

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**Филиал государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
«Московский энергетический институт
(технический университет)»
в г. Волжском**

Кафедра механики и материаловедения

В.П. Мельников, С.В. Кулешина

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

**Методические указания к выполнению
лабораторной работы № 27 по курсу «Физика»**

ВОЛЖСКИЙ 2003

Рецензент:
Петухов И.М., кандидат технических наук,
доцент кафедры ТЭС

Мельников В.П., Кулешина С.В.

Изучение явления гистерезиса ферромагнетиков. Методические указания к выполнению лабораторной работы № 27 по курсу «Физика».
– Волжский: Филиал ГОУВПО "МЭИ (ТУ)" в г. Волжском, 2003. – 13 стр.

При выполнении лабораторной работы студенты изучают свойства ферромагнетиков. Визуально наблюдают на экране осциллографа петлю гистерезиса. Определяют основные характеристики ферромагнетиков с использованием графических построений.

Работа предназначена для студентов 2 курса дневной и вечерней форм обучения всех специальностей.

УДК 532
Л 125

© В.П. Мельников
С.В. Кулешина, 2003

© Филиал ГОУВПО "МЭИ (ТУ)" в г. Волжском, 2003

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное получение зависимости индукции магнитного поля в ферромагнитном материале от напряженности намагничивающего поля, количественная оценка магнитной проницаемости и энергии перемагничивания ферромагнетика.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ

Магнитное поле – это одна из форм существования материи, которая отличается от вещества и передает с конечной скоростью магнитное действие одних тел на другие.

Источниками магнитных полей являются движущиеся заряды (токи). Магнитное поле проявляется через силовое действие на внесенные в него проводники с током.

Для изучения свойств магнитного поля воспользуемся его действием на замкнутый плоский контур с током. Размеры контура должны быть малы по сравнению с расстояниями до проводников с токами, образующих магнитное поле.

Контур с током, помещенный в магнитное поле, поворачивается и занимает строго определенное положение в пространстве, т.е. магнитное поле оказывает на контур с током ориентирующее действие. Силовое действие поля на контур с током можно использовать в качестве характеристики интенсивности магнитного поля.

Используем контур с током в виде рамки (рис. 1).

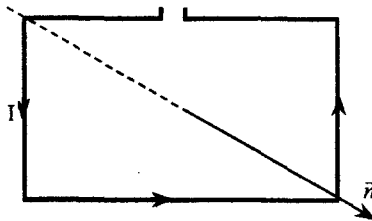


Рис. 1.

Максимальный момент действующих сил на рамку с током в магнитном поле пропорционален силе тока I в ней и площади контура S :

$$M_{\max} \sim I \cdot S. \quad (1)$$

Величина, определяемая отношением M_{\max}/IS , не зависит от параметров рамки с током и характеризует лишь внешнее магнитное поле.

Произведение силы тока в рамке I на ее площадь S называется *магнитным моментом* рамки с током \vec{p}_m , направление которого совпадает с нормалью рамки \vec{n} :

$$\vec{p}_m = I \cdot S \cdot \vec{n} \quad (2)$$

С учетом соотношения (2), силовую характеристику магнитного поля можно представить в виде:

$$B = k \cdot \frac{M_{\max}}{p_m}, \quad (3)$$

где B – значение магнитной индукции поля в области расположения рамки с током;
 k – постоянная, зависящая от выбора единиц силы тока I , площади контура S и момента действующих на рамку сил M .

Из выражения (3) следует, что *магнитная индукция* есть физическая величина, численно равная максимальному моменту сил, действующему на пробный контур с током, магнитный момент которого равен единице. Единица измерения магнитной индукции – тесла ($Tл$).

Магнитная индукция является векторной характеристикой. Направление вектора \vec{B} в каждой точке поля определяется направлением нормали \vec{n} к рамке с током (см. рис.1), принимающей положение устойчивого равновесия.

При изучении магнитного поля в веществе различают два типа токов – макроток и микроток. Под *макротоками* понимают электрические токи проводимости, создающие внешнее намагничивающее поле \vec{B}_0 . *Микротоками* называют токи, обусловленные движением электронов в атомах и молекулах.

Внешнее магнитное поле \vec{B}_0 так изменяет орбитальные микроток атомов, что возникает наведенное внутреннее магнитное поле \vec{B}' .

