

Лабораторная работа №9 Получение кривой намагничивания и петли гистерезиса с помощью осциллографа¹

Цель работы: экспериментальное исследование гистерезисных явлений при намагничивании ферромагнетиков.

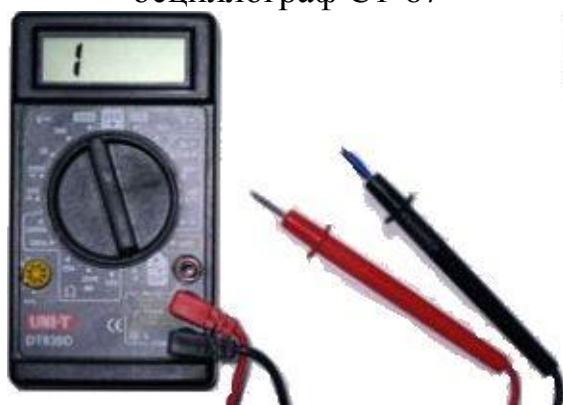
Приборы и принадлежности:



осциллограф С1-67



тороидальный трансформатор



мультиметр, как вольтметр



магазины сопротивлений P33 и P34



регулятор напряжения школьный
(РНЦ)



конденсатор трансформатор-развязка



соединительные провода

¹ Работа подготовлена в рамках выполнения ВКР студенткой группы 5 «Д» факультета МФиИ Машковой Маргаритой Александровной. Научный руководитель Романов Р.В. – 2013 г.

Теоретическое введение

Пункты 1 – 5 см. в описании лабораторной работы №8.

6. Современная классификация магнетиков

По классификации В.Л. Гинзбурга (Нобелевская премия по физике, 2004 г.) можно выделить шесть типов магнетиков

Тип магнетика	восприимчивость, χ	проницаемость, μ
Диамагнетик	$10^{-9} \div 10^{-4}$	$\mu < 1$
Парамагнетик	$10^{-6} \div 10^{-3}$	$\mu > 1$
Ферромагнетик	$10^3 \div 10^5$	$\mu(H) \gg 1$
Ферримагнетик	$10^1 \div 10^3$	$\mu(H) \gg 1$
Антиферромагнетик	$10^{-4} \div 10^{-6}$	$\mu > 1$
Сверхдиамагнетик	-1	$\mu = 0$

7. Работа при намагничивании

Известно, что энергия магнитного поля может быть записана как

$$W_m = \int_V w_m dV, \quad (9.7.1)$$

где w_m – плотность энергии магнитного поля

$$w_m = \int \vec{H} d\vec{B}. \quad (9.7.2)$$

По смыслу это работа, необходимая для увеличения индукции на dB в единице объёма магнетика (см. Сивухин, т. 3. стр. 280, Калашников стр. 243).

В случае постоянной магнитной проницаемости и линейной связи (8.1.3) эта формула переходит в известное выражение

$$w_m = \mu\mu_0 \int H dH = \mu\mu_0 \frac{H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{\vec{H}\vec{B}}{2}, \quad (9.7.3)$$

При нелинейной, но однозначной зависимости $B(H)$ вся работа намагничивания идёт на увеличение энергии магнитного поля и поэтому формула (9.7.3) даёт также объёмную плотность энергии магнитного поля в магнетике.

Следует напомнить, что с геометрической точки зрения определённый интеграл численно равен площади под графиком функции, в данном случае $H(B)$.

Полная работа, затрачиваемая при увеличении индукции от нуля до заданного значения B_1 , будет равна площади OAB_1 , ограниченной кривой намагничивания и

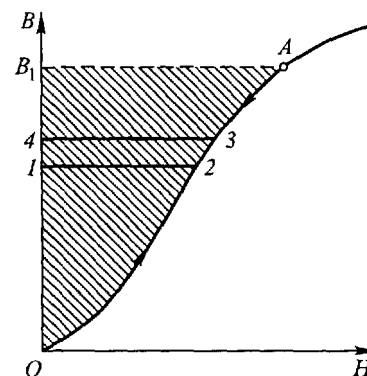


Рис. 9.7.1

отрезком оси OB_1 (заштрихована) Эта работа затрачивается источником при намагничивании магнетика. При размагничивании магнетика в цепь источника возвращается энергия, запасённая в магнитном поле, в виде работы экстратока самоиндукции. Она по-прежнему выражается величиной площади, ограниченной кривой намагничивания и отрезком ординаты OB_1 . При однозначной зависимости это одна и та же кривая, и при размагничивании возвращается та же энергия, которая была затрачена при намагничивании.

