

045
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С. П. КОРОЛЕВА

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ № 2—12, 2—13, 2—22, 2—23

КУЙБЫШЕВ 1980

Лабораторные работы содержат: краткое введение, знакомящее студентов с магнитными свойствами диа-, пара- и ферромагнетиков; описание экспериментальной установки; порядок выполнения практической части работы, включая обработку полученных результатов; контрольные вопросы и перечень рекомендуемой литературы. Использована следующая нумерация работ: первая цифра—2—шифр лаборатории электричества и магнетизма, присятой на кафедре, второе число — порядковый номер работы, в соответствии с которым пронумерованы все применяемые приборы и принадлежности в лаборатории.

Лабораторные работы выполняются студентами всех факультетов дневного и вечернего отделений

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ

обозначенного здесь срока

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ ФЕРРОМАГНЕТИКА

Цель работы: нахождение зависимости тока во вторичной обмотке трансформатора от температуры и определение точки Кюри для материала сердечника трансформатора.

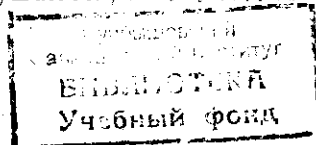
Приборы и принадлежности: термостат с исследуемым образцом, милливольтметр, миллиамперметр.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Особым видом магнетиков являются ферромагнетики, намагниченность которых даже в слабых полях примерно в 10^8 — 10^{10} раз превышает намагниченность типичных парамагнетиков. Кроме того, отличительным признаком ферромагнетиков является сохранение некоторой намагниченности и после прекращения действия внешнего поля. Типичными ферромагнетиками являются железо, кобальт, никель.

Отмеченные характерные свойства ферромагнетиков объясняются своеобразной микроструктурой ферромагнитных тел. Теория и эксперимент показывают, что объем ферромагнитного тела состоит из малых областей, называемых доменами, которые намагничены до насыщения, т. е. в пределах домена магнитные моменты всех атомов установлены в одном направлении. Однако магнитные моменты доменов относительно друг друга ориентированы хаотично, так что суммарный магнитный момент ферромагнитного тела оказывается равным нулю. Причиной полного намагничивания отдельного домена является действие обменных сил, которые не имеют аналога в классической физике и природа которых объясняется лишь законами квантовой механики.

Ферромагнетики сохраняют свои свойства лишь до определенной для каждого вещества температуры, называемой точкой Кюри. Вблизи точки Кюри энергия теплового движения молекул становится близкой к энергии взаимодействия электронов, и обменные силы уже не могут сохранить ориентацию магнитных моментов в пределах каждого домена. Поэтому домены разрушаются, и тело становится парамагнитным.



Для различных ферромагнетиков точка Кюри различная. Например, для никеля $T_k = 633$ К, для кобальта — около 1400 К, для железа $T_k = 1048$ К.

Особое место среди ферромагнетиков занимают ферриты, нашедшие широкое применение в науке и технике. Ферриты обладают очень высоким удельным сопротивлением порядка $10^2 - 10^4$ Ом·м. Благодаря этому в них малы потери на вихревые токи (токи Фуко), что позволяет использовать их в технике высоких и сверхвысоких частот. Точка Кюри ферритов 450—600 К.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В термостате, установленном на электрическом нагревателе, находится трансформатор, сердечник которого изготовлен из феррита (рис. 1). На внешней поверхности термостата находятся клеммы, к которым подключены выводы от первичной и вторичной обмоток трансформатора.

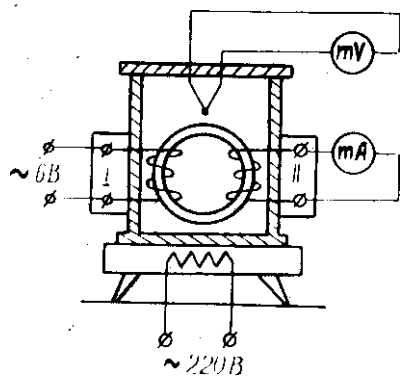


Рис. 1

Температура в термостате может быть определена с помощью термопары, соединенной с милливольтметром.

При нагревании ферритового сердечника трансформатора до точки Кюри происходит резкое изменение магнитных свойств сердечника, относительная магнитная проницаемость μ снижается

в несколько сот раз, поэтому э. д. с. во вторичной обмотке и, следовательно, ток, уменьшаются практически до нуля.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать установку согласно схеме, изображенной на рис. 1.

2. Включить питание установки. В процессе нагревания трансформатора следует записывать в таблицу значения силы

тока во вторичной обмотке I_2 и показания милливольтметра U_t , соединенного с термопарой. Измерения необходимо проводить более часто при температуре, близкой к точке Кюри, когда сила тока во вторичной обмотке быстро уменьшается.

3. После того как ток во вторичной обмотке станет равным нулю, следует выключить питание термостата. В процессе охлаждения трансформатора записывать значение силы тока и показания милливольтметра.

Наличие двух серий экспериментальных точек, полученных при нагревании и последующем охлаждении трансформатора, позволяет учесть гистерезис установки, т. е. запаздывание процессов фазового перехода в феррите по отношению к температуре. Это запаздывание объясняется конечной скоростью нагрева (охлаждения) сердечника трансформатора.

Нагревание			Охлаждение		
I_2 мкА	U_t мВ	t °С	I_2 мкА	U_t мВ	t °С

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Зависимости тока во вторичной обмотке трансформатора от температуры при охлаждении и нагревании изображают графически на миллиметровой бумаге. В данной работе температура в термостате определяется с помощью термопары. Для перехода от показаний прибора, соединенного с термопарой, к температуре необходимо пользоваться тарировочным графиком, который имеется на установке. С помощью термопары определяется лишь разность между температурой в термостате и комнатной температурой, поэтому температура в термостате должна вычисляться по формуле

$$t = t_{\text{приб}} + t_{\text{комн}}$$

где $t_{\text{приб}}$ — температура, найденная по тарировочному графику и показаниям прибора U_t ; $t_{\text{комн}}$ — комнатная температура.

