

4881

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РЯЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНЕТИКА

Методические указания
к лабораторной работе

Рязань 2015

УДК 537.226.4

Изучение магнитных характеристик ферромагнетика: методические указания к лабораторной работе / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: М.А. Буробин, М.В. Дубков, Т.Г. Авачева; под ред. А.С. Иваникова. Рязань, 2015. 8 с.

Содержат основные теоретические сведения, порядок выполнения работы и итоговые контрольные вопросы.

Предназначены для студентов всех направлений подготовки бакалавров и специальностей, изучающих дисциплину «Физика».

Табл. 1. Ил. 3. Библиогр.: 3 назв.

Ферромагнетики, магнитные характеристики, гистерезис

Печатается по решению редакционно-издательского совета Рязанского государственного радиотехнического университета.

Рецензент: кафедра общей и экспериментальной физики РГРТУ
(зав. кафедрой доц. М.В. Дубков)

Изучение магнитных характеристик ферромагнетика

Составители: Б у р о б и н Михаил Анатольевич
Д у б к о в Михаил Викторович
А в а ч ё в а Татьяна Геннадиевна

Редактор Р.К. Мангутова
Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 16.02.15. Формат бумаги 60 × 84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 0,5.

Тираж 200 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: получение петли гистерезиса на экране осциллографа и снятие основных характеристик ферромагнетика осциллографическим методом.

Приборы и принадлежности: установка, состоящая из понижающего трансформатора, замкнутой магнитной цепи из исследуемого материала с обмотками и RC -цепью, осциллограф.

Элементы теории

Основной характеристикой магнитного состояния вещества является вектор намагниченности, который определяется как магнитный момент единицы объема вещества:

$$J = \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V}. \quad (1)$$

В этом выражении в числителе стоит векторная сумма магнитных моментов \vec{p}_m атомов, молекул в объеме ΔV .

Так как силовая характеристика магнитного поля – магнитная индукция B зависит от среды, в которой находится источник магнитного поля, в качестве характеристики поля без учета этой намагниченности, вводится *напряженность магнитного поля*, которая, с учетом размерностей величин J и B , определяется как

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}. \quad (2)$$

У большого класса веществ намагниченность оказывается пропорциональной величине напряженности магнитного поля:

$$\vec{J} = \chi \vec{H}, \quad (3)$$

где коэффициент пропорциональности χ называется *магнитной восприимчивостью* вещества.

Из (2) и (3) получаем

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (4)$$

где $\mu = 1 + \chi$ есть *магнитная проницаемость вещества*.

Так как намагниченность в вакууме отсутствует, то отсюда следует физический смысл магнитной проницаемости – она показывает, во

сколько раз возрастает магнитная индукция в веществе по сравнению с магнитной индукцией в вакууме (сказанное относится к случаю, когда среда заполняет все пространство, у ограниченных тел магнитная индукция в них зависит также от геометрической формы).

У ферромагнитных веществ, в отличие от диа- и парамагнетиков, зависимость $J(H)$ существенно нелинейная, т. е. магнитная восприимчивость, а следовательно, и магнитная проницаемость тоже зависят от величины H . Кроме того, в значительном диапазоне значений H величина χ (и μ) ферромагнетиков существенно больше единицы (у специальных *магнитомягких* сплавов может достигать значений порядка 10^6).

Кроме значительного усиления магнитного поля у ферромагнетиков, как правило, наблюдается явление *гистерезиса*. Это явление состоит в том, что намагниченность среды зависит не только от величины H , но и от того, каким было магнитное состояние этой среды при предыдущих изменениях внешнего магнитного поля.

