

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра физики, электротехники и автоматики

методические указания к лабораторным работам по физике
для бакалавров всех направлений подготовки

Лабораторная работа № 34

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Казань
2018

УДК 535
ББК 23.343
Ф47

Ф47 Методические указания к лабораторным работам по физике для бакалавров всех направлений подготовки. Лабораторная работа № 34. Магнитные свойства вещества / Сост.: В. Л. Фурер. Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2018.- 9 с.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанского государственного архитектурно-строительного университета

В работе рассмотрены магнитные свойства вещества. Приводится описание экспериментальной установки, на которой наблюдается петля гистерезиса и проводятся измерения магнитной индукции и коэрцитивной силы.

Илл. 4

Рецензент
профессор кафедры химии и инженерной экологии в строительстве
Е.В. Сагадеев

УДК 535
ББК 23.343

© Казанский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2018.

© Фурер В.Л., 2018.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ.

Опыт показывает, что вокруг проводников с током возникает силовое поле, называемое магнитным, которое обнаруживается по действию на другие проводники с током.

Для исследования магнитного поля применяют пробные контуры (рамки с током). **Пробными** называют замкнутые контуры, по которым течёт ток, столь малый, что в пределах контура поле можно считать однородным. Пробный контур характеризуют магнитным моментом \vec{p}_m , который является вектором. Его модуль равен $p_m = I \cdot S$, где I — сила тока в контуре, S — площадь контура. Вектор магнитного момента направлен перпендикулярно к плоскости контура и связан с направлением тока **правилом правого винта**: при вращении винта в направлении тока, его поступательное движение показывает направление магнитного момента контура (рис. 1). Если пробный контур внести в магнитное поле, то на него будет действовать момент сил M , поворачивающий этот контур. Опыт показывает, что для одной и той же точки магнитного поля максимальная величина момента сил M_{\max} пропорциональна магнитному моменту контура, т. е. $M_{\max} \sim p_m$. При этом оказывается, что отношение M_{\max}/p_m для выбранной точки поля остаётся постоянным, не зависит от свойств пробного контура и поэтому может служить характеристикой магнитного поля. Эту характеристику называют магнитной индукцией, она является векторной величиной и обозначается \vec{B} .

Выражение $B = \frac{M_{\max}}{p_m}$ определяет модуль индукции магнитного поля. Пробный

контур, свободно ориентирующийся в магнитном поле, установится так, что вектор \vec{p}_m будет совпадать с направлением магнитной индукции, а вращающийся момент будет максимальным, когда \vec{p}_m перпендикулярен вектору \vec{B} .

Итак, индукция магнитного поля \vec{B} в данной точке численно равна отношению максимального момента сил, действующего на пробный контур, помещённый в эту точку, к его магнитному моменту, и направлена вдоль вектора \vec{p}_m свободно ориентирующегося контура.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ.

Всякое вещество является магнетиком, т. е. оно способно под действием магнитного поля приобретать магнитный момент (намагничиваться). Рассмотрим причину этого явления с точки зрения строения атомов и молекул. По воззрениям классической физики электроны в атомах движутся вокруг ядра по замкнутым орбитам, образуя круговые микротоки, которые характеризуются магнитным моментом \vec{p}_L , называемым орбитальным моментом электрона. Кроме того, электрон обладает

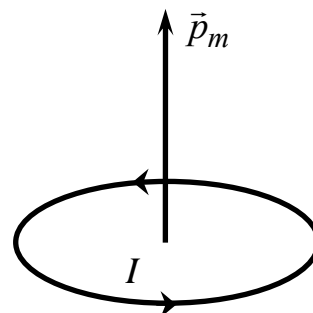


Рис. 1

собственным (спиновым) магнитным моментом \vec{p}_s . Полный магнитный момент атома или молекулы равен векторной сумме орбитальных и спиновых моментов всех электронов.

Магнитное поле в веществе является суммой внешнего поля с индукцией \vec{B}_0 и внутреннего $\vec{B}_{\text{внутр}}$: $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_{\text{внутр}}$. Усиление или ослабление магнитного поля в веществе характеризуют физической величиной, называемой **магнитной проницаемостью**, которая показывает, во сколько раз модуль индукции магнитного поля в веществе отличается от модуля индукции того же поля в вакууме, т. е. $\mu = B/B_0$, где μ — магнитная проницаемость вещества. Магнитная индукция связана с напряженностью внешнего магнитного поля H соотношением $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная. В системе единиц СИ индукция магнитного поля измеряется в теслах (Тл), а напряженность магнитного поля в амперах на метр (А/м).

