

5097

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

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ФЕРРОМАГНЕТИКА

Методические указания
к лабораторной работе

Рязань 2017

УДК 537.226.4

Измерение магнитной проницаемости ферромагнетика: методические указания к лабораторной работе / Рязан. гос. радиотехн. ун-т; сост.: М.А. Буробин, Ю.В. Черкасова. Рязань, 2017. 8 с.

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

Предназначены для студентов всех специальностей, изучающих дисциплину «Физика».

Табл. 1. Ил. 4. Библиогр.: 3 назв.

Ферромагнетики, гистерезис, магнитная проницаемость

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

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

Измерение магнитной проницаемости ферромагнетика

Составители: Буробин Михаил Анатольевич
Черкасова Юлия Вадимовна

Редактор Р.К. Мангутова

Корректор С.В. Макушина

Подписано в печать 27.01.17. Формат бумаги 60 × 84 1/16.

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

Тираж 200 экз. Заказ 3278.

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.

Цель работы: изучение зависимости полной магнитной проницаемости замкнутого магнитопровода из ферромагнитного материала от напряженности перемагничивающего поля.

Приборы и принадлежности: макет установки, вольтметр, лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), источник переменного напряжения, набор соединительных проводов.

Элементы теории

Особый класс веществ составляют *ферромагнетики* [1, 2]. К ним относятся железо, никель, кобальт, гадолиний, их сплавы, а также некоторые сплавы и соединения марганца и хрома с неферромагнитными элементами (*MnAlCu*, *GrTe* и др.).

Ферромагнетики – сильномагнитные вещества. Они способны намагничиваться. Теория ферромагнетизма была создана советским физиком Я.И. Френкелем и независимо от него немецким физиком В. Гейзенбергом. Ответственными за магнитные свойства ферромагнетиков являются собственные магнитные моменты – *спины* (от англ. spin – вращать, вращать) электронов, расположенные на внутренних подболочках атомов. Спины этих электронов не скомпенсированы и дают определенный результирующий магнитный момент. В кристаллах существуют обменные силы, которые ориентируют эти моменты параллельно друг другу. В результате возникают области самопроизвольной намагниченности – *домены*. Домены имеют размеры порядка 10^{-4} – 10^{-3} мм. Каждый домен намагничен до насыщения. Размагнитить любой домен можно только путем нагрева ферромагнетика до определенной температуры – *точки Кюри*. Для железа она равна 768 °С. При этой температуре железо становится парамагнетиком.

При отсутствии внешнего магнитного поля ферромагнетик может быть в целом размагничен, но это не означает, что в нем исчезли домены.

Размагниченное состояние может определяться в том случае, когда векторная сумма магнитных моментов всех доменов равна нулю. При увеличении напряженности внешнего магнитного поля границы между доменами начинают смещаться и спины переориентируются так, что результирующий магнитный момент ферромагнетика тоже начинает увеличиваться вдоль направления поля. При достаточно большом внешнем поле вся намагничиваемая область ферромагнетика становится одним доменом. Возникает *намагниченность насыщения* (J_s).

Намагничивание ферромагнетиков характеризуется основной кривой намагничивания $J(H)$:

$$J = \frac{B}{\mu_0} - H, \quad (1)$$

где B – магнитная индукция вещества: $B = \mu \mu_0 H$; H – напряженность намагничивающего поля; μ – магнитная проницаемость ферромагнетика.