2. Точка Кюри определяется как среднее арифметическое температур, при которых наблюдается резкое изменение тока (рис. 2):

$$t_k = \frac{(t_k)_H + (t_k)_O}{2}.$$

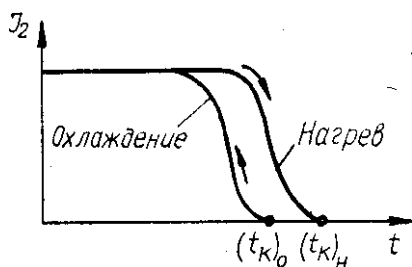


Рис. 2

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объясните физический смысл величины μ ?
2. Чем отличаются диамагнетики от парамагнетиков?
3. При каких условиях ферромагнетик переходит в парамагнетик? Как этот переход объясняется с точки зрения доменной теории?
4. Объясните необходимость двух серий экспериментальных точек — при нагреве и охлаждении образца?

ЛИТЕРАТУРА

Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1978, гл. 7, 8.

Лабораторная работа № 2—13

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ В ФЕРРОМАГНЕТИКЕ ОТ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Цель работы: произвести экспериментальное определение зависимости магнитной индукции ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля $B = f(H)$, после чего расчетным методом найти функцию $\mu = f(H)$.

Приборы и инструменты: исследуемый образец (тороид, изготовленный из железа «армко», с двумя обмотками); нормальная катушка; баллистический гальванометр; многопредельный амперметр; перекидные ключи.

ОПИСАНИЕ ИНДУКЦИОННО-ИМПУЛЬСНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА

Внесем в постоянное магнитное поле измерительную катушку, соединенную с баллистическим гальванометром. Если каким-либо образом изменить значение магнитного потока Ψ , сцепленного с катушкой, то в катушке возникнет э.д.с. индукции

$$E = - \frac{d\Psi}{dt},$$

и, следовательно, в цепи гальванометра появится ток

$$I = \frac{E}{R} = - \frac{1}{R} \frac{d\Psi}{dt}, \quad (1)$$

где R — сопротивление цепи: катушка—гальванометр.

С другой стороны, согласно определению,

$$I = \frac{dq}{dt}. \quad (2)$$

Приравнивая правые части соотношений (1) и (2) и интегрируя полученное выражение, находим, что при изменении магнитного потока, сцепленного с катушкой на $\Delta\Psi$, в цепи катушка—гальванометр возникает импульс тока, в результате которого через гальванометр пройдет количество электричества

$$q = \frac{\Delta\Psi}{R}. \quad (3)$$

В данном методе используется баллистический гальванометр, отличительной чертой которого является большой период собственных колебаний T . Обычно измерительная система выполняется таким образом, чтобы длительность импульса тока была много меньше периода собственных колебаний. В этом случае движение рамки гальванометра происходит уже после прохождения импульса тока, и, как показывает теория, максимальный угол поворота рамки гальванометра α оказы-

вается пропорциональным количеству электричества, прошедшему через рамку за время действия импульса:

$$\alpha = \frac{1}{C_q} q, \quad (4)$$

где C_q — баллистическая постоянная.

Объединяя формулы (3) и (4), получим следующее выражение:

$$\Delta\Psi = RC_q \alpha. \quad (5)$$

Изменение магнитного потока через измерительную катушку можно производить разными способами. Чаще всего производят быстрый поворот катушки на 180° вокруг оси, проходящей перпендикулярно геометрической оси катушки, либо меняют направление поля на обратное при неизменном абсолютном значении магнитного потока. В обоих случаях магнитный поток изменяется от $+\Psi$ до $-\Psi$, так что $\Delta\Psi = (+\Psi) - (-\Psi) = 2\Psi$, и тогда из формулы (5) следует основное выражение индукционно-импульсного метода

$$\Psi = \frac{RC_q}{2} \alpha. \quad (6)$$

Зная экспериментально найденные значения полного магнитного потока, можно найти расчетным путем соответствующие значения магнитной индукции поля.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Важнейшей характеристикой магнитного материала является кривая намагничивания, которая представляет собой зависимость $B = f(H)$, полученную на предварительно намагниченном образце при монотонном увеличении напряженности магнитного поля. Основное требование, предъявляемое к установке для определения кривой $B = f(H)$, заключается в обеспечении однородной намагниченности образца. Это условие достаточно точно выполняется для образцов в виде тороида с небольшим отношением диаметра поперечного сечения к диаметру тороида по средней линии.

Обычно на тороидальный образец, изготовленный из испытуемого материала, наматываются две обмотки: намагничивающая и измерительная. Полный магнитный поток в торои-

де, создаваемый намагничивающей обмоткой, можно изменить путем перемены направления тока в намагничивающей обмотке на обратное. (Процесс переключения тока принято называть коммутацией. Этот термин и будет употребляться в дальнейшем). Выход измерительной обмотки присоединен к баллистическому гальванометру. Таким образом, основой экспериментального определения кривой намагничивания является индукционно-импульсный метод.

Для нахождения магнитной индукции в образце воспользуемся определяющей формулой для полного магнитного потока через измерительную обмотку:

$$\Psi = \vec{B} \vec{n} S_T N_T, \quad (7)$$

где S_T — площадь, охватываемая одним витком, N_T — число витков в обмотке, \vec{n} — единичный вектор нормали к плоскости витка.