В зависимости от величины μ и по характеру намагничивания все вещества можно разделить на диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Для диамагнетиков $\mu < 1$, для парамагнетиков $\mu > 1$, при этом они близки к единице. Для ферромагнетиков порядок величины μ равен 10^5 — 10^6 и зависит от напряженности магнитного поля.

Диамагнетиками называются вещества, магнитные моменты атомов и молекул которых в отсутствие внешнего магнитного поля равны нулю. При внесении диамагнетика во внешнее магнитное поле его атомы и молекулы приобретают магнитный момент, направленный противоположно внешнему полю, что приводит к ослаблению магнитного поля в веществе. Такой индукционный эффект появления магнитного момента под действием внешнего магнитного поля называется **диамагнетизмом**. Это универсальный эффект, присущий всем телам без исключения. Отметим, что в неоднородном магнитном поле диамагнетик выталкивается в область более слабого поля. Диамагнетиками являются инертные газы, большинство органических соединений, многие металлы (золото, медь, серебро), вода, стекло, мрамор.

Парамагнетиками называются вещества, у которых атомы и молекулы в отсутствие внешнего поля имеют некоторый магнитный момент. Однако вследствие теплового движения магнитные моменты отдельных молекул ориентированы хаотически и тело в целом не намагничено. При внесении парамагнетика во внешнее магнитное поле происходит частичная ориентация магнитных моментов вдоль внешнего поля, что приводит к усилению магнитного поля в веществе. В сильных магнитных полях магнитные моменты атомов и молекул почти полностью устанавливаются по направлению внешнего поля, т.е. имеет место магнитное насыщение. Насыщение парамагнетиков легче достигается при низких температурах, когда дезориентирующее действие теплового движения весьма слабое. Эффект ориентационного намагничивания называется **парамагнетизмом**. По величине этот эффект тоже слаб, хотя перекрывает диамагнитный эффект. В неоднородном магнитном поле парамагнетики втягива-

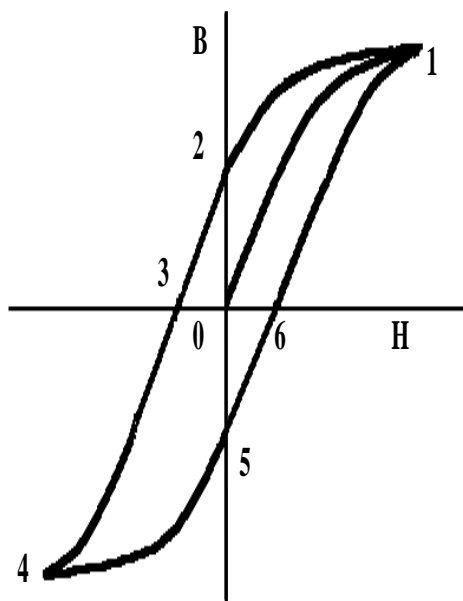


Рис.2

ются в область сильного магнитного поля. К парамагнетикам относятся кислород, алюминий, платина, щелочные металлы и т.д.

Диамагнетики и парамагнетики относятся к группе слабомагнитных материалов. Существует и группа веществ, обладающих сильными магнитными свойствами, называемых **ферромагнетиками**. В ферромагнетиках имеются области размером до 0.1мм, называемые **доменами**, в которых спиновые магнитные моменты электронов выстроены параллельно друг другу в одном направлении, т. е. эти области намагничены. Однако в отсутствие внешнего магнитного поля ферромагнетик не обнаруживает намагниченности, так как

магнитные моменты отдельных доменов расположены хаотически. При внесении ферромагнетика в магнитное поле по направлению поля ориентируются магнитные моменты не отдельных атомов, как в парамагнетике, а целых областей — доменов. Этот процесс приводит к усилению магнитного поля в ферромагнетике, причём собственное магнитное поле внутри вещества значительно превосходит поле внешнее.

Ферромагнитные свойства зависят от температуры. Для ферромагнетика существует такая температура $T = T_K$, при которой его ферромагнитные свойства пропадают. При этой температуре энергия теплового движения атомов становится достаточной для разрушения областей самопроизвольного намагничивания. Эта температура называется **точкой Кюри**. При $T > T_K$ ферромагнетик ведёт себя как парамагнитное вещество. К ферромагнетикам относятся железо, никель, кобальт, ряд сплавов, причём ферромагнетизм обнаружен только в кристаллическом состоянии перечисленных веществ. Точка Кюри для железа $\sim 750^\circ\text{C}$, для никеля $\sim 350^\circ\text{C}$, для кобальта $\sim 1150^\circ\text{C}$.