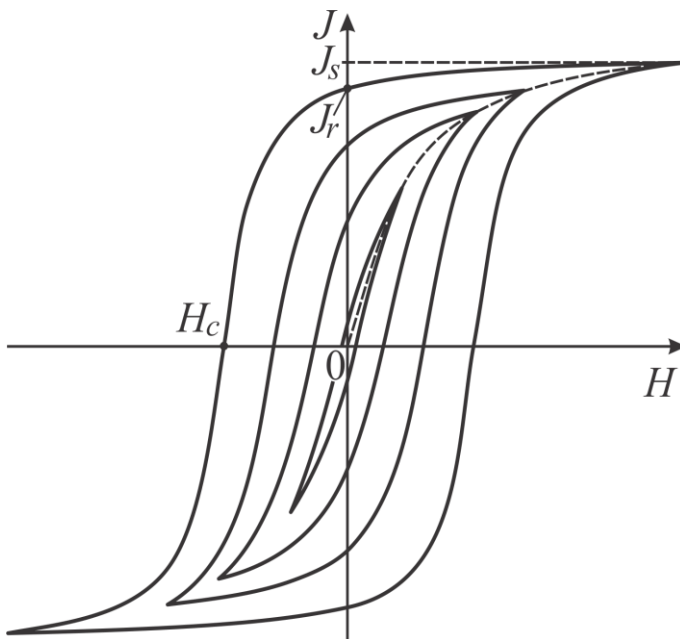


Рис. 1. Предельный и частные циклы гистерезиса

К примеру, при периодическом изменении величины напряженности магнитного поля по закону $H = H_0 \sin \omega t$ кривая зависимости $J(H)$ при уменьшении H не будет совпадать с кривой зависимости $J(H)$ при возрастании H . Полная замкнутая кривая, описываемая восходящей и нисходящей ветвями этой зависимости, называется *симметричной петлей гистерезиса*. Линия,

соединяющая вершины частных симметричных петель гистерезиса (при различных значениях H_0), называется нулевой, или *основной кривой намагниченности*. При больших значениях H намагниченность достигает насыщения J_s (рис. 1). Такой цикл гистерезиса называется предель-

ным. Так как у ферромагнетиков $\vec{B} \approx \mu_0 \vec{J}$, то гистерезисные циклы $B(H)$ и $J(H)$ почти одинаковы по форме. Величина J_r на рис. 1, соответствующая значению $H = 0$ для предельного цикла, называется *остаточной намагниченностью*, а величина H_c , соответствующая значению $J = 0$ для этого же цикла, называется *коэрцитивной силой*.

При намагничивании вещества совершается работа. Если при небольшом изменении напряженности поля H магнитная индукция изменится на величину dB , то работа в единице объема при таком изменении поля будет $dA = HdB$.

Легко показать [1], что работа, совершаемая за один полный цикл перемагничивания, будет равна площади петли гистерезиса $B(H)$. При этом совершаемая работа переходит во внутреннюю энергию образца, т.е. в тепло.

Из гистерезисного характера зависимости $J(H)$ следует неоднозначный, т.е. тоже гистерезисный, характер зависимости $\chi(H)$. Если для основной кривой намагничивания можно определить восприимчивость как $\chi = J/H$, поскольку сама эта кривая определяется однозначно, то для восходящей и нисходящей кривых петли гистерезиса значения χ достигают бесконечности при $H = 0$, что физически бессмысленно. В этом случае однозначно определяемой характеристикой является дифференциальная восприимчивость: $\chi_{\text{диф}} = dJ/dH$. Примерная зависимость $\chi_{\text{диф}}(H)$ для гистерезисного цикла и сам цикл $J(H)$ показаны на рис. 2.

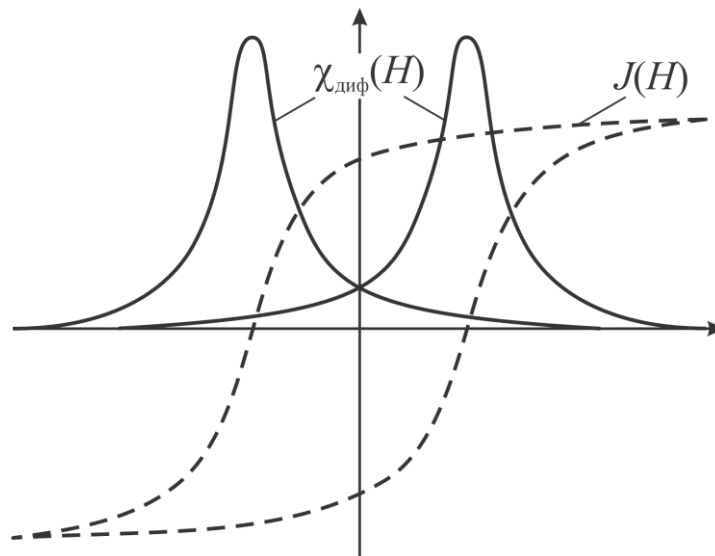


Рис. 2. Зависимости $J(H)$ и $\chi_{\text{диф}}(H)$

Если образец из исследуемого материала является замкнутым, т.е. имеет форму тороида, то при измерении B и H для основной кривой магнитную проницаемость для каждой точки этой кривой можно найти непосредственно по формуле

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (5)$$

Поведение ферромагнетиков в магнитном поле и их магнитные свойства объясняются законами квантовой механики. Ответственными за магнетизм ферромагнетиков являются собственные спиновые магнитные моменты электронов; специфическое квантовое обменное взаимодействие электронов соседних атомов и молекул заставляет магнитные моменты электронов выстраиваться в одном направлении. Так как при этом увеличивается размагничивающее поле поверхностей образца, то в результате в ферромагнетике возникают *домены*, области самопроизвольной намагниченности, в пределах которых вещество намагничено до насыщения. В ненамагниченном ферромагнетике магнитные поля доменов ориентированы различно по отношению друг к другу и их суммарная намагниченность равна нулю. У простых ферромагнетиков (железо, никель и их сплавы) домены имеют размеры порядка $10^{-4} - 10^{-3}$ см.