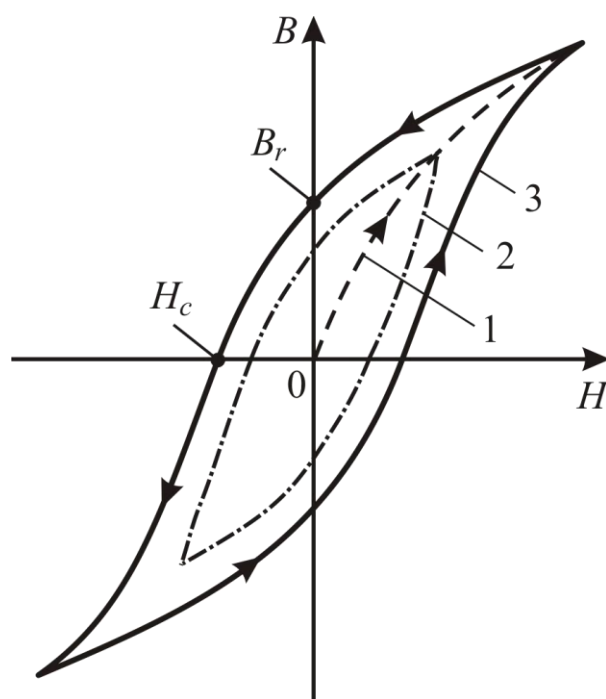


Рис. 1

Ферромагнетики обладают явлением *гистерезиса*. На рис. 1 показана типичная петля гистерезиса в координатах $B(H)$. Кривая, проведенная из нуля (кривая 1), называется *основной или первоначальной кривой индукции*. На основе этой кривой можно построить основную кривую намагничивания $J(H)$, используя соотношение (1).

Гистерезис проявляется при перемагничивании ферромагнетика. Существуют полный цикл и частные циклы перемагничивания. Для

получения полного цикла ферромагнетик вначале намагничивают до насыщения ($J = J_s$). Затем, начиная с намагниченности насыщения, уменьшают ее до $-J_s$ и снова увеличивают до J_s . В результате величина B изменяется по внешней петле (кривая 3). Величина B_r называется *остаточной индукцией*, H_c – *коэрцитивной силой* (величиной напряженности магнитного поля, которая снимает остаточную индукцию).

Для получения частного цикла (кривая 2) необходимо менять H так, чтобы наибольшие значения J не достигали значения J_s . Таких циклов можно получить множество. Вершины частных циклов всегда лежат на основной кривой индукции.

Магнитная проницаемость μ определяется по основной кривой индукции:

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (2)$$

Для любого частного цикла вершина его соответствует определенным значениям B и H , входящим в формулу (2).

Для того чтобы измерить μ для разных H , достаточно получить серию частных циклов перемагничивания, измерить B и H в их вершинах. Затем, используя формулу (2), можно вычислить μ для каждой пары измеренных B и H и построить зависимость $\mu(H)$.

Частные циклы можно получить при перемагничивании ферромагнетика переменным полем невысокой частоты, например 50 Гц. Более высокие частоты вызывают динамические эффекты в ферромагнетиках (токи Фуко, магнитное последствие), которые меняют форму петли гистерезиса. При частоте $\nu \leq 50$ Гц эти эффекты заметно не сказываются на петле, поэтому $\mu(H)$ зависит только от свойств вещества и не зависит от времени перемагничивания. Такой режим перемагничивания называется *квазистатическим*.

Метод эксперимента

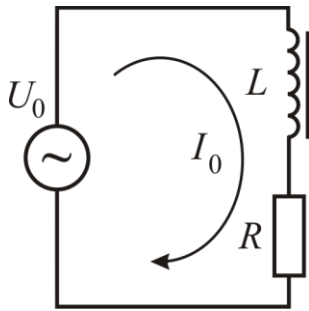


Рис. 2

Существуют различные методы измерения μ . В данной работе предлагается один из них, который состоит в следующем.

Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из включенных последовательно резистора R и катушки индуктивности L (рис. 2). Пусть в цепи действует переменная ЭДС с амплитудой U_0 , которая обеспечивает переменный ток

$$I = I_0 \sin \omega t ,$$

где I_0 – амплитуда силы тока; ω – циклическая частота переменного тока.