Учитывая, что в тороиде $\vec{B} \parallel \vec{n}$, т. е. $\vec{B} \vec{n} = B$, и подставляя формулу (7) в основное выражение (6) индукционно-импульсного метода, получим

$$B = \frac{RC_q}{2S_T N_T} \alpha. \quad (8)$$

Баллистическая постоянная C_q и сопротивление измерительной цепи R обычно неизвестны. Для их нахождения используется длинный прямой соленоид, называемый нормальной катушкой, на которой намотана измерительная обмотка. Если вместо тороида в цепь гальванометра включить нормальную катушку и производить коммутацию тока в ней, то баллистический гальванометр даст некоторое показание β . Магнитная индукция в нормальной катушке определяется, как и для тороида, формулой (8):

$$B_n = \frac{RC_q}{2S_n N_n} \beta, \quad (9)$$

где S_n — площадь, охватываемая одним витком нормальной катушки, N_n — число витков в измерительной обмотке. С другой стороны, магнитную индукцию в нормальной катушке можно найти с достаточной точностью по формуле для бесконечно длинного соленоида:

$$B_n = \mu_0 n_n I_n, \quad (10)$$

где n_n — число витков на единицу длины нормальной катушки, I_n — сила тока в нормальной катушке, при которой получено показание гальванометра β .

Из формул (9) и (10) можно найти

$$RC_q = 2 \mu_0 n_n S_n N_n \frac{I_n}{\beta}.$$

Подставив найденное выражение RC_q в формулу (8), получим окончательную формулу

$$B = \frac{\mu_0 n_n S_n N_n I_n}{S_T N_T} \frac{I_n}{\beta} \alpha. \quad (11)$$

Следует обратить внимание, что формула (11) справедлива при неизменном сопротивлении измерительной цепи, что достигается определенной схемой включения измерительных обмоток тороида и нормальной катушки (см. ниже).

Напряженность поля в тороиде находится расчетным путем:

$$H = n_T I_T, \quad (12)$$

где n_T — число витков на единицу длины средней линии тороида; I_T — сила тока в намагничивающей обмотке тороида.

Значение относительной магнитной проницаемости μ определяется по формуле

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (13)$$

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему установки согласно рис. 3.

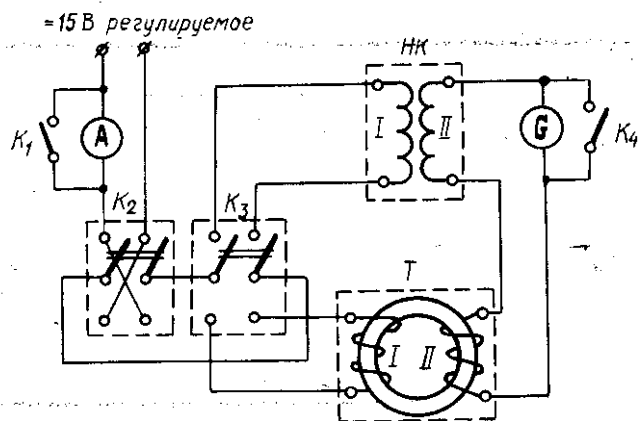


Рис. 3

Напряжение на установку подается от стабилизированного источника питания, выходные клеммы которого находятся на наклонной панели лабораторного стола и снабжены надписью «15 В регулируемое». Здесь же расположена ручка регулировки этого напряжения. Напряжение будет минимальным, если ручка регулировки находится в крайнем левом положении.

Особенностью данной схемы является последовательное включение измерительных обмоток тороида и нормальной катушки в цепь гальванометра, что обеспечивает постоянство сопротивления измерительной цепи при всех измерениях.

Обозначения на схеме: А — многопредельный амперметр; K_1 — ключ шунтирования амперметра; K_2 — ключ коммутации тока в намагничивающих обмотках; K_3 — перекидной ключ для подключения к цепи постоянного тока либо тороида, либо нормальной катушки; K_4 — тумблер, предназначенный для успокоения колебаний гальванометра после проведения измерения (он расположен на клеммной коробке гальванометра); НК — нормальная катушка (I — намагничивающая обмотка, II — измерительная обмотка); Т — тороид (I — намагничивающая обмотка, II — измерительная обмотка); G — гальванометр.

2. Поставить перекидной ключ K_3 в положение Т (на тороид). Включить освещение гальванометра тумблером на щитке лабораторного стола.

Если в экспериментальной установке применен настольный гальванометр типа М195, то после проверки схемы необходимо поставить ручку входного делителя гальванометра в положение «×1».

3. Провести размагничивание тороида, необходимое для устранения предыдущего остаточного магнетизма. Для этого нужно:

- а) поставить переключатель диапазона измерения тока амперметром на максимальный предел;
- б) зашунтировать амперметр ключом K_1 ;
- в) зашунтировать гальванометр тумблером K_4 , поставив его в положение «выкл»;
- г) установить ручку регулировки напряжения питания в крайнее правое положение;

- д) включить тумблер постоянного тока на щитке лабораторного стола и, производя быструю и непрерывную коммутацию тока ключом K_2 , одновременно плавно снижать величину

ну тока путем постепенного поворота ручки регулировки напряжения питания в крайнее левое положение.

4. Перекинуть ключ K_1 , защищавший амперметр при разматывании. Включить гальванометр ключом K_4 .

5. Установить наименьшее значение тока в намагничивающей обмотке тороида из рекомендуемого ряда значений, который приведен в таблице, прилагаемой к каждой установке.

Перед экспериментом следует ознакомиться со шкалой и пределами измерения амперметра, которые могут быть установлены от 0,015 до 30 А переключателем на приборе. Пределы измерения должны выбираться так, чтобы измерения проводились в правой части шкалы. При этом нужно не допускать зашкаливания прибора и своевременно переходить на новый предел измерения.