В начальных стадиях процесса намагничивания, в слабых полях, происходят незначительный поворот вектора намагниченности и незначительная деформация стенок каждого домена. При увеличении поля начинается процесс смещения границ доменов – при этом домены, направление намагниченности в которых близко к направлению внешнего поля, увеличиваются в размерах, поглощая соседние домены. Этот процесс носит скачкообразный характер, суммарная намагниченность увеличивается при этом микроскопическими скачками (они называются *скачками Баркгаузена*). Наконец, при приближении к насыщению происходит поворот вектора намагниченности образовавшегося максимального домена к направлению внешнего поля.

При уменьшении поля до нуля доменная структура восстанавливается не полностью, часть доменов оказывается ориентированной преимущественно в направлении предыдущего поля. Этим объясняется су-

ществование остаточной намагниченности и явления гистерезиса в целом.

Методика эксперимента

Для получения основной кривой индукции $B(H)$ и последующего построения зависимости $\mu(H)$ используется установка, схема которой показана на рис. 3.

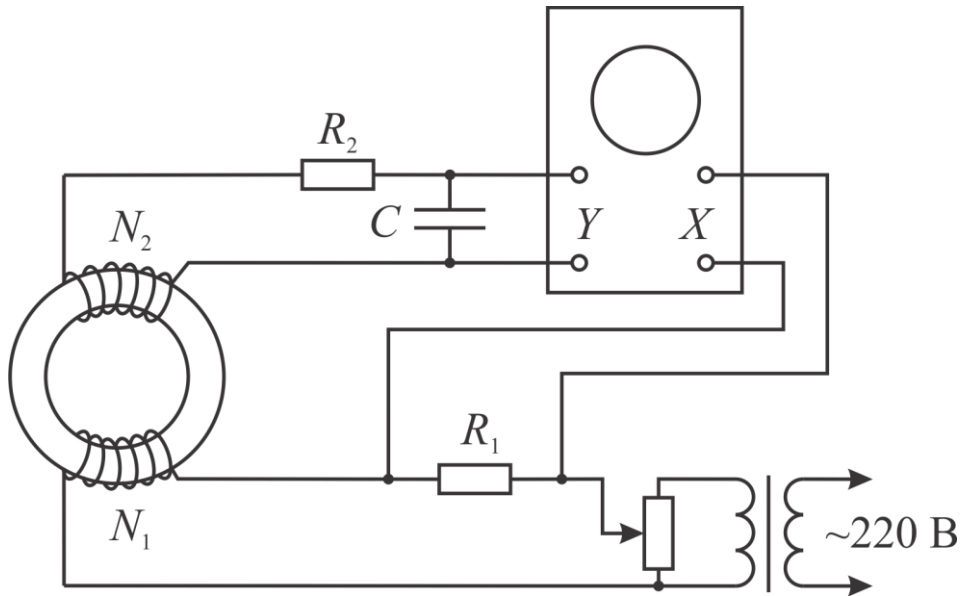


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

В цепи первичной обмотки замкнутой магнитной цепи находится резистор R_1 , с которого снимается напряжение U_x и подается на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа. Мгновенные значения этого напряжения будут пропорциональны мгновенным значениям напряженности магнитного поля H в магнитной цепи:

$$H = \frac{I_1 N_1}{L} = \frac{N_1}{R_1 L} U_x, \quad (6)$$

где N_1 – число витков первичной обмотки; L – длина средней линии магнитной цепи; I_1 – сила тока в первичной обмотке.

Напряжение, индуцируемое во вторичной обмотке трансформатора, подается через резистор R_2 на конденсатор C , а с него на усилитель вертикального отклонения луча осциллографа. Покажем, что напряжение на конденсаторе будет пропорционально магнитной индукции.

Согласно закону электромагнитной индукции, во вторичной обмотке трансформатора возникает ЭДС, равная по модулю

$$|\varepsilon_i| = \frac{d\Phi}{dt} = N_2 S \frac{dB}{dt},$$

где Φ – магнитный поток, N_2 – число витков вторичной обмотки, S – площадь поперечного сечения обмотки, B – индукция магнитного поля.