Результирующее магнитное поле \vec{B} в среде равно геометрической сумме внешнего \vec{B}_0 и внутреннего \vec{B}' полей

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'. \quad (4)$$

Из сказанного ясно, что магнитное поле микротоков \vec{B}' возникает в результате намагничивания вещества при его помещении во внешнее магнитное поле \vec{B}_0 . Поэтому первичным источником магнитного поля в веществе являются макроток.

Вещество, способное намагничиваться под действием магнитного поля, называется *магнетиком*.

Если наведенное магнитное поле \vec{B}' совпадает по направлению с вектором \vec{B}_0 , то вещество называют *парамагнетиком*. К ним относятся кислород, алюминий, платина, редкоземельные элементы, щелочные и щелочноземельные металлы и другие вещества.

Если магнитная индукция \vec{B}' наведенного поля направлена противоположно \vec{B}_0 , то вещество называют *диамагнетиком*. К ним относится большинство органических соединений, многие металлы (цинк, золото, медь и др.), вода, стекло.

Наряду с магнитной индукцией \vec{B} для характеристики магнитного поля имеет еще одна векторная характеристика – \vec{H} , называемая *напряженностью магнитного поля*. Векторы \vec{H} и \vec{B} связаны между собой соотношением

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}, \quad (5)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная постоянная;

μ – безразмерная величина, характеризующая магнитные свойства среды и называемая *относительной магнитной проницаемостью* вещества.

Единица измерения напряженности – ампер на метр (А/м).

Для количественной характеристики намагничивания используют векторную величину \vec{J} – намагниченность. В несильных магнитных полях намагниченность вещества прямо пропорциональна напряженности поля

$$\vec{J} = \chi \cdot \vec{H}, \quad (6)$$

где χ – безразмерная величина, характеризующая свойства вещества, называется *магнитной восприимчивостью*.

Характеристики μ и χ для диамагнетиков и парамагнетиков не зависят от напряженности поля H .

Особое место среди магнетиков занимают *ферромагнетики*, обладающие рядом особенностей:

а) нелинейная зависимость намагниченности \vec{J} и магнитной индукции \vec{B} от вектора напряженности \vec{H} намагничивающего поля;

б) зависимость магнитной восприимчивости χ и относительной магнитной проницаемости μ от вектора напряженности \vec{H} намагничивающего поля;

в) наличие критической температуры T_k (температура Кюри), выше которой ферромагнетик становится парамагнетиком.

К ферромагнетикам относятся железо, никель, кобальт, их сплавы и соединения, а также некоторые сплавы и соединения марганца и хрома с неферромагнитными материалами.

Согласно классической теории, ферромагнетики при температуре ниже T_k состоят из большого числа намагниченных до насыщения макрообластей, называемых *доменами*. При отсутствии намагничивающего поля магнитные моменты отдельных доменов ориентированы хаотически, т.е. ферромагнетик не намагничен. Внешнее намагничивающее поле ориентирует магнитные моменты не отдельных молекулярных микротоков, а целых доменов. Поэтому уже при слабых внешних полях намагниченность J резко возрастает по нелинейному закону. По мере усиления намагничивающего поля достигается насыщение намагниченности ферромагнетика (рис. 2), когда все магнитные моменты его доменов ориентируются по направлению силовых линий внешнего поля.

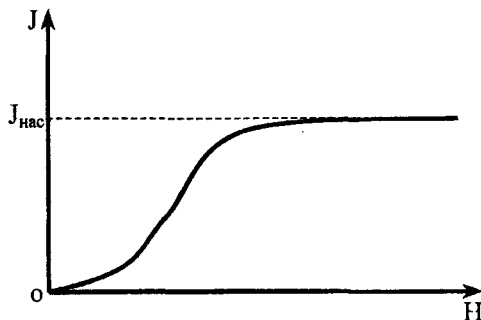


Рис. 2.

Зависимость магнитной индукции B от напряженности H намагничивающего поля характеризуется аналогичным графиком (рис. 3).



Рис. 3.

При уменьшении напряженности намагничивающего поля до нуля магнитная индукция B будет уменьшаться по некоторой иной зависимости $AB_{ост}$ (рис.4), отличной от кривой намагничивания OA .

