



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Физика»

Практикум

Лабораторная работа №Э18

«Определение магнитных характеристик
ферромагнетиков с помощью электронного
осциллографа»
по дисциплине

«Физика»

Авторы

Бажин И. В.,
Ершов И. В.,
Жданова Т. П.,
Лемешко Г. Ф.,
Попова И. Г.

Ростов-на-Дону, 2019

Аннотация

Методические указания содержат краткое описание рабочей установки и методики определения магнитных характеристик ферромагнетиков.

Предназначены для студентов инженерных специальностей всех форм обучения в лабораторном практикуме по физике (раздел «Электричество»).

Авторы

к.ф.-м.н, доцент кафедры «Физика»

Бажин И.В.,

к.ф.-м.н, доцент кафедры «Физика»

Ершов И.В.,

к.ф.-м.н, доцент кафедры «Физика»

Жданова Т.П.,

к.ф.-м.н, профессор кафедры «Физика»

Лемешко Г.Ф.,

к.ф.-м.н, доцент кафедры «Физика»

Попова И.Г.



Оглавление

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	4
Порядок выполнения работы	10
Контрольные вопросы	13
Список литературы	13

Цель работы: изучение магнитных характеристик ферромагнетиков и ознакомление с осциллографическим методом их измерения.

Оборудование: тороид из исследуемого вещества, осциллограф, потенциометр, сопротивление, источник переменного тока.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Магнитное поле – это форма материи, окружающей движущиеся электрические заряды и намагниченные тела. Силовую характеристику магнитного поля называют индукцией магнитного поля \vec{B} .

Линии магнитной индукции (силовые линии магнитного поля) – воображаемые линии, в каждой точке которой вектор магнитной индукции \vec{B} направлен по касательной.

Линии индукции магнитного поля всегда замкнуты и всегда охватывают проводники с током. Замкнутость линий индукции свидетельствует об отсутствии в природе магнитных зарядов. Поле, силовые линии которого всегда замкнуты, называется вихревым. Магнитных зарядов, подобных электрическим, в природе не существует.

Магнитное поле называется однородным, если вектор индукции во всех точках поля одинаков по модулю и направлению.

Для магнитного поля справедлив **принцип суперпозиции**: вектор индукции \vec{B} магнитного поля, порождаемого несколькими движущимися зарядами (или токами), равен векторной сумме векторов индукции \vec{B}_i полей, порождаемых каждым зарядом (током) в отдельности:

$$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i .$$

Индукция магнитного поля – физическая векторная величина, численно равная силе, действующей в однородном магнитном поле на проводник единичной длины с единичной силой тока, расположенный перпендикулярно линиям индукции \vec{B} :

$$B = \frac{F_A}{I \cdot \ell} .$$

Единицей индукции магнитного поля является тесла:

$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}} .$$

Всякое вещество под действием магнитного поля намагничивается, т. е. является **магнетиком**. Намагниченное вещество создает собственное магнитное поле – поле микротоков, обусловленных движением электронов в атомах вокруг положительно заряженного ядра. Магнитные моменты микротоков под действием внешнего поля приобретают преимущественную ориентацию в одном направлении.

Магнитное поле в веществе складывается из двух полей: внешнего поля и поля, создаваемого намагниченным веществом.

Влияние вещества на магнитное поле характеризуется магнитной проницаемостью μ , которая показывает, во сколько раз индукция магнитного поля в веществе B меняется по отношению к индукции магнитного поля в вакууме B_0 : $\mu = \frac{B}{B_0}$.

Магнитное поле макротоков описывается вектором напряжённости \vec{H} . Для однородной изотропной среды выполняется соотношение $\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная.

Для характеристики магнитного поля вещества вводят вектор **намагниченности**, равный магнитному моменту единицы

объема вещества: $\vec{J} = \frac{\sum \vec{P}_i}{V}$. Экспериментально установлено,

что намагниченность \vec{J} пропорциональна напряженности поля, которое её вызывает, т.е. $\vec{J} = \chi \vec{H}$, где коэффициент пропорциональности χ – магнитная восприимчивость вещества (безразмерная величина). Магнитная проницаемость и магнитная восприимчивость χ связаны соотношением: $\mu = 1 + \chi$.

По знаку магнитной восприимчивости (χ) и по величине магнитной проницаемости (μ) магнетики делятся на три класса:

1. Диамагнетики ($\chi < 0, \mu < 1$),
2. Парамагнетики ($\chi > 0, \mu > 1$),
3. Ферромагнетики ($\chi > 0, \mu \gg 1$).