Иначе будет ситуация для магнетика с гистерезисом. В этом случае при увеличении индукции от значения B_1 до некоторого другого значения B_2 потребуется работа, равная площади, ограниченной ветвью кривой намагничивания 1, т.е площади B_1a1bB_2 , а при размагничивании до исходного состояния возвращаемая работа будет равна площади $B_2б2aB_1$, которая имеет меньшую величину. Поэтому при полном цикле перемагничивания в каждую единицу объёма магнетика вводится энергия, численно равная площади петли гистерезиса. Эта энергия расходуется на совершение работы против коэрцитивных сил в магнетике и в конечном счёте превращается в тепло. Поэтому ферромагнетики при циклическом перемагничивании нагреваются, и тем больше, чем сильнее выражен гистерезис.

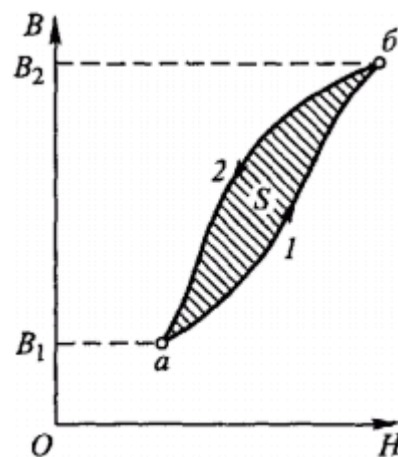


Рис.9.7.2

Тепло гистерезиса всегда учитывают при расчёте различных электрических устройств переменного тока, содержащих ферромагнетики, подвергающиеся периодическому перемагничиванию. Таковы, например, железные сердечники трансформаторов и вращающиеся железные якоря генераторов постоянного тока. Наличие гистерезиса в них приводит к бесполезной затрате части энергии на тепло гистерезиса и снижает коэффициент полезного действия установок. Поэтому для подобных устройств применяют специальные сорта мягкого железа (трансформаторное железо), в которых гистерезис выражен слабо.

8. Некоторые характеристики магнитно мягких материалов

Три большие группы: I – железо различной степени чистоты и низкоуглеродистые стали; II – сплавы Fe – (0,05 – 5)% Si, или электротехнические стали, и III – прецизионные.

		B_s , Тл	$\mu_{нач}$	μ_{max}	H_c , А/м	T_C , °С	$P_{1/50}$, Вт/кг	ρ , 10^{-8} Ом·м
Железо технически чистое	99,9%	2,16	200– 250	5 000 – 7 000	64 – 80	770		9,8
Железо электролитическое, чистейшее	отжиг в водороде	2,16	600	15 000	28			
Электротехническая сталь	Si – 0,5 – 5% C – 0,002%	2	200– 600	3 000 – 8 000	10-64	740	0,5-5,8	10-50 ???
Пермаллой высоконикелевый	Fe – 22% Ni – 78%	0,7	7000– 50000	60 000– 300 000	0,8- 4,8	580		20
Пермендюр ванадиевый	Fe – 49% Co – 49% V – 2%	2,4	800	4 500	80	980		26
Альсифер (сендаст)	Al – 5,5% Si – 9,5 % Fe – 85%	1,1	20 000	117 000	1,8	550		80
Ферриты никель-цинковые и марганец-цинковые		0,18- 0,40	100– 6 000	3 000- 10 000	8-120			

Пояснения к таблице:

B_s – индукция при насыщении;

$\mu_{нач}$ – начальная магнитная проницаемость;

μ_{max} – максимальная магнитная проницаемость;

H_c – коэрцитивная сила;

T_C – Температура Кюри;

$P_{B/n}$ – удельные магнитные потери (B – магнитная индукция, Тл; n – частота, Гц);

ρ – удельное сопротивление;

пермендюр – от англ. permendur, permeability – «проницаемость»; durable – «прочный»).

Источники:

(данные несколько различаются).

1. Калашников С.Г. Электричество / С.Г. Калашников. – 6-е изд., стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 624 с. (стр.246).
2. Енохович С.А. Справочник по физике / С.А. Енохович. – 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Просвещение, 1990, 384 с. (стр. 192).
3. Энциклопедия науки и техники. Магнитно-мягкие материалы. http://femto.com.ua/articles/part_1/2066.html.
4. Таблицы физических величин. Справочник. / под ред. акад. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с. (стр. 548).

9. Описание установки

Петлю гистерезиса в ферромагнитном тороидальном образце можно получить с помощью электрической схемы, изображённой на рисунке.

Намагничивающая обмотка L_1 питается переменным током от РНШ. Чтобы получить на экране осциллографа петлю гистерезиса, нужно на горизонтально отклоняющие пластины подать напряжение U_x , пропорциональное напряжённости магнитного поля в образце, а на вертикально отклоняющие пластины – напряжение U_y , пропорциональное индукции магнитного поля.