При напряженности магнитного поля $H = 0$ ферромагнетик оказывается намагниченным, т.е. становится постоянным магнитом с магнитной индукцией, равной $B_{ост}$. Чтобы размагнитить ферромагнетик, надо подействовать на него магнитным полем противоположного направления. Напряженность H_K размагничивающего поля, при которой магнитная индукция B в ферромагнетике становится равной нулю, называют *коэрцитивной силой*.

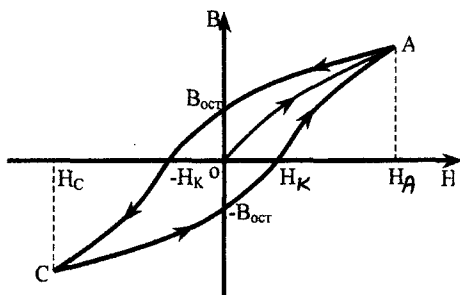


Рис. 4.

При дальнейшем увеличении магнитного поля противоположного направления вновь достигается насыщение намагниченности ферромагнетика (точка C). Изменяя напряженность намагничивающего поля в пределах от $H_д$ до $H_с$, можно экспериментально построить нелинейную зависимость $B = f(H)$, носящую название *петли гистерезиса*.

Участок кривой намагничивания OA называют *основной кривой намагничивания*. Нелинейная зависимость $B = f(H)$, представленная на рис. 4, свидетельствует

о том, что магнитная проницаемость μ в случае ферромагнетиков является сложной нелинейной функцией напряженности H намагничивающего поля.

При перемагничивании ферромагнетика затрачивается энергия. Энергия перемагничивания, рассчитанная на единицу объема, т.е. плотность энергии, равна площади петли гистерезиса S_{HB} в координатах B и H

$$w = S_{HB} \quad \text{или} \quad w = \int_{H_c}^{H_A} B dH. \quad (7)$$

Эта энергия превращается в тепловую энергию.

Величины $B_{ост}$, H_K и μ_{max} являются основными характеристиками ферромагнетика. Коэрцитивная сила H_K характеризует свойство ферромагнетика сохранять намагниченность. Ферромагнетики, обладающие большой коэрцитивной силой, имеют широкую петлю гистерезиса и называются *жесткими магнитными материалами*. Ферромагнетики с малой коэрцитивной силой дают узкую петлю гистерезиса и называются *мягкими магнитными материалами*.

В зависимости от назначения берутся ферромагнетики с той или иной характеристикой. Так, для постоянных магнитов применяются жесткие ферромагнетики, а для сердечников трансформаторов – мягкие.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

Петлю гистерезиса на экране осциллографа получают с помощью экспериментальной установки (рис.5).

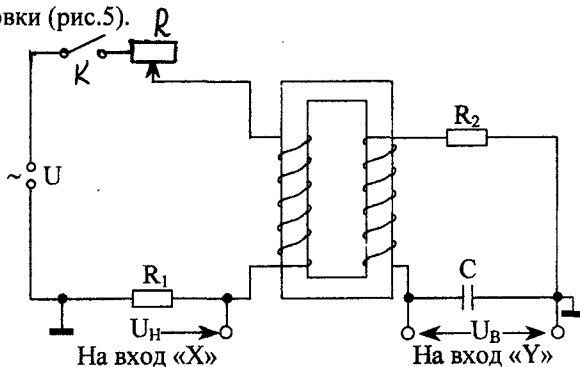


Рис. 5.

Установка выполнена в виде лабораторного модуля. На лицевую панель модуля выведены: ручка от потенциометра R , выключатель K и 3 гнезда для подключения осциллографа. Вращением ручки потенциометра можно менять размеры петли гистерезиса на экране осциллографа. На задней стенке модуля имеется разъем, с помощью которого к модулю подключается источник питания U .

Исследуемый образец ферромагнитного материала изготовлен в виде замкнутого сердечника, на поверхность которого намотана обмотка. На горизонтально отклоняющие пластины осциллографа (Вход "X") подается переменное напряжение U_H , а на вертикально отклоняющие пластины (Вход "Y") – напряжение U_B .