Ферромагнетиками называются вещества, в которых собственное магнитное поле может в сотни и в тысячи раз превы-

шать вызвавшее его внешнее магнитное поле и могут обладать намагничиванием даже в отсутствие внешнего магнитного поля.

Ферромагнетики обладают спонтанной намагниченностью. В отсутствие магнитного поля ферромагнетик разбивается на большое число малых областей-**доменов**, самопроизвольно намагниченных до насыщения. Магнитные моменты отдельных доменов ориентированы хаотически и компенсируют друг друга. Попадая во внешнее магнитное поле, магнитные моменты отдельных доменов ориентируются по полю в результате скачкообразного поворота сразу целых областей спонтанной намагниченности. При ослаблении внешнего магнитного поля до нуля, теплового движения недостаточно, чтобы дезориентировать магнитные моменты сразу целых областей, поэтому в отсутствие поля ферромагнетики сохраняют свои магнитные свойства.

Для каждого ферромагнетика существует температура, называемая **точкой Кюри**, выше которой он теряет свои особые свойства, превращаясь в обычный парамагнетик.

Для ферромагнетиков, в отличие от пара- и диамагнетиков, магнитная проницаемость μ зависит от напряжённости магнитного поля H (рис. 1).

Характерной особенностью ферромагнетиков является то, что для них зависимость J от H (а следовательно B и от H) определяется предысторией намагничивания ферромагнетика. Это явление называется магнитным гистерезисом. График зависимости $J(H)$ называется **петлей гистерезиса** (рис.2).

Различные ферромагнетики дают разные гистерезисные петли.

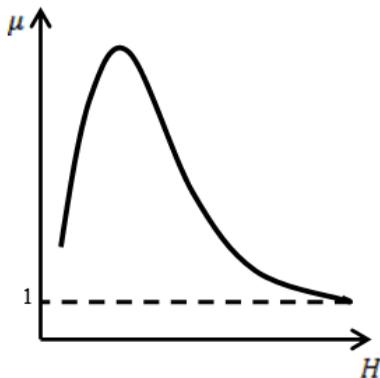


Рис.1.

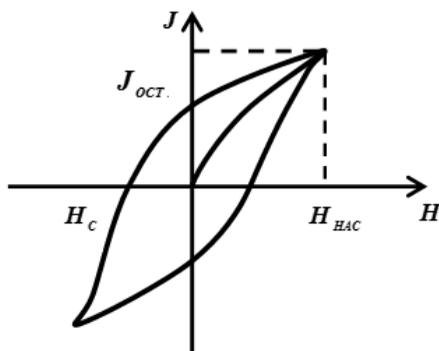


Рис.2.

При увеличении магнитного поля от нуля до $H_{нас}$ ферромагнетик намагничивается до некоторого максимального значения. Из графика видно, что при $H = 0$ ферромагнетик сохраняет остаточную намагниченность $J_{ост}$. С наличием остаточного намагничивания связано существование постоянных магнитов. Для того, чтобы полностью размагнитить ферромагнетик, к нему необходимо приложить противоположное по знаку поле с напряженностью H_c . Напряженность H_c , при которой $J = 0$, называется **коэрцитивной силой**. При дальнейшем увеличении противоположного поля ферромагнетик перемагничивается, и при $H = -H_{нас}$ достигается насыщение. Затем ферромагнетик можно опять размагнитить и перемагнитить до насыщения.

ВЫВОД РАБОЧИХ ФОРМУЛ

Исследуемый образец изготовлен в виде тороида, набранного из отдельных листов кремнистой стали (рис.3).

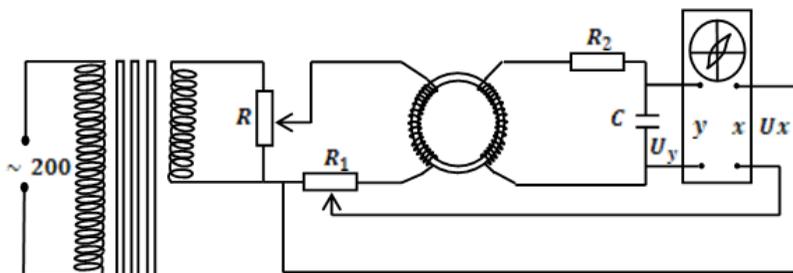


Рис. 3.