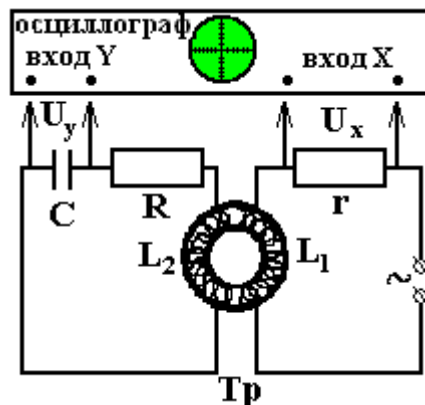


Рис. 9.9.1

Напряжение U_x подаётся с резистора r . Ток I , проходя по намагничивающей обмотке, создаёт в тороиде магнитное поле

$$H(t) = \frac{N_1 I(t)}{l}, \quad (9.9.1)$$

где N_1 – число витков в намагничивающей обмотке, l – длина тороида по средней линии.

Напряжение на резисторе r , подаваемое на X-вход осциллографа

$$U_x(t) = I(t)r = \frac{lr}{N_1} H(t), \quad (9.9.2)$$

ЭДС индукции в измерительной катушке из N_2 витков по закону Фарадея–Максвелла равна скорости изменения магнитного потока в ней

$$\varepsilon(t) = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB(t)}{dt},$$

где S – площадь поперечного сечения тороида.

Для того чтобы U_y было пропорционально индукции магнитного поля B , между индикаторной катушкой и осциллографом ставят интегрирующую RC-цепь, удовлетворяющую условию

$$R \gg X_C = \frac{1}{\omega C},$$

где ω – циклическая частота переменного тока.

При этом ток в цепи индикаторной катушки

$$I(t) = \frac{\varepsilon(t)}{R} = -\frac{N_2 S}{R} \frac{dB(t)}{dt}.$$

Напряжение на конденсаторе равно

$$U_y = U_C = \frac{Q}{C} = \frac{\int I(t) dt}{C} = -\frac{N_2 S}{RC} \int dB = -\frac{N_2 S}{RC} B(t), \quad (9.9.6)$$

За один период синусоидального изменения тока электронный луч на экране опишет полную петлю гистерезиса, а за каждый последующий период в точности её повторит. Увеличивая напряжение питания намагничивающей катушки, будем получать на экране последовательно ряд различных по своей площади петель гистерезиса. Верхняя точка каждой из петель гистерезиса находится на кривой намагничивания. Следовательно, для построения начальной кривой намагничивания необходимо снять с осциллографа координаты (x_i, y_i) вершин нескольких петель гистерезиса. Эти координаты соответствуют максимальным значениям H_m и B_m , которые из (9.9.2) и (9.9.6) равны

$$U_{xm} = \frac{lr}{N_1} H_m, \quad U_{ym} = \frac{N_2 S}{RC} B_m, \quad (9.9.7)$$

или

$$H_m = \frac{N_1}{lr} U_{xm}, \quad B_m = \frac{RC}{N_2 S} U_{ym}. \quad (9.9.8)$$

Измерив вольтметром напряжения на X -входе (на резисторе r) и на Y -входе (на конденсаторе C) можно определить цены делений координатной сетки экрана осциллографа.

$$c_x = \frac{U_{xi}}{x_i}, \quad c_y = \frac{U_{yi}}{y_i}. \quad (9.9.9)$$

Учитывая, что вольтметр измеряет действующее значение напряжения $U = U_m/\sqrt{2}$, окончательно получаем

$$H_i = \frac{N_1}{lr} \sqrt{2} c_x x_i, \quad B_i = \frac{RC}{N_2 S} \sqrt{2} c_y y_i. \quad (9.9.10)$$

Магнитная проницаемость для каждого значения тока в намагничивающей катушке

$$\mu = \frac{B_i}{\mu_0 H_i}. \quad (9.9.11)$$



Рис. 9.9.2.

Общий вид установки

Лабораторная работа №9
Получение кривой намагничивания
и петли гистерезиса с помощью осциллографа

Выполнил студент _____
Факультет _____ курс _____ группа _____
Проверил _____
Показания сняты _____
Зачтено _____

Порядок выполнения работы

Параметры установки:

$l = 0,26$ м – длина сердечника по средней линии;

$S = 0,0023$ м² – площадь поперечного сечения сердечника;

$N_1 = 237$, $N_2 = 330$ – число витков в первичной и вторичной обмотках тороидального трансформатора соответственно;

$C = 4,7$ мкФ – ёмкость конденсатора.

Внимание! РНШ включается через трансформатор-развязку (на схеме не показан).

Работа проводится при напряжении 220 В, поэтому будьте особенно осторожны!