Значение напряженности намагничивающего поля H , созданного макроточком I в сердечнике, прямо пропорционально значению падения напряжения U_H на резисторе R_I

$$H = K_X U_H. \quad (8)$$

Значение же магнитной индукции B в сердечнике прямо пропорционально падению напряжения на конденсаторе C

$$B = K_Y U_B, \quad (9)$$

где K_X и K_Y – постоянные, зависящие от параметров установки. Зная цену деления осциллографа можно записать уравнения (8), (9) в виде:

$$H = K_X C_X X_i, \quad B = K_Y C_Y Y_i, \quad (10)$$

где C_X, C_Y – цена деления (масштаб) шкалы экрана по горизонтали и вертикали;
 X_i, Y_i – координаты петли гистерезиса в делениях шкалы.

Таким образом, отклонение электронного луча в осциллографе по горизонтали будет пропорционально напряженности H намагничивающего поля, а отклонение электронного луча по вертикали – пропорционально магнитной индукции B поля в ферромагнитном материале сердечника. За период изменения тока в обмотке электронный луч опишет на экране полную петлю гистерезиса, а за каждый последующий период в точности ее повторит. Поэтому на экране осциллографа будет изображена неподвижная фигура – петля гистерезиса.

Для определения плотности энергии перемагничивания ферромагнетика w необходимо определить площадь петли гистерезиса S_{XY} в координатах X и Y . Тогда из уравнения (7)

$$w = S_{HB} = z \cdot S_{XY}, \quad (11)$$

где z – коэффициент пропорциональности, определяемый по формуле

$$z = \frac{H_A B_A}{X_A Y_A}, \quad (12)$$

где H_A, B_A – напряженность и магнитная индукция в точке A петли гистерезиса (рис.4);

X_A, Y_A – координаты точки A в делениях шкалы экрана.

С учетом (10) уравнение (12) можно представить в виде

$$z = K_X K_Y C_X C_Y. \quad (13)$$

Энергия, необходимая для перемагничивания единицы объема ферромагнетика в течение одной секунды, равна

$$W = v \cdot w, \quad (14)$$

где v – частота перемагничивания.

По семейству касательных на основной кривой намагничивания можно определить промежуточные значения магнитной проницаемости (рис.6):

$$\mu = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\Delta B}{\Delta H}, \quad (15)$$

где ΔB – приращение магнитной индукции в веществе при изменении напряженности намагничивающего поля на ΔH .

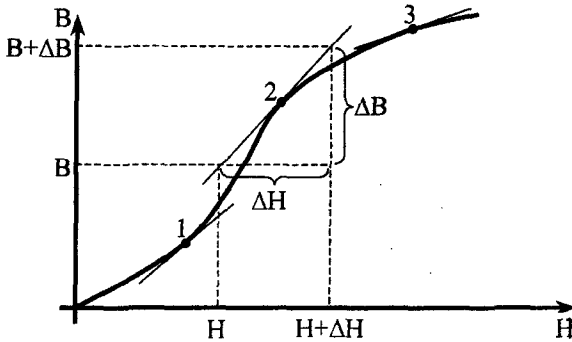


Рис. 6

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

4.1. Соединить гнездо U_H на лицевой панели модуля с гнездом “Синхр. 1:1” (вход “X”) на правой боковой панели осциллографа. При этом коэффициент $C_X = 1$.

4.2. Соединить 2 гнезда U_B на лицевой панели модуля с гнездом “Y1” на лицевой панели осциллографа.

4.3. Подключить источник питания к модулю с помощью разъема на задней стенке модуля.

4.4. Включить:

- общий выключатель установки;
- источник питания $\sim U$ (тумблер справа на стойке установки);
- осциллограф;
- питание модуля (тумблер K на лицевой панели).

4.5. Когда на экране появится изображение, выполнить операции:

- ручками “Фокус”, “Яркость”, “Уровень синхронизации” получить устойчивое изображение достаточной яркости и четкости.
- ручками перемещения по горизонтали и вертикали установить изображение симметрично относительно центра экрана.

4.6. Установить ручкой потенциометра R (на лицевой панели модуля) максимальный размер петли гистерезиса, что соответствует насыщению намагниченности ферромагнетика.

4.7. Ручкой усиления по вертикали осциллографа установить высоту изображения петли гистерезиса в пределах экрана. Определить по шкале "Вольт/дел." величину коэффициента усиления C_Y и записать в табл. 1. Положение ручки усиления до конца работы не менять.