Значение силы тока можно определить по формуле

$$I = \frac{Nn}{150}, \quad (14)$$

где N — предел измерения (отсчитывается по переключателю прибора); n — отсчет по прибору (в делениях шкалы).

Для удобства проведения измерений можно предварительно составить таблицу используемых значений силы тока, выбрав пределы измерения для каждого значения, и, используя формулу (14), рассчитать число делений по шкале амперметра:

$$n = \frac{150 I}{N}.$$

6. Быстро перекинуть ключ K_2 и заметить значение отброса указателя гальванометра α_1 , после чего успокоить колебания тумблером K_4 . Затем быстро перекинуть ключ K_2 в обратную сторону и заметить новое значение отброса указателя гальванометра α_2 .

7. Повторить операции, указанные в п. 6, еще один раз при установленном значении силы тока.

8. Плавнo повысить силу тока и снова выполнить измерения, описанные в п. 6 и 7. Измерения следует производить до тех пор, пока не будут получены данные для всех рекомендуемых значений тока.

9. После проведения всех измерений с тороидом следует приступить к калибровке установки с помощью нормальной катушки. Для этого ключ K_3 переключается в положение НК (на нормальную катушку). Ручка регулировки напряжения

питания устанавливается в крайнее левое положение. Измерения производятся аналогично предыдущим, т. е. согласно п. 6, 7, 8.

Рекомендуемые значения тока в нормальной катушке приведены в таблице, которая прилагается к установке.

10. Результаты измерений записать в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Тороид ($N_T = \dots, n_T = \dots, S_T = \dots$)

I_T А	Показания гальванометра					H А/м	В Т	μ
	α_1	α_2	α_3	α_4	$\alpha_{ср}$			

Таблица 2

Нормальная катушка ($N_H = \dots, n_H = \dots, S_H = \dots$)

I_H А	Показания гальванометра					$\frac{I_H}{\beta_{ср}}$
	β_1	β_2	β_3	β_4	$\beta_{ср}$	

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным табл. 2 рассчитать значения $\frac{I_H}{\beta_{ср}}$ для каждого измерения с нормальной катушкой. Определить среднее значение $\left(\frac{I_H}{\beta_{ср}}\right)_{ср}$.

2. По данным табл. 1 для каждого значения I_T рассчитать:

а) напряженность магнитного поля в тороиде [формула (12)];

- б) магнитную индукцию поля [формула (11)];
 в) относительную магнитную проницаемость [формула (13)].

Для проведения расчетов магнитной индукции формулу (11) удобно представить в следующем виде:

$$B' = k \alpha,$$

где

$$k = \frac{\mu_0 n_n S_n N_n}{S_T N_T} \left(\frac{I_n}{\mu_{cp}} \right)_{cp}$$

Рекомендуется вначале найти численное значение коэффициента k , пользуясь данными установки и экспериментальным значением $\left(\frac{I_n}{\mu_{cp}} \right)_{cp}$, а затем рассчитать магнитную индукцию в тороиде для каждого измерения.

3. Построить графики зависимостей $B = f(H)$ и $\mu = f(H)$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Выведите основное уравнение индукционно-импульсного метода измерения магнитного потока.
2. Опишите метод определения кривой намагничивания и магнитных характеристик ферромагнетика.
3. При каких условиях имеет место однородная намагниченность магнетиков.
4. Для какой цели используется нормальная катушка, и что она собой представляет?
5. Объясните полученные графические зависимости с точки зрения доменной теории ферромагнетиков.

ЛИТЕРАТУРА

Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1978, гл. 7, 8.

Лабораторная работа № 2—22

ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ДИА- И ПАРАМАГНЕТИКОВ

Цель работы: определение зависимости силы, действующей на образец магнетика, от напряженности магнитного поля. Расчет значения магнитной восприимчивости.

Приборы и принадлежности: аналитические весы с разновесами, электромагнит, источник постоянного тока, амперметр постоянного тока, набор образцов.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Любое вещество, помещенное в магнитное поле, намагничивается, т. е. приобретает способность возбуждать магнитное поле. В основе теории магнитных свойств веществ лежит представление о взаимодействии орбитальных и спиновых магнитных моментов электронов, из которых складываются магнитные моменты молекул, с внешним магнитным полем.

Движение электрона по орбите вокруг ядра атома можно представить как круговой ток, характеризуемый некоторым магнитным моментом. Сумма всех магнитных моментов электронов молекулы образует магнитный момент молекулы, который в частном случае может быть равен нулю. При внесении магнетика в магнитное поле наблюдается *прецессия* электронных орбит, поскольку электрон, движущийся по орбите обладает наряду с магнитным также и механическим моментом, т. е. он в механическом отношении оказывается подобен гироскопу. Прецессия приводит к образованию *индуцированного магнитного момента*, направленного *против внешнего поля*. Это явление носит название *диамагнитного эффекта*. Таким образом, *непосредственное* действие внешнего поля на магнетик сводится к *диамагнитному эффекту*.

Однако тепловое движение молекул магнетика, сопровождающееся соударениями между собой, приводит к преимущественной ориентации магнитных моментов молекул *по направлению поля*, поскольку при этом энергия магнетика будет меньше, чем при равномерном распределении магнитных моментов по направлениям. Это явление называется *парамагнитным эффектом*. В зависимости от преобладания того или иного эффекта магнетика можно разделить на следующие группы:

Диамагнетики. Магнитный момент молекул диамагнетика равен нулю. В магнитном поле диамагнетики слабо намагничиваются *против поля*.