Тороид – кольцевая катушка, витки которой плотно намотаны на сердечник, имеющий форму тора.

Первичная обмотка тороида питается через сопротивление R_1 переменным током I_1 , величина которого регулируется потенциометром R . Напряжённость магнитного поля внутри полого тороида:

$$H = \frac{N_1}{l_{CP}} I_1$$

где N_1 – число витков намагничивающей первичной обмотки, I_1 – ток намагничивающей обмотки, l_{CP} – средняя длина магнитной силовой линии внутри тороида.

Напряжение на горизонтально отклоняющих пластинах осциллографа с учётом (1):

$$U_x = I_1 R_1 = \frac{R_1 l_{CP}}{N_1} H, \quad (2)$$

т.е. пропорционально напряжённости внешнего магнитного поля.

Вторичную обмотку охватывает тот же магнитный поток, что и первичную. Изменение этого потока вызывает во вторичной обмотке появление ЭДС взаимной индукции, а в первичной – ЭДС самоиндукции.

Воспользовавшись законом электромагнитной индукции, мы получаем, что напряжение на вертикально отклоняющих пластинах осциллографа U_y пропорционально индукции магнитного поля B ферромагнетика, т.е.

$$U_y = \frac{N_2 S}{R_2 C} B, \quad (3)$$

где C – электроёмкость, S – площадь сечения тороида, N_2 – число витков вторичной обмотки.

За один период синусоидального изменения тока след электронного луча на экране осциллографа опишет полную петлю гистерезиса, и за каждый последующий период её повторит. На экране будет видна неподвижная петля гистерезиса.

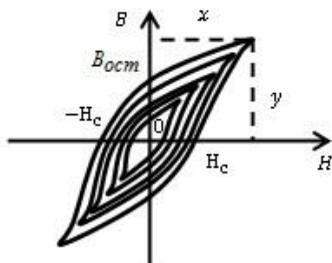


Рис.4.

При увеличении с помощью потенциометра сопротивления R , произойдет увеличение напряжения U_x , таким образом, будет увеличиваться амплитуда колебаний напряжённости магнитного поля H , и на экране осциллографа можно получить ряд различных по своей площади петель гистерезиса (рис.4). Для

построения кривой намагничивания необходимо снять с

осциллограммы координаты x и y вершин семейства петель гистерезиса, вычислить значения напряженности внешнего магнитного поля H и магнитной индукции поля ферромагнетика B по формулам, полученным из (2) и (3):

$$H = \frac{N_1 U_x}{l_{CP} R_1}, \quad (4)$$

$$B = \frac{R_2 C U_y}{N_2 S}, \quad (5)$$

где l_{CP} – средняя длина магнитной силовой линии внутри тороида,

S – площадь сечения тороида.

Напряжения, подаваемые на горизонтально и вертикально отклоняющие пластины осциллографа:

$$U_x = c_x x, \quad (6)$$

$$U_y = c_y y, \quad (7)$$

где x, y – координаты вершин петель гистерезиса, c_x, c_y – цены деления усилителей вертикального и горизонтального отклонения.

Подставляя (6) и (7) в (4) и (5) соответственно, получим:

$$H = \frac{N_1 c_x}{l_{CP} R_1} x = k_x x, \quad (8)$$

$$B = \frac{R_2 C c_y}{N_2 S} y = k_y y, \quad (9)$$

где

$$k_x = \frac{N_1 c_x}{l_{CP} R_1}, \quad (10)$$

$$k_y = \frac{R_2 C}{N_2 S} c_y. \quad (11)$$

При перемагничивании образца часть энергии магнитного поля затрачивается на переориентировку доменов. Энергия, вы-

деляющаяся за один цикл перемагничивания в единице объема образца пропорциональна площади петли гистерезиса S_H . Энергия, выделяющаяся в единице массы образца за 1 секунду:

$$W = \frac{S_H \nu}{\rho}, \quad (12)$$

где ν – частота перемагничивания, ρ – плотность стали. Площадь, охватываемая петлёй:

$$S_H = N c_x c_y, \quad (13)$$

где c_x – цена одного деления вдоль оси x шкалы осциллографа, c_y – цена одного деления вдоль оси y шкалы осциллографа, N – число клеток, укладываемых в площади петли гистерезиса. Подставив (13) в (12), получим удельные потери:

$$W = \frac{N c_x c_y \nu}{\rho}, \quad (14)$$

где $\nu = 50 \text{ Гц}$ – частота перемагничивания, $\rho = 7900 \text{ кг/м}^3$ – плотность стали.