Если активное сопротивление цепи намного больше емкостного ($R_2 \gg 1/\omega C$), то сила тока I_2 во вторичной обмотке определяется как

$$I_2 \approx \frac{|\varepsilon_i|}{R_2} = \frac{SN_2}{R_2} \frac{dB}{dt}.$$

При изменении индукции магнитного поля за время t от 0 до некоторого значения B напряжение на конденсаторе станет равным

$$U = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t I_2 dt = \frac{SN_2}{CR_2} \int_0^B dB = \frac{SN_2}{CR_2} B.$$

Таким образом, подаваемое на вертикальные отклоняющие пластины осциллографа напряжение U_y пропорционально магнитной индукции в образце:

$$U_y = \frac{SN_2}{CR_2} B,$$

откуда

$$B = \frac{CR_2}{SN_2} U_y. \quad (7)$$

Порядок выполнения работы

1. Собрать схему согласно рис. 3.
2. Проверить положение переключателей на передней панели осциллографа согласно прилагаемой инструкции.
3. Включить осциллограф и, подождав 1÷2 минуты, с помощью регулировок смещения луча по осям X и Y вывести светящееся пятно в центр экрана.
4. Включить в сеть экспериментальный макет, изменяя ток в первичной цепи, добиться того, чтобы петля гистерезиса занимала большую часть экрана (для повышения точности измерений можно до включения

установки вывести светящееся пятно в левый нижний угол и получить аналогичным образом изображение половины петли гистерезиса на всем экране).

5. Определить координаты вершины петли гистерезиса X и Y относительно ее центра в делениях шкалы осциллографа и занести результат в таблицу. Уменьшив ток в первичной обмотке, получить на экране петли меньшего размера и снять для них координаты вершины. Прodelать таким образом 10÷15 измерений, пока петля не стянется в точку. После проведения измерений отключить макет и осциллограф от сети.

6. Занести данные измерений в таблицу.

№ п/п	X , дел	Y , дел	H , А/м	B , Тл	μ , 10^3
1					
2					
3					
...					

7. Для каждой пары значений X и Y рассчитать величины H и B . Для этого преобразуем формулы (6) и (7) к виду:

$$\begin{aligned} H &= k_x X, \\ B &= k_y Y, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$k_x = U_{x0} \frac{N_1}{R_1 L}, \quad k_y = U_{y0} \frac{C R_2}{S N_2}.$$

Здесь U_{x0} и U_{y0} – цены деления осциллографа по осям X и Y (задаются переключателями «V/ДЕЛ I» и «V/ДЕЛ II» соответственно). Параметры электрической цепи: $R_1 = 8,2 \text{ Ом}$; $R_2 = 22 \text{ кОм}$; $C = 10 \text{ мкФ}$; $S = 0,5 \text{ см}^2$; $L = 8 \text{ см}$; $N_1 = 102$; $N_2 = 640$.

8. Рассчитать значения μ для вершины каждого частного цикла гистерезиса по формуле (5).

9. Построить графики зависимости $B(H)$ и $\mu(H)$.

Дополнительное задание

1. По графику зависимости $B(H)$, разбивая его на малые отрезки ΔH и определяя соответствующие изменения ΔB , рассчитать и построить график зависимости дифференциальной магнитной проницаемости и сравнить его с графиком $\mu(H)$.

2. Нарисовать максимальный цикл гистерезиса (можно срисовать с экрана осциллографа) в координатах H и B . Оценить по площади цикла работу, совершаемую за один цикл перемагничивания единицы объема материала образца.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Дать определения характеристик магнитного поля и магнитных свойств вещества. Показать размерности величин исходя из их определений.

2. Дать качественное объяснение природы ферромагнетизма.

3. Объяснить ход кривой намагничивания и причины гистерезиса.

4. Описать методику получения петли гистерезиса на экране осциллографа.

5. Какие магнитные характеристики должен иметь ферромагнетик, используемый в трансформаторах?

6. Где могут использоваться ферромагнетики с большими значениями коэрцитивной силы? С прямоугольной петлей гистерезиса? С очень узкой петлей гистерезиса?

Библиографический список

1. Савельев И.В. Курс физики: учебник. Том 2: Электричество. Колебания и волны. Волновая оптика. М.: Лань, 2005. 3-е изд., стереотип. 480 с.

2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: учеб. пособие для вузов. М.: Академия, 2009. 8-е изд., стереотип. 720 с.

3. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы: учебник. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2010. 7-е изд. 320 с.