Парамагнетики. Магнитный момент молекул парамагнетиков не равен нулю. Определяющим в процессе намагничивания является парамагнитный эффект, т. е. слабое намагничивание *по направлению поля*.

Характеристикой намагничивания вещества является вектор намагничивания \vec{I} , который определяется как векторная сумма магнитных моментов молекул в единице объема:

$$\vec{I} = \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V},$$

где \vec{p}_m — магнитный момент отдельной молекулы, ΔV — физически бесконечно малый объем, взятый в окрестности рассматриваемой точки.

В слабых магнитных полях как для диамагнетиков, так и для парамагнетиков характерным является линейная зависимость вектора намагничивания от напряженности магнитного поля в магнетике, т. е.

$$\vec{I} = \chi \vec{H}, \quad (15)$$

где величина χ , зависящая от физико-химических свойств магнетика, называется магнитной восприимчивостью. Для диамагнетиков $\chi < 0$, для парамагнетиков $\chi > 0$, а численное значение χ порядка 10^{-6} .

Вектор намагничивания \vec{I} позволяет определить магнитную индукцию \vec{B}' поля, созданного за счет диа- либо парамагнитного эффекта. Расчеты показывают, что для однородного и безгранично протяженного магнетика или для случая, когда магнетик занимает объем, ограниченный силовыми линиями,

$$\vec{B}' = \mu_0 \vec{I}.$$

Тогда результирующее поле в магнетике может быть представлено, согласно принципу суперпозиции, как сумма внешнего намагничивающего поля \vec{B}_0 и поля \vec{B}' :

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'.$$

Определяющим соотношением для напряженности поля в магнетике является

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{I}. \quad (16)$$

Именно это значение \vec{H} входит в формулу (15). Подставляя в соотношение (16) величину $\vec{I} = \chi \vec{H}$ и производя преобразования, получим

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \mu_0 \mu \vec{H}, \quad (17)$$

где $\mu = 1 + \chi$ — относительная магнитная проницаемость магнетика.

Если образец однородного магнетика занимает область, ограниченную силовыми магнитными линиями (например, сердечник тороидальной катушки), то напряженность поля в таком магнетике \vec{H} и напряженность намагничивающего поля \vec{H}_0 одинаковы. Поэтому формула (17) может быть записана в виде

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H} = \mu_0 \mu \vec{H}_0 = \mu \vec{B}_0,$$

откуда

$$\mu = \frac{B}{B_0}. \quad (18)$$

Таким образом, относительная магнитная проницаемость показывает, во сколько раз магнитная индукция в магнетике больше магнитной индукции намагничивающего поля (при соблюдении указанных выше условий).

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

Магнитную проницаемость веществ можно определить по силам, действующим на образец, помещенный в неоднородное магнитное поле. На рис. 4 изображен длинный образец, один конец которого расположен в зазоре между полюсами магнита, а другой выходит из области магнитного поля. Магнитная энергия W такой системы

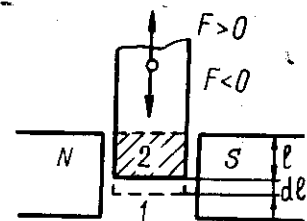


Рис. 4

$$W = \int_1 \frac{\mu_0 \mu_a}{2} H^2 dv + \int_2 \frac{\mu_0 \mu}{2} H^2 dv,$$

где интеграл 1 распространен на область, расположенную вне образца, а интеграл 2 — на область, занятую образцом, μ_a и μ — относительные магнитные проницаемости воздуха и образца.

При смещении образца (например, на dl вниз) энергия будет равна W' :

$$W' = \int_{-1'}^{\mu_0 \mu_B} \frac{\mu_0 \mu_B}{2} H^2 dv + \int_{2'}^{\mu_0 \mu} \frac{\mu_0 \mu}{2} H^2 dv.$$

Интегралы 1' и 2' распространены на области, соответствующие новому положению образца. Из рис. 4 видно, что при смещении на dl первая область уменьшается на Sdl (S — сечение образца), а вторая область увеличивается на ту же величину.

Имеем поэтому

$$\begin{aligned} W' - W &= -\frac{\mu_0 \mu_B}{2} H^2 Sdl + \frac{\mu_0 \mu}{2} H^2 Sdl = \\ &= \frac{\mu_0 (\mu - \mu_B)}{2} H^2 Sdl \approx \frac{\mu_0 (\mu - 1)}{2} H^2 Sdl. \end{aligned} \quad (19)$$

В формуле (19) принимаем $\mu_B = 1$; H — напряженность магнитного поля у конца образца.

Сила, действующая на образец, равна производной от энергии по перемещению:

$$F = -\frac{dW}{dl} = -\frac{\mu_0 (\mu - 1)}{2} H^2 S = -\frac{\mu_0 \chi H^2 S}{2}, \quad (20)$$

где $\chi = \mu - 1$ — магнитная восприимчивость.

Для диамагнетиков $\chi < 0$, поэтому $F > 0$, т. е. образец диамагнетика будет *выталкиваться* из области сильного магнитного поля. Для парамагнетиков $\chi > 0$, $F < 0$, т. е. образец парамагнетика будет *втягиваться* в область сильного магнитного поля (рис. 4).

Следует отметить, что вывод формулы (20) является приближенным.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему установки согласно рис. 5.

Весы, используемые в установке, имеют шкалу со световым отсчетом. Включение освещения шкалы производится одновременно с поворотом ручки арретирования, которая установлена в нижней части корпуса весов.