Известно, что для данного контура амплитудное значение силы тока определяется как

$$I_0 = \frac{U_0}{\sqrt{(\omega L)^2 + (R + r)^2}} , \quad (3)$$

где L – коэффициент самоиндукции (индуктивность); r – омическое сопротивление катушки. Произведение ωL называется *индуктивным сопротивлением* катушки. Из формулы (3) выражаем индуктивность:

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U_0}{I_0}\right)^2 - (R + r)^2} . \quad (4)$$

С другой стороны, коэффициент самоиндукции L катушки с сердечником в форме тороида, радиус которого много больше радиуса витка на нем, мы имеем дело именно с такой катушкой, определяется формулой [1, 2]:

$$L = \mu \mu_0 N^2 \frac{S}{l} , \quad (5)$$

где N – число витков на тороиде; S – площадь поперечного сечения тороида; l – его длина; μ – магнитная проницаемость сердечника.

Если взять такую же катушку, но с немагнитным сердечником ($\mu = 1$), то ее индуктивность будет определяться как

$$L_0 = \mu_0 N^2 \frac{S}{l}. \quad (6)$$

Из формул (5) и (6) получаем:

$$\mu = \frac{L}{L_0}. \quad (7)$$

Значение L_0 можно рассчитать теоретически, а L можно измерить с помощью схемы, показанной на рис. 3.

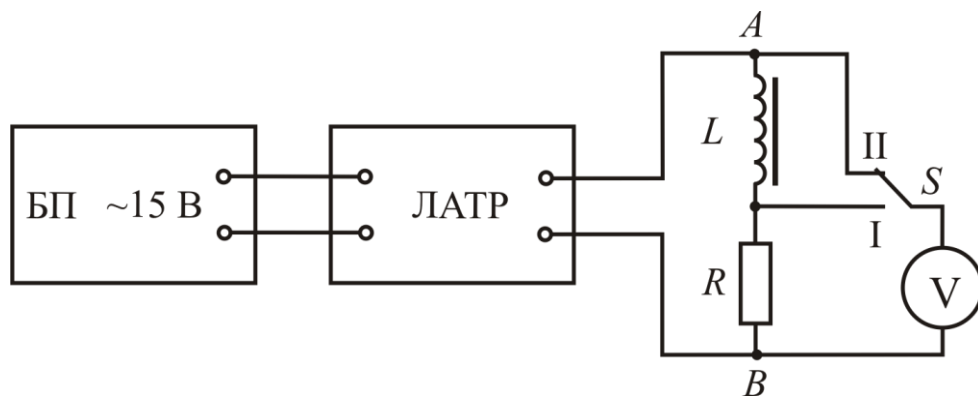


Рис. 3

Амплитуда переменного напряжения, подаваемого на схему от блока питания БП, регулируется с помощью ЛАТР. Переключатель S позволяет поочередно подключать вольтметр то для измерения напряжения на резисторе R (положение I), то для измерения напряжения на участке $A-B$ (положение II). В обоих случаях вольтметром измеряется эффективное значение напряжения (U_I и U_{II}). Амплитудное значение силы тока определяется как [1, 2]:

$$I_0 = \frac{U_I \sqrt{2}}{R}. \quad (8)$$

Амплитудное значение напряжения равно:

$$U_0 = U_{II} \sqrt{2}. \quad (9)$$

Подставив (8) и (9) в (4), получим:

$$L = \frac{R}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U_{II}}{U_I}\right)^2 - \left(1 + \frac{r}{R}\right)^2}. \quad (10)$$

Из формул (5) и (10) находим:

$$\mu = A \sqrt{\left(\frac{U_{II}}{U_I}\right)^2 - \left(1 + \frac{r}{R}\right)^2}, \quad (11)$$

где $A = \frac{Rl}{\mu_0 N^2 S \omega}.$

В данной работе $R = 4 \text{ Ом}; \quad r = 0,2 \text{ Ом}; \quad l = 0,04 \text{ м}; \quad N = 58;$
 $S = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \quad \omega = 2\pi\nu; \quad \nu = 50 \text{ Гц.}$ При этих значениях $\frac{r}{R} = 0,05$. Прене-