ГИСТЕРЕЗИС

Характерной особенностью ферромагнетиков является магнитный гистерезис. Это явление заключается в том, что индукция магнитного поля в веществе зависит не только от напряженности H внешнего магнитного поля, но и от предварительного намагничивания, которому подвергался ферромагнетик.

Если ферромагнетик, ранее не подвергавшийся намагничиванию, поместить в магнитное поле, то с ростом напряженности H этого внешнего поля в ферромагнетике будет появляться намагниченность (участок 0 – 1 рис. 2). Это объясняется ориентацией магнитных моментов доменов вдоль направления H . В точке 1 практически все домены выстроены по полю, достигнута максимальная намагни-

ченность ферромагнетика B_m . При уменьшении напряженности намагничивающего поля начинается дезориентация магнитных моментов доменов (участок 1 – 2), уменьшение индукции B будет происходить с отставанием от основной кривой намагничивания ($0 – 1$). Это отставание носит название *гистерезиса*.

При уменьшении напряженности H до нуля часть магнитных моментов доменов останется ориентированной по первоначальному направлению поля. Таким образом, при снятии внешнего поля ферромагнитное тело остаётся намагниченным с некоторой остаточной индукцией $B_{ост}$ (участок 0 – 2). Это свойство ферромагнитных материалов — сохранять намагниченность и в отсутствие внешнего поля — используется при изготовлении из них постоянных магнитов. Для этих целей применяют ферромагнетики с большой остаточной индукцией. Для полного размагничивания ферромагнетика необходимо приложить магнитное поле обратного направления. *Величина напряженности поля H_k (участок 0 – 3), при которой намагниченность ферромагнетика исчезает полностью, называется коэрцитивной силой*. Остаточная намагниченность и коэрцитивная сила являются характеристиками ферромагнетика. Дальнейшее увеличение напряженности H обратного поля увеличивает индукцию B (участок 3 – 4), т.е. приводит к ориентации магнитных моментов доменов вдоль нового направления поля H . Проходя полный цикл изменения индукции от $+B$ до $-B$ и обратно, т. е. перемагничивая образец, мы получим замкнутую кривую (1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 1), которая называется петлей гистерезиса.

Такое перемагничивание связано с переориентацией магнитных моментов доменов и приводит к усилению теплового движения. Это значит, что часть работы, затрачиваемой на переориентацию доменов, превращается в теплоту, вследствие чего при перемагничивании наблюдается нагревание вещества. Эта работа совершается силами магнитного поля за счёт его энергии. Опыт показывает, что количество тепла, выделяющегося при перемагничивании за полный цикл, измеряется площадью петли гистерезиса.

Различные ферромагнитные вещества дают разные кривые гистерезиса. Для технических применений требуется различный тип материалов. Принято различать «мягкие» магнитные материалы, характеризующиеся малой коэрцитивной силой (узкая петля гистерезиса) и «жёсткие», характеризующиеся большой коэрцитивной силой (широкая петля гистерезиса). К числу первых принадлежит железо, кремниевая сталь, сплавы железа с никелем (особенно сплав «пермаллой», содержащий 78% Ni). Такого рода материалы употребляются, например, для изготовления сердечников трансформаторов. К числу «жёстких» магнитных материалов относятся углеродистые и специальные стали (например, сплав «магнико»). «Жёсткие» материалы употребляются для изготовления постоянных магнитов.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСА.

Петлю гистерезиса нетрудно получить на экране осциллографа, если ферромагнетик поместить в магнитное поле, создаваемое переменным током. Ис-

следуемым ферромагнетиком является сердечник тороида T . Первичная обмотка тороида питается переменным током от лабораторного автотрансформатора (ЛАТРА) A (рис. 3).

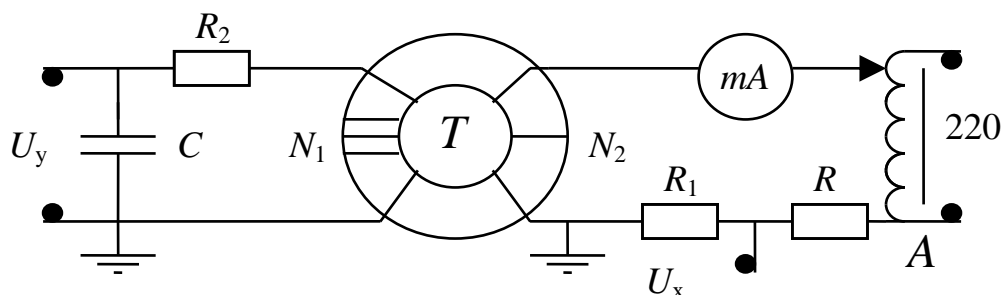


Рис.3

Напряжение U_x , подаваемое на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа, пропорционально напряженности магнитного поля H , а на вертикально отклоняющие пластины подаётся напряжение U_y , пропорциональное индукции B поля в сердечнике тороида.

