

ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Физика»

ПРАКТИКУМ

Лабораторная работа № Э 18
Определение магнитных характеристик
ферромагнетиков с помощью
электронного осциллографа

по дисциплине

«ФИЗИКА»

Авторы

Жданова Т.П.,

Лемешко Г.Ф.,

Минасян Л.А.,

Попова И.Г.

Ростов-на-Дону, 2025

Аннотация

В практикуме кратко изложены теоретические вопросы, необходимые для успешного выполнения лабораторной работы, рабочее задание и контрольные вопросы. Предназначен для организации самостоятельной работы студентов всех специальностей, изучающих физику.

Авторы

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»
Жданова Т.П.

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»
Лемешко Г.Ф.

д.ф.н., профессор кафедры «Физика»
Минасян Л.А.

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Физика»
Попова И.Г.



Оглавление

Краткая теория.....	4
Вывод рабочих формул.....	7
Порядок выполнения работы.....	12
Контрольные вопросы.....	14
Список литературы.....	15

Лабораторная работа № Э 18

Определение магнитных характеристик ферромагнетиков с помощью электронного осциллографа

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

Оборудование: тороид из исследуемого вещества, осциллограф, потенциометр, сопротивления R_1 и R_2 , источник переменного тока.

Краткая теория

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 увеличивается по отношению к индукции магнитного поля в вакууме B_0 : $\mu = \frac{B}{B_0}$.

Магнитное поле макротокков 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*, численно равный магнитному моменту единицы

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

намагниченность \vec{J} пропорциональна напряженности поля, которое ее вызывает, т.е. $\vec{J} = \chi \vec{H}$, где коэффициент пропорциональности χ – магнитная восприимчивость вещества (безразмерная величина).

Ферромагнетиками называются вещества, в которых собственное магнитное поле может в сотни и в тысячи раз превышать 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 особенные свойства, превращаясь в обычный парамагнетик.

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

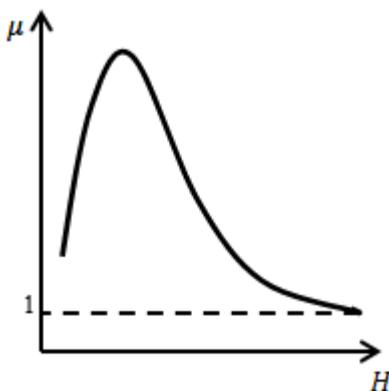


Рисунок 1 - График зависимости магнитной проницаемости μ от напряжённости магнитного поля H

Характерной особенностью ферромагнетиков является то, что для них зависимость J от H (следовательно, и B от H) определяется предысторией намагничивания ферромагнетика. Это явление называется магнитным гистерезисом. График зависимости $J(H)$ называется **петлей гистерезиса** (рисунок 2). Различные ферромагнетики дают разные гистерезисные петли.

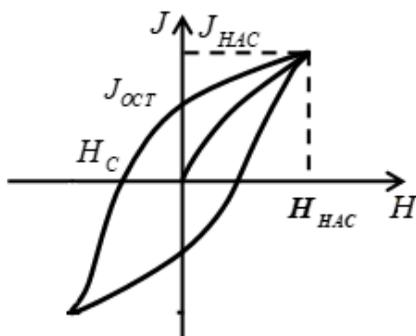


Рисунок 2 – График зависимости намагниченности вещества от напряжённости магнитного поля H

При увеличении магнитного поля от нуля до насыщения $H_{нас}$ ферромагнетик намагничивается до некоторого максимального значения $J_{нас}$. Из графика (рисунок 2) 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 (рисунок 3).

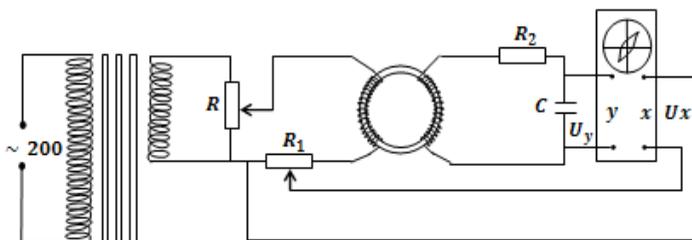


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки

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

$$H = \frac{N_1}{l_{CP}} I_1, \quad (1)$$

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 – ёмкость, 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 ее повторит. На экране будет видна неподвижная петля гистерезиса.