4.8. Скопировать изображение на экране на миллиметровую бумагу.

4.9. Произвести отсчет координат вершин $A_i(X_i, Y_i)$ семейства петель гистерезиса (рис.7), вращая ручку R на модуле. Получить таким образом 8-10 петель гистерезиса, уменьшающихся до точки, и записать координаты их вершин X_i и Y_i в табл. 2.

4.10. Выключить все приборы.

4.11. Записать в таблицу 1 величины $C_X = 1$, $\nu = 50$ Гц. Записать параметры установки K_X , K_Y (указаны на боковой стенке модуля).

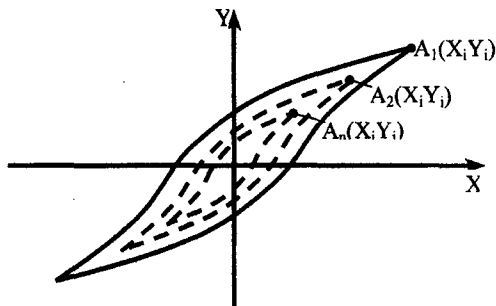


Рис. 7

Таблица 1

Параметры установки и результаты однократных измерений

C_X , В/дел	C_Y , В/дел	K_X , А/мВ	K_Y , Тл/В	ν , Гц	S_{HY} , дел ²	w , Дж/м ³	W , Дж/м ³ ·с

Таблица 2

Результаты измерений и вычислений для построения кривой намагничивания

X_i , дел.	H_i , А/м	Y_i , дел.	B_i , Тл	μ
8-10 значений				

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

5.1. Вычислить площадь петли гистерезиса S_{HY} с помощью миллиметровой бумаги. Результат записать в табл. 1.

5.2. Определить коэффициент пропорциональности z по формуле (13).

5.3. По формуле (11) вычислить значение энергии перемагничивания за один цикл w .

- 5.4. По формуле (14) вычислить значение энергии перемагничивания за одну секунду W .
- 5.5. По известным координатам X, Y , основной кривой намагничивания (табл. 2) определить с помощью формул (10) соответствующие значения H_i и B_i .
- 5.6. Построить основную кривую намагничивания $B = f(H)$.
- 5.7. Через точки на кривой $B = f(H)$ провести касательные и определить значения магнитной проницаемости μ по формуле (15), согласно рис. 6. Результаты занести в табл. 2.
- 5.8. Построить график зависимости $\mu = f(H)$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими физическими величинами характеризуется магнитное поле?
2. Чем отличаются ферромагнетики от пара- и диамагнетиков?
3. Что происходит в ферромагнетике при достижении критической температуры $T_{\text{кр}}$ (температура Кюри)?
4. Объясните основную кривую намагничивания и природу ферромагнитного гистерезиса.
5. Чем обусловлено изменение магнитной проницаемости при изменении напряженности H намагничивающего поля?
6. Назовите основные характеристики ферромагнетиков?
7. Что такое «жесткие» и «мягкие» ферромагнетики?
8. Как определить энергию, затрачиваемую на перемагничивание ферромагнетика?

ЛИТЕРАТУРА

Детлаф А.А. Курс физики. Т.2. – М.: Высшая школа. – 1973. с. 296-314.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель работы.....	3
2. Теоретические основы работы.....	3
3. Описание лабораторной установки и методика измерения.....	7
4. Порядок выполнения работы.....	9
5. Обработка результатов измерений.....	10
Контрольные вопросы.....	11
Литература.....	11

В.П. Мельников, С.В. Кулешина

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ГИСТЕРЕЗИСА ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

Методические указания к выполнению
лабораторной работы № 27 по курсу «Физика»

Редактор *Халдеева Г.П.*
Компьютерная верстка *Юриной В.В.*

Изд. лиц. № 03542 от 10.12.2000

Подписано в печать 10.04.2003. Формат 60×90_{1/16}

Печать ризографическая. Усл. печ. л. 0,8. Тираж 100 экз. Заказ № 130

Издатель Филиал ГОУВПО "МЭИ (ТУ)" в г. Волжском,
404110, г. Волжский, пр. Ленина, 69
Отпечатано Филиал ГОУВПО "МЭИ (ТУ)" в г. Волжском,
404110, г. Волжский, пр. Ленина, 69