 119,287} = 3086,047 = 3086$$

Расчёт коэффициента  $\chi$ :

$$\chi = K_x K_y \cdot \frac{N_1 R_2 C_1}{N_2 R_1} \cdot f = 0,1 \cdot 0,05 \cdot \frac{1665 \cdot 470000 \cdot 0,47 \cdot 10^{-6}}{970 \cdot 68} \cdot 30 = 8,364 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/с} = 0,8 \text{ мДж/с}$$

Площадь петли  $S_{\text{пт}}$ :

$$S_{\text{пт}} = 8 \text{ дел}^2$$

Максимальное значение проницаемости  $\mu_{\text{max}} = 4045$ , напряженность поля, при которой она наблюдается = **52 А/м**.

Расчёт средней мощности  $P$ , расходуемой на переманчивание образца:

$$P = \chi \cdot S_{\text{пт}} = 8,364 \cdot 10^{-4} \cdot 8 = 6,6913 \text{ мВт} = 7 \text{ мВт}$$



### Изображение петли гистерезиса



#### Окончательные результаты:

1. Коэрцитивная сила:  $H_m = 120 \text{ А/м}$   
Остаточная индукция:  $B_m = 0,4 \text{ Тл}$   
Магнитная проницаемость:  $\mu_m = 3086$
2. Мощность потерь на перемагничивание:  $P = 7 \text{ мВт}$
3. Построены графики зависимостей  $B_m = B_m(H_m)$  и  $\mu = \mu(H_m)$
4. Максимальное значение магнитной проницаемости:  $\mu_{max} = 4045$
5. Напряжённость:  $H = 52 \text{ А/м}$

#### Выводы:

С помощью многократных прямых и косвенных измерений были рассчитаны коэрцитивная сила, остаточная индукция и магнитная проницаемость, а также построены графики зависимостей  $B_m = B_m(H_m)$  и  $\mu = \mu(H_m)$  и рассчитаны мощность потерь на перемагничивание ферромагнетика, максимальное значение проницаемости.

Вопросы:

1. Почему график ведёт себя именно так?
2. Когда достигается минимальная и максимальная проницаемость?
3. Что будет если мы будем бесконечно увеличивать напряженность магнитного поля?  
Как это повлияет на результат?

Вопрос 1:

Основываясь на следующей формуле:  $\mu = \frac{B_m}{\mu_0 \cdot H_m}$

Магнитная проницаемость обратно пропорциональна напряженности магнитного поля. При возрастании магнитной индукции и напряженности магнитного поля (первая растёт быстрее), растёт проницаемость. Когда материал становится насыщенным, то магнитная индукция перестаёт расти, а напряженность продолжает расти. Вследствие этого, проницаемость начинает убывать.

Вопрос 2:

Магнитная проницаемость зависит от свойств вещества, его состояния; от условий окружающей среды (например, от температуры, давления и т.д); от величины и направления магнитного поля для анизотропных веществ. Также она зависит от скорости изменения поля со временем, в частности, для синусоидального изменения поля — зависит от частоты этого колебания. Для нелинейных по магнитной восприимчивости сред, в том числе ферромагнетиков, магнитная проницаемость сильно зависит от величины поля.

С ростом  $H$  магнитная проницаемость растёт, достигает максимального значения при  $H$  несколько меньшем, чем поле насыщения ферромагнетика (точка а петли гистерезиса), затем магнитная проницаемость уменьшается, асимптотически приближаясь к единице.

Вопрос 3:

Когда напряженность поля достигает определенного значения, материал становится насыщенным, то есть магнитный момент больше не увеличивается. При снятии поля вновь наблюдается наличие остаточного момента, который снова можно убрать. Дальнейшее увеличение поля приводит к попаданию в точку насыщения с противоположным значением.

При полном насыщении домены переориентируются.