брегая величиной $\frac{r}{R}$ в формуле (11), получаем окончательное выражение
 для расчета магнитной проницаемости

$$\mu = A \sqrt{\left(\frac{U_{II}}{U_I}\right)^2 - 1}. \quad (12)$$

Напряженность магнитного поля H катушки индуктивности с тороидальным сердечником определяется как

$$H = \frac{N}{l} I_0.$$

Выражая I_0 из формулы (8), получаем:

$$H = \frac{N\sqrt{2}}{lR} U_I. \quad (13)$$

Таким образом, чтобы вычислить магнитную проницаемость μ ферромагнетика для каждого значения напряженности магнитного поля H , достаточно измерить U_I и U_{II} . Типичная зависимость $\mu(H)$ показана на рис. 4. В данной работе предлагается измерить эту зависимость.

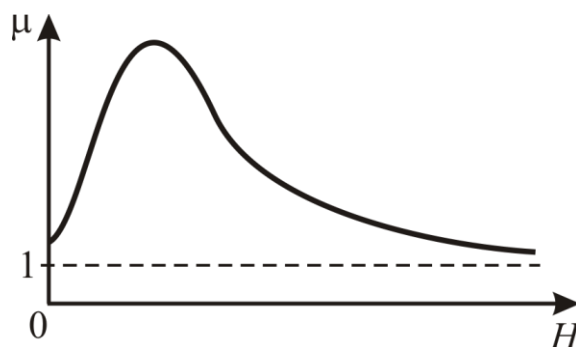


Рис. 4

Порядок выполнения работы

1. Включите источник переменного напряжения и вольтметр в сеть и прогрейте их в течение 3-5 мин.
2. Размагнитьте сердечник катушки индуктивности, отключив вольтметр. Для этого поставьте переключатель S в среднее положение и поверните ручку регулятора напряжения на ЛАТРе от одного крайнего положения до другого.
3. Переведите переключатель S в положение I и с помощью ЛАТРа установите минимальное напряжение по показаниям вольтметра. Измерьте напряжение U_I .
4. Переведите переключатель S в положение II и измерьте напряжение U_{II} .
5. Изменяя напряжение U_I в пределах от 0,06 до 7 В, измеряйте соответствующие значения напряжения U_{II} . Результаты измерений заносите в таблицу.

Измерения значений U_I в диапазоне от 0,06 до 0,5 В рекомендуется производить с интервалом 0,04 В; в диапазоне от 0,5 до 1,0 В – с интер-

валом 0,1 В; в диапазоне от 1 до 3 В – с интервалом 0,5 В; в диапазоне от 3 до 7 В – с интервалом 1 В.

6. По формулам (12) и (13) для каждой пары значений U_I и U_{II} рассчитайте μ и H и занесите результаты в таблицу.

U_I , В	U_{II} , В	H , А/м	μ , $\times 10^3$
0,06			
0,10			
...			

7. Постройте график зависимости $\mu(H)$.

Вопросы и задания для самоконтроля

1. Что такое магнитная проницаемость μ и от чего она зависит?
2. Как классифицируются магнетики по величине магнитной проницаемости?
3. Что такое остаточная намагниченность (остаточная индукция) и коэрцитивная сила? Каким образом можно размагнитить ферромагнетик?
4. Объясните ход кривой $\mu(H)$.
5. Выведите формулу (12) для расчета магнитной проницаемости.
6. Дайте определение индуктивности и индуктивного сопротивления.

Библиографический список

1. Савельев И.В. Курс общей физики: в 5-и т. Т. 2 // Электричество и магнетизм: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2011.
2. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: учеб. пособие для вузов. М.: Академия, 2014.
3. Курс физики. Т. 1/ под. ред. В. Н. Лозовского. СПб., 2009.