1. Соберите цепь по схеме теоретического введения (рис. 9.9.1).
2. Установите с помощью магазинов сопротивлений $r = 100$ Ом, $R = 20000$ Ом.

$$R \gg X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi\nu C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 4,7 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^4}{\pi \cdot 4,7} = 677 \text{ Ом.}$$

3. Ручка на РНШ должна быть установлена в положение, соответствующее нулевому напряжению (против часовой стрелки до упора).
4. Включите трансформатор-развязку в сеть. Включите осциллограф. В центре экрана через небольшое время должна появиться светящаяся точка. Отрегулируйте яркость, фокусировку и положение точки соответствующими ручками. Никаких других переключателей на осциллографе не трогайте.
5. Плавно увеличивайте на РНШ поворотом ручки по часовой стрелке напряжение питания намагничивающей обмотки до $130 \div 150$ В, соответствующем достижению в образце состояния магнитного насыщения, и добейтесь, чтобы петля гистерезиса была хорошо видна, занимала большую часть экрана и находилась по центру экрана. Для этого после получения петли уберите напряжение до 0 и ручками регулировки осциллографа вновь поместите сфокусированную светящуюся точку в центр координатной сетки на экране осциллографа. После этого вновь увеличьте напряжение.

6. Зарисуйте на миллиметровой бумаге полученную петлю гистерезиса, соблюдая разумный масштаб. Определите координаты вершины петли.

7. Измерьте мультиметром напряжения на входе X (резисторе r) и входе Y (конденсаторе C). Определите цены делений координатной сетки экрана осциллографа.

$$c_x = \text{_____ В/дел}, \quad c_y = \text{_____ В/дел}.$$

8. Результаты занесите в таблицу.

i	x_i , дел	y_i , дел	U_{xi} , В	U_{yi} , В	H_i , А/м	B_i , Тл	μ_i
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

9. Постепенно уменьшая напряжение питания установки на РНШ до 0, получите семейство 8-10 петель гистерезиса. Зарисуйте их. Определите координаты вершин петель. Результаты занесите в таблицу.

10. Определите значения H и B каждой из вершин петель по формулам (9.9.10).

11. Постройте кривую намагничивания $B = B(H)$. Сделайте выводы.

12. Рассчитайте магнитную проницаемость для каждого случая. Заполните последнюю колонку в таблице. Постройте график $\mu = \mu(H)$. Сравните с табличными данными. Сделайте выводы.

Определение потерь энергии на перемагничивание (Дополнительное задание для студентов физических специальностей)

Краткие пояснения

Исследование с помощью осциллографа петли гистерезиса позволяет определить энергетические затраты на перемагничивание образца.

Площадь петли гистерезиса численно равна работе, затрачиваемой на перемагничивание единицы объёма образца за один цикл перемагничивания.

Так как в условиях работы перемагничивание обеспечивается переменным током с частотой $\nu = 50$ Гц, то мощность, затрачиваемая на перемагничивание единицы объёма, может быть определена по соотношению

$$\frac{P}{V} = \frac{A}{Vt} = \frac{\sigma}{T} = \nu\sigma,$$

где V – объём образца, ν – частота тока перемагничивания, σ – площадь петли гистерезиса, выраженная в энергетических единицах. Эта площадь может быть определена как произведение числа Z масштабных клеток петли гистерезиса на значение масштабной единицы

$$\sigma = Zc_Hc_B, \quad (9.П.2)$$

где c_H и c_B – цены делений соответствующих осей.

Тогда получаем

$$\sigma = Z \frac{H_i}{x_i} \frac{B_i}{y_i} = \frac{N_1}{lr} \sqrt{2}c_x \frac{RC}{N_2S} \sqrt{2}c_y = 2 \frac{N_1RC}{lrN_2S} c_x c_y Z. \quad (9.П.3)$$

Окончательно

$$\frac{P}{V} = 2\nu \frac{N_1RC}{lrN_2S} c_x c_y Z. \quad (9.П.4)$$

Задание

1. Определите каким-либо известным вам способом площадь большой петли гистерезиса в масштабных единицах Z .
2. Определите мощность, затрачиваемую на перемагничивание единицы объёма по формуле (9.П.4).
3. Так как в таблицах, как правило, указывают удельные магнитные потери, то есть мощность на единицу массы, то зная плотность железа, определите эту величину. Сравните с табличными данными.

Контрольные вопросы

1. Что такое магнитные свойства вещества?
2. На какие группы можно разбить вещества по их магнитным свойствам?
3. Чем характерно строение ферромагнетиков?
4. Каковы в теории графики зависимостей $B = B(H)$ и $\mu = \mu(H)$ ферромагнетиков?
5. Что такое явление гистерезиса и чем оно обусловлено?
6. Что называется остаточной индукцией и коэрцитивной силой?
7. Что такое точка Кюри и что она характеризует?

Литература

(см. основной список литературы)