2. Арретировать весы. Осторожно подвесить образец магнетика на крючок, соединенный с левым плечом коромысла весов. Установить магнит так, чтобы образец находился в се-

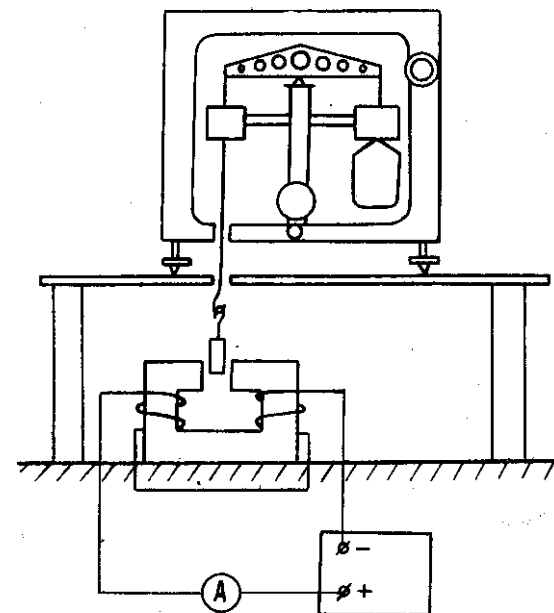


Рис. 5

редине зазора между полюсами магнита, не касаясь его поверхности.

3. Произвести уравновешивание образца с помощью разновесов. Сотни и десятки миллиграмм устанавливаются на правое плечо коромысла весов с помощью манипулятора, расположенного в правом верхнем углу передней стенки корпуса весов. Единицы миллиграмм определяются по шкале со световым отсчетом с учетом знака: слева от отметки «0» значения берутся со знаком «+», справа — со знаком «-».

Записать в таблицу значение нагрузки на правое плечо коромысла весов n_0 , найденное при отсутствии действия магнитного поля на образец.

4. Включить питание электромагнита и установить некоторый ток, при котором нагрузка на образец изменяется примерно на 2—3 миллиграмма (движение стрелки весов можно наблюдать по шкале со световым отсчетом). Записать новое значение нагрузки n_1 .

5. Увеличить ток и найти новое значение нагрузки. Записать полученные результаты в таблицу.

Измерение следует производить до максимально возможного тока.

6. Арретировать весы. Снизить ток до минимального значения и отключить питание. Снять образец с крючка, снять разновесы с правой чашки весов.

7. Провести измерение с другим образцом, выполняя п. 2—6. Результаты наблюдений занести в таблицу.

№ измер.	Материал образца	I А	H А/м	H^2	n_0 г	n_1 г	F Н	χ

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По графику зависимости напряженности магнитного поля от силы тока определить соответствующие значения H . Вычислить H^2 .

2. Рассчитать значения сил, действующих на образцы для каждого наблюдения, по формуле

$$F = n_0 - n_1.$$

Направления сил, принятые в данном задании, и соответствующие знаки указаны на рис. 4.

Следует иметь в виду, что значения силы F должны быть выражены в ньютонах.

3. Подготовить поле графика с координатами: по оси x — значения H^2 , по оси y — значения F . Нанести экспериментальные точки. Построить график $F = f(H^2)$, который должен представлять прямую линию, проходящую через начало координат.

4. Найти значение магнитной восприимчивости χ по формуле

$$\chi = - \frac{2}{\mu_0 S} \frac{F}{H^2},$$

которая следует из выражения (20). Необходимое для расчета значение величины F/H^2 определяется из построенного

графика как тангенс угла наклона к оси x (с учетом масштаба по осям).

5. Определить χ для второго образца в соответствии с п. 1—4 данного раздела задания.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Выведите формулу, которая определяет силу, действующую на образец магнетика в области полюсов магнита.
2. Каковы характерные свойства диамагнетиков и парамагнетиков?
3. Дайте определение величины χ . Как она связана с магнитной проницаемостью μ ?
4. Опишите порядок обработки результатов измерений.

ЛИТЕРАТУРА

Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1978, гл. 7, 8.

Лабораторная работа № 2—23

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ФЕРРИТОВ В ДИНАМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель работы: наблюдение петли гистерезиса, нахождение кривой намагничивания и зависимости относительной магнитной проницаемости от напряженности намагничивающего поля.

Приборы и инструменты: панель, на которой укреплены: ферритовое кольцо с обмотками, конденсатор и два резистора; звуковой генератор (ЗГ); осциллограф.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Особым видом магнетиков являются ферромагнетики, намагниченность которых даже в слабых полях примерно в 10^8 — 10^{10} раз превышает намагниченность типичных парамаг-

нетиков. Кроме того, отличительным признаком ферромагнетиков является сохранение некоторой намагниченности и после прекращения действия внешнего поля. Типичными ферромагнетиками являются железо, кобальт, никель.

Отмеченные характерные свойства ферромагнетиков объясняются своеобразной микроструктурой ферромагнитных тел. Теория и эксперимент показывают, что объем ферромагнитного тела состоит из малых областей, называемых доменами, которые намагничены до насыщения, т. е. в пределах домена магнитные моменты всех атомов установлены в одном направлении. Однако магнитные моменты доменов относительно друг друга ориентированы хаотично, так что суммарный магнитный момент ферромагнитного тела оказывается равным нулю. Причиной полного намагничивания отдельного домена является действие обменных сил, которые не имеют аналога в классической физике и природа которых объясняется лишь законами квантовой механики. Относительная магнитная проницаемость ферромагнетиков оказывается сложной функцией индукции намагничивающего поля B_0 либо напряженности магнитного поля. Обычно эта функция определяется экспериментально для каждого конкретного вида ферромагнетика. Типичная зависимость $\mu = f(B_0)$ представлена на рис. 6. Эту функцию можно найти, если иметь кривую намагничивания, т. е. зависимость $B = f(H_0)$. При определении кривой намагничивания следует учитывать явление магнитного гистерезиса.