Опуская математические расчёты, запишем:

$$U_x = \frac{R_1}{n_1 \cdot \mu_0} H, \quad (1)$$

$$U_y = -\frac{N_2 \cdot S}{C \cdot R_2} B, \quad (2)$$

где μ_0 — магнитная постоянная, n_1 — число витков тороида, приходящих на единицу длины тороида, N_2 — число витков вторичной обмотки, S — площадь одного витка.

На экране осциллографа получается петля гистерезиса. За один период синусоидального изменения тока луч на экране опишет полную петлю гистерезиса, а за каждый последующий период в точности её повторит. Поэтому на экране будет видна неподвижная петля гистерезиса. Увеличивая напряжение U_x с помощью автотрансформатора, мы будем увеличивать амплитуду колебаний B_0 и получать на экране последовательно ряд различных по своей площади петель гистерезиса. Верхняя точка петли находится на кривой намагничивания.

ЗАДАНИЕ.

1. Вычислите величину коэрцитивной силы материала сердечника.
2. Вычислите максимальную магнитную индукцию B_m .

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

1. Включите в сеть осциллограф и стенд.
2. Подключите гнезда «ОСЦ X» и «ОСЦ Y» стенда к соответствующим входам осциллографа (находятся на правой и левой стенке осциллографа соответственно).
3. Наблюдайте на экране петлю гистерезиса, размер петли можно регулировать с помощью ручки «V/ДЕЛ». Вращая ручку ЛАТРА, создайте в веществе максимальную индукцию B_m (см. рис. 4).
4. Вычисление максимальной индукции B_m :
 - а) измерьте число делений k_1 , занимаемых отрезком от B_m до $-B_m$;

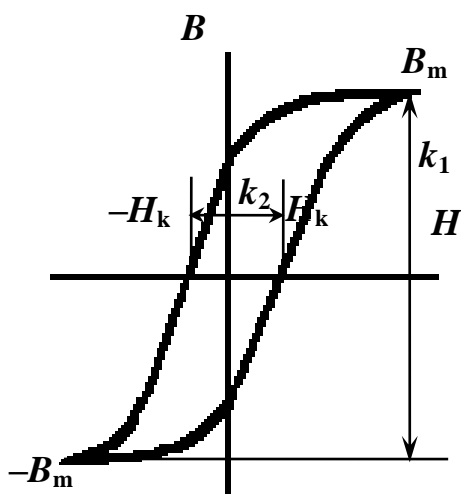


Рис.4

- б) амплитуда напряжения U_y равна произведению $k_1/2$ на показание ручки V/ДЕЛ;
- в) используя формулу (2), рассчитайте величину B_m при $N_2 = 300$ вит., $S = 0,84$ см², $C = 10$ мкф, $R_2 = 10$ кОм.

5. Вычисление коэрцитивной силы:

- а) измерьте число делений k_2 , занимаемых отрезком от $-H_k$ до H_k ;
- б) амплитуда напряжения U_x равна произведению $k_2/2$ на цену деления по оси X (0,45 V/ДЕЛ);
- в) используя формулу (1), рассчитайте величину H_k при $R_1 = 15$ Ом; $n_1 = 1000$ 1/м; $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$ Гн/м.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Что такое магнитный момент? Из каких величин складывается магнитный момент атомов?
2. Что называется индукцией и напряженностью магнитного поля?
3. Что называется магнитной проницаемостью вещества? Чему она равна для диа-, пара- и ферромагнетиков?
4. Дайте характеристику диа-, пара- и ферромагнетиков. Что такое домены?
5. Что называется точкой Кюри?
6. Что такое гистерезис, коэрцитивная сила и остаточная намагниченность?
7. Что характеризует собой площадь петли гистерезиса?
8. Почему на экране осциллографа наблюдается петля гистерезиса?

Методические указания к лабораторным работам по физике
для бакалавров всех направлений подготовки

Лабораторная работа № 34

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Составитель: Фурер Виктор Львович

Редактор Л.З. Ханафиева

Издательство

Казанского государственного архитектурно-строительного университета

Подписано в печать 05.10.16

Формат 60-84/16

Заказ № 281

Печать ризографическая

Усл.-печ. л. 0,7 Тираж

50 экз.

Бумага офсетная № 1

Уч. - изд. л. 0,7

Отпечатано в полиграфическом секторе

Издательство КГАСУ

420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1