Значение магнитной проницаемости исследуемого образца для точек кривой намагничивания:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}, \quad (15)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать цепь по схеме, показанной на рис.3. Подсоединить входы x и y осциллографа к клеммам x и y установки.

2. Включить осциллограф и отрегулировать ручками   яркость и фокус.

Ручками  и  установить светящееся пятно в

центр экрана осциллографа.

3. Регулятором напряжения добиться изображения петли гистерезиса на всю рабочую часть экрана.

4. Занести в табл. 1 данные, указанные на установке.

5. Определить по петле гистерезиса на экране (см. рис.4) коэрцитивную силу H_c и остаточную индукцию $B_{ост}$ собственного поля ферромагнетика (в делениях). Умножив число делений на цену деления по оси x и по оси y , получим H_c и $B_{ост}$ в единицах СИ. При этом учитываем, что **1 большая клетка равна цене деления**. Результаты занести в табл. 2.

6. Посчитать число клеток N , укладываемых в площади предельной петли гистерезиса. Вычислить значение удельных потерь W на перемагничивание по формуле (14). Данные занести в табл. 2.

7. Определить координаты x и y вершины предельной петли гистерезиса, занести в табл. 3.

8. Уменьшая напряжение потенциометром R , получить семейство петель гистерезиса. Для каждой петли определить координаты вершин и занести в табл. 3. Измерения проводить до тех пор, пока петля не стянется в точку (**6-8 петель**).

9. Вычислить k_x и k_y по формулам (10), (11), учитывая, что средняя длина магнитной силовой линии внутри тороида

$l_{CP} = \pi \left(\frac{d_H + d_{BH}}{2} \right)$, а площадь сечения тороида

$S = d \left(\frac{d_H - d_{BH}}{2} \right)$ (здесь d – толщина тороида, d_H – наруж-

ный диаметр тороида, d_{BH} – внутренний диаметр тороида). Результаты занести в табл. 3.

10. Вычислить значения напряженности H и магнитной индукции B для каждой петли по формулам (8), (9). Результаты занести в табл. 3.

11. Вычислить значения магнитной проницаемости μ исследуемого образца для каждого значения H и B по формуле (15). Результаты занести в табл. 3.

12. Построить график зависимости $B = f(H)$.

13. Построить график зависимости $\mu = f(H)$.

Физика

Таблица 1

R_1	R_2	R	C	N_1	N_2	d_n	$d_{вн}$	c_x	c_y	d
<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	Φ	-	-	<i>м</i>	<i>м</i>	<i>В/дел</i>	<i>В/дел</i>	<i>м</i>

Таблица 2

H_c	H_c	$B_{ост}$	$B_{ост}$	N	W
<i>дел</i>	<i>А/м</i>	<i>дел</i>	<i>Тл</i>	-	<i>Вт/кг</i>

Таблица 3

$k_x (A/m \cdot дел)$		$k_y (A/m \cdot дел)$			
<i>а№</i>	Координаты вершины		H	B	μ
	x	y			
	<i>дел</i>	<i>дел</i>	<i>А/м</i>	<i>Тл</i>	-
<i>1</i>					
<i>2</i>					
<i>3</i>					
<i>4</i>					
<i>5</i>					
<i>6</i>					
<i>7</i>					
<i>8</i>					

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется индукцией магнитного поля? В каких единицах она измеряется?
2. Сформулировать принцип суперпозиции магнитных полей.
3. Что называется намагниченностью вещества?
4. Какие вещества называются ферромагнетиками?
5. Какие значения принимает величина магнитной проницаемости для ферромагнетика?
6. Что такое остаточная намагниченность, коэрцитивная сила?
7. Что называется магнитным гистерезисом? Объяснить петлю гистерезиса.
8. Объяснить, в чем заключается доменная структура ферромагнетиков.
9. Объяснить, как происходит процесс намагничивания ферромагнетика согласно природе ферромагнетизма.
10. Что такое "точка Кюри"?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для инж.-техн. специальностей вузов / Т.И. Трофимова. – 9-е изд., испр. – М.: Издат. центр «Академия», 2010. – 560 с.

2. Электромагнетизм: учеб. пособие / В.С. Кунаков, О.А. Лещева, И.В. Мардасова, О.М. Холодова. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2011. – 64 с.