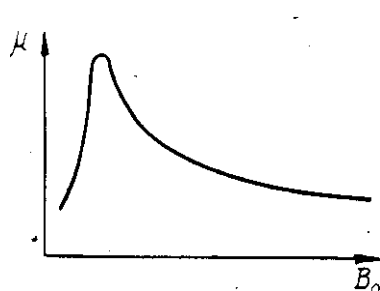


Рис. 6

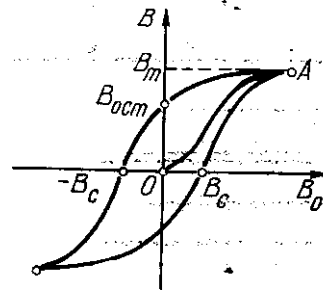


Рис. 7

Магнитным гистерезисом называется запаздывание изменения магнитной индукции B в ферромагнетике по отношению к изменению магнитной индукции намагничивающего поля B_0 . Это явление объясняется доменной структурой ферромагнети-

ка. Так, если ненамагниченный ферромагнетик поместить в поле, индукция которого возрастает, начиная с нуля, то зависимость B от B_0 выразится кривой намагничивания OA (рис. 7). В процессе намагничивания ферромагнетика происходит рост доменов, магнитные моменты которых имеют меньший угол с вектором B_0 . В сильных полях магнитные моменты доменов ориентируются по полю, и в точке A наступает насыщение — магнитный момент ферромагнетика достигает максимума. Дальнейшее увеличение магнитной индукции внешнего поля вызовет лишь незначительное линейное увеличение магнитной индукции в ферромагнетике. Величина B_m называется индукцией насыщения.

При уменьшении индукции намагничивающего поля B_0 , как показывает опыт, магнитная индукция B в ферромагнетике изменяется по кривой, лежащей выше кривой намагничивания OA . При $B_0 = 0$ индукция магнитного поля в ферромагнетике отлична от нуля, т. е. наблюдается остаточная намагниченность $B_{ост}$. Она обусловлена тем, что после прекращения действия внешнего магнитного поля у части доменов сохраняется преимущественная ориентация их магнитных моментов.

Чтобы полностью размагнитить ферромагнетик, следует создать в нем магнитное поле противоположного направления с индукцией B_c . Величина B_c называется коэрцитивной (задерживающей) силой. Коэрцитивная сила характеризует свойство ферромагнетика сохранять намагниченность после прекращения действия намагничивающего поля и, наряду с магнитной проницаемостью, определяет область практического применения ферромагнетика.

При дальнейшем увеличении магнитного поля B_0 (в направлении, противоположном первоначальному) намагниченность ферромагнетика снова достигает насыщения B_m . Возвращаясь постепенно к индукции $(B_0)_A$, получим замкнутую кривую, которая называется петлей гистерезиса. Материалы, имеющие широкую петлю (коэрцитивная сила велика), называются «твердыми» магнитными материалами. К ним относятся, например, углеродистые стали. Материалы с малой коэрцитивной силой называются «мягкими» магнитными материалами. К ним относятся, например, чистое железо, сплавы железа с никелем.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ
ДИНАМИЧЕСКИХ ПЕТЕЛЬ ГИСТЕРЕЗИСА

На рис. 8 показана схема экспериментальной установки. Переменный ток, проходя по первичной обмотке феррито-

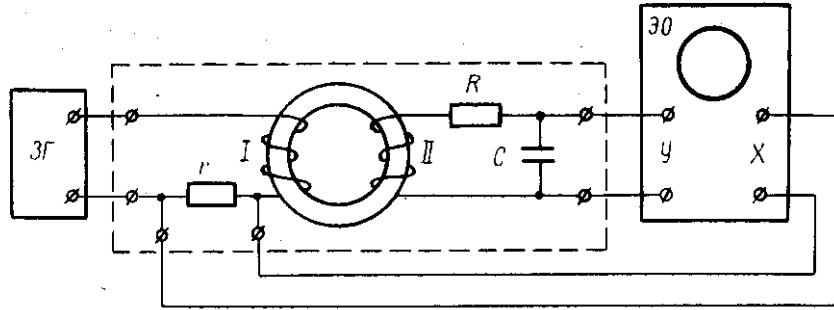


Рис. 8

вого кольца, создает в феррите намагничивающее поле, амплитуда которого определяется формулой

$$B_0 = \mu_0 n_1 I_{1m},$$

где μ_0 — магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);

n_1 — число витков на единицу длины первичной обмотки;

I_{1m} — амплитудное значение тока в обмотке.

Падение напряжения на резисторе r , подаваемое на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа (ЭО),

$$U_x = I_{1m} r = \frac{r}{\mu_0 n_1} B_0,$$

т. е. U_x пропорционально B_0 .

Во вторичной обмотке образца переменный магнитный поток наводит э.д.с. индукции

$$E_i = - \frac{d\Psi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt},$$

где N_2 — число витков вторичной обмотки; S — площадь сечения образца; B — индукция в образце.

Под действием E_i в обмотке возникает ток. Если сопротивление резистора R намного больше емкостного сопротивления, а индуктивность вторичной обмотки мала, то можно считать, что э.д.с. E_i полностью расходуется на падение напряжения на резисторе R , т. е.

$$-N_2 S \frac{dB}{dt} = i_2 R,$$

откуда ток во вторичной обмотке

$$i_2 = - \frac{N_2 S}{R} \frac{dB}{dt} \quad (21)$$

Этот ток, проходя через конденсатор, создает на нем падение напряжения

$$U_c = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int i_2 dt.$$

Заменяя i_2 согласно выражению (21), найдем

$$U_c = \frac{N_2 S}{RC} \int \frac{dB}{dt} dt = \frac{N_2 S}{RC} B.$$

Таким образом, напряжение U_c , которое подается на вертикально отклоняющие пластины осциллографа, будет пропорционально индукции магнитного поля в образце.

