

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

4.1. Цель работы

Изучение магнитных свойств электротехнической стали, пермаллоя и феррита при помощи исследования петель гистерезиса и основной кривой намагничивания.

4.2. Теоретическая часть

Магнитными свойствами обладают все вещества в природе, но проявляются они различно, поэтому вещества делят на сильно магнитные и слабо магнитные (немагнитные). К первым относят железо, кобальт, никель, ряд сплавов и соединений и называют ферромагнетиками. Остальные относят к парамагнетикам и диамагнетикам.

Основанием для деления веществ послужило различие в их магнитной проницаемости μ , определяемой из соотношения

$$B = \mu H,$$

где B – магнитная индукция, а H – напряженность магнитного поля. Для ферромагнетиков μ значительно больше единицы, для парамагнетиков она немного больше единицы, а для диамагнетиков – немного меньше единицы.

Зависимость намагниченности I ферро-, пара- и диамагнетиков от напряженности поля представлена на рис. 3.1.

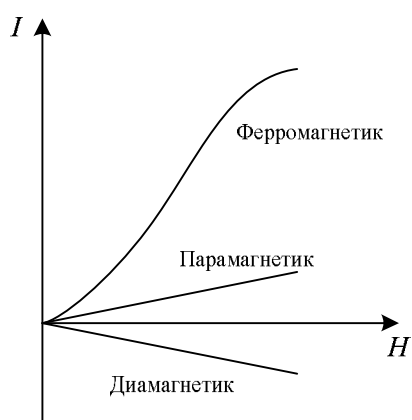


Рис. 3.1

У ферромагнетиков при увеличении напряженности внешнего поля намагниченность растет нелинейно, то есть их намагниченность I и проницаемость μ зависят от H сложным образом. У пара- и диамагнетиков и при весьма больших H рост намагниченности изображается прямой линией, т.е. их I и μ от H не зависят. У диамагнетиков намагниченность отрицательна, а это значит, что она направлена навстречу внешнему магнитному полю. Зависимость I и μ от H

напряженности магнитного поля для железа впервые исследовал профессор Московского университета А.Г. Столетов в 1872 году.

Магнитные свойства веществ определяются наличием или отсутствием в них магнитных моментов. Магнитный момент – это вектор, направленный от северного полюса контура с током или магнита. Он численно равен произведению величины тока на обтекаемую им площадь контура S . Во внешнем магнитном поле напряженностью H контур или магнит ориентируется так, чтобы направление магнитного момента M совпадало с направлением магнитного поля H .

Обращение электрона вокруг ядра атома представляет собой замкнутый ток и у него есть магнитный момент. Направление движения электронов противоположно току. Поэтому магнитный момент орбитального

тока $M_{орб}$ и механический момент количества движения электрона по орбите $N_{орб}$ направлены в противоположные стороны, как показано на рис. 3.2.

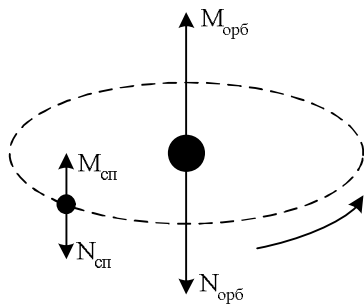


Рис. 3.2

Орбитальный момент электрона, находящегося на ближайшей к ядру атома орбите, имеет наименьшее возможное значение, называемое магнетоном Бора и равное