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

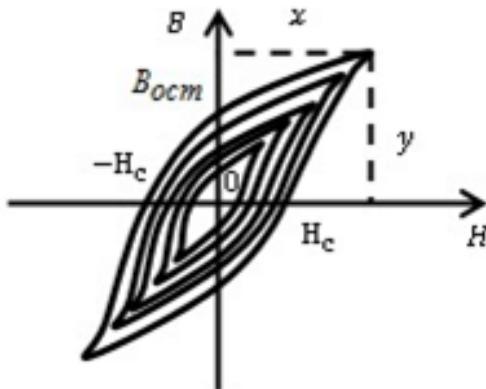


Рисунок 4 – Семейство петель гистерезиса

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):

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

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

$l_{CP} = \pi \left(\frac{d_H + d_{BH}}{2} \right)$ – средняя длина магнитной силовой линии

внутри тороида,

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

щина тороида, d_H – наружный диаметр тороида, d_{BH} – внутренний диаметр 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 (при этом учитываем, что **1 большая клетка равна цене деления**).

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

$$k_x = \frac{N_1 c_x}{l_{CP} R_1},$$

(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, выделяющаяся 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 $\nu = 50 \text{ Гц}$ — частота перемагничивания, $\rho = 7900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ —

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:

$$W = \frac{Nc_x c_y v}{\rho}. \quad (14)$$

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 рисунке 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 и ручкой добиться изображения петли гистерезиса на всю рабочую часть экрана.
4. Занести в таблицу 1 данные, указанные на установке.
5. Определить по максимальной петле гистерезиса на экране (см. рисунок 4) коэрцитивную силу H_c и остаточную индукцию $B_{ост}$ собственного поля ферромагнетика (в делениях). Результаты занести в таблицу 2.
6. Вычислить k_x и k_y по формулам (10), (11). Результаты занести в таблицу 2.
7. Вычислить H_c и $B_{ост}$ в единицах СИ по формулам (8), (9).

8. Посчитать число клеток N , укладываемых в площади предельной петли гистерезиса. Вычислить значение удельных потерь W на перемагничивание по формуле (14). Данные занести в таблицу 2.
9. Определить координаты x и y вершины предельной петли гистерезиса, занести в таблицу 3.
10. Уменьшая напряжение потенциометром R , получить семейство петель гистерезиса. Для каждой петли определить координаты вершин и занести в таблицу 3. Измерения проводить до тех пор, пока петля не стянется в точку (**6-8 петель**).
11. Вычислить значения напряженности H и магнитной индукции B для каждой петли по формулам (8), (9). Результаты занести в таблицу 3.
12. Вычислить значения магнитной проницаемости μ исследуемого образца для каждого значения H и B по формуле (15). Результаты занести в таблицу 3.
13. Построить график зависимости $B = f(H)$.
14. Построить график зависимости $\mu = f(H)$.

Таблица 1

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

Таблица 2

k_x	k_y	H_c	H_c	$B_{ост}$	$B_{ост}$	N	W
$A/(м \cdot дел)$	$Тл/дел$	$дел$	$A/м$	$дел$	$Тл$	-	$Вт/кг$

Таблица 3

№	Координаты вершины		H	B	μ
	x	y			
	$дел$	$дел$	$A/м$	$Тл$	-
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					

Контрольные вопросы

1. Описать ход работы, объясняя смысл всех операций.
Знать все обозначения, используемые в таблицах.
2. Что называется индукцией магнитного поля? В каких единицах она измеряется?
3. Сформулировать принцип суперпозиции магнитных

- полей.
4. Что называется намагниченностью вещества?
 5. Какие вещества называются ферромагнетиками?
 6. Какие значения принимает величина магнитной проницаемости для ферромагнетика?
 7. Что такое остаточная намагниченность, коэрцитивная сила?
 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. Благин А.В. Физика для инженеров / А.В. Благин, Т.С. Беликова, Т.П. Жданова и др. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2022. –601с.
2. Грабовский Р.И. Курс физики: учебное пособие для вузов / Р.И. Грабовский – Санкт-Петербург: Лань, 2024. – 609с.
3. Трофимова, Т. И., Физика. В таблицах и формулах: учебное пособие / Т. И. Трофимова. — Москва : КноРус, 2023. — 447 с.

Инструкция по технике безопасности

1. При работе с электрическими схемами соблюдать правила безопасности, избегать коротких замыканий и перегрузок.
2. Категорически запрещается касаться руками или другими предметами зажимов цепи, находящихся под напряжением.
3. По окончании работы обязательно отключить электрическую схему от источника напряжения.