Одновременное действие напряжения U_x и U_c приводит к тому, что электронный луч начинает описывать на экране осциллографа гистерезисный цикл за один период изменения тока в первичной обмотке. Если

изменять ток I_{1m} , то на экране осциллографа для каждого значения I_{1m} будет наблюдаться определенная петля гистерезиса. Геометрическое место вершин симметричных гистерезисных петель представляет собой кривую намагничивания $B = f(B_0)$ (рис. 9). Следовательно, для построения кривой намагничивания необходимо определить координаты

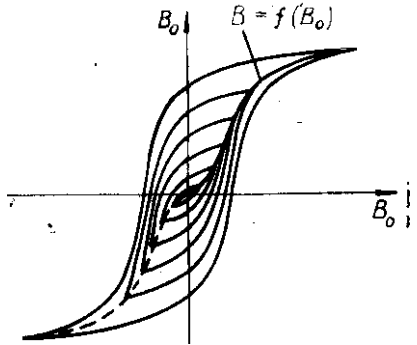


Рис. 9

n_x и n_y вершин петель гистерезиса при различных значениях тока в первичной обмотке. Соответствующие этим координатам значения индукции B_0 и B вычисляются по формулам:

$$B_0 = \frac{\mu_0 n_1}{r} U_x; \quad (22)$$

$$B = \frac{RC}{N_2 S} U_c. \quad (23)$$

Напряжения U_x и U_c можно определить, зная цену деления координатной сетки осциллографа по осям $x, y - i_x, i_y$ соответственно.

Тогда

$$U_x = j_x n_x, \quad U_c = j_y n_y,$$

и формулы (22) и (23) можно записать следующим образом:

$$B_0 = \frac{\mu_0 n_1}{r} j_x n_x = k_x n_x;$$

$$B = \frac{RC}{N_2 S} j_y n_y = k_y n_y,$$

где коэффициенты

$$k_x = \frac{\mu_0 n_1}{r} j_x, \quad (24)$$

$$k_y = \frac{RC}{N_2 S} j_y \quad (25)$$

определяются параметрами установки и настройкой осциллографа.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Собрать схему согласно рис. 8.
2. Подготовить осциллограф к измерениям. Для этого необходимо выключить генератор развертки и поставить ручки «УСИЛЕНИЕ X» и «УСИЛЕНИЕ Y» в нулевое положение. Включить осциллограф и вывести электронный луч в центр координатной сетки.
3. Включить звуковой генератор и установить рекомендуемое значение частоты выходного напряжения. С помощью ручек «АМПЛИТУДА ВЫХОДА» звукового генератора, «УСИЛЕНИЕ X» и «УСИЛЕНИЕ Y» осциллографа добиться, чтобы петля гистерезиса имела ярко выраженный участок насыщения и занимала возможно большую часть экрана осциллографа. В дальнейшем регулировка усиления по осям X и Y не должна изменяться.
4. Устанавливая некоторые значения выходного напряжения звукового генератора, наблюдать соответствующие петли гистерезиса. Для каждой петли определить координаты вершины n_x и n_y .

Измерения проводить до стягивания петли в точку.

Данные установки и результаты измерений записать в табл. 1, 2.

Значения j_x и j_y определяются по графикам, приложенным к осциллографу, с учетом выбранного усиления по осям X и Y.

Таблица 1

Данные установки

$n_1 \frac{\text{ВИТ}}{\text{М}}$	$r \text{ Ом}$	$i_x \frac{\text{В}}{\text{ММ}}$	$R \text{ Ом}$	$C \text{ Ф}$	$N_2 \text{ ВИТ}$	$S \text{ м}^2$	$j_y \frac{\text{В}}{\text{ММ}}$

Таблица 2

Результаты измерений

$N_2 \text{ п.п.}$	$n_x \text{ мм}$	$n_y \text{ мм}$	$k_x \frac{\text{Т}}{\text{ММ}}$	$k_y \frac{\text{Т}}{\text{ММ}}$	$B_0 \text{ Т}$	$B \text{ Т}$	μ

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Рассчитать значения k_x и k_y по формулам (24) и (25).
2. Вычислить B_0, B для каждого измерения.
3. Вычислить $\mu = \frac{B}{B_0}$ для каждого измерения.
4. Построить графики $B = f(B_0)$ и $\mu = f(B_0)$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как объясняется явление магнитного гистерезиса в ферромагнетике? Какой вид имеет петля гистерезиса? Укажите характерные точки петли и дайте их определение.

2. Покажите, что напряжение, подаваемое на пластины X осциллографа, пропорционально магнитной индукции намагничивающего поля B_0 , а напряжение, подаваемое на пластины Y , пропорционально магнитной индукции в образце B .

3. Объясните характер зависимостей $B = f(B_0)$ и $\varphi = f(B_0)$.

4. Дайте определение величины: относительная магнитная проницаемость магнетика.

ЛИТЕРАТУРА

Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. М.: Наука, 1978, гл. 7, 8.

Составители *Леонид Павлович Муркин,*
Лидия Федоровна Сарбатова

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Лабораторные работы № 2—12, 2—13, 2—22, 2—23

Редактор Т. К. Кретикина
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор Е. Антонова

Сдано в набор 23.08.80 г. Подписано в печать 27.09.80 г. Формат 60x84¹/₁₆.
Высокая печать. Литературная гарнитура. Бумага оберточная белая.
Усл. п. л. 1,6. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 2000 экз. Заказ № 879. Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени авиационный институт им. С. П. Королева, г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Типография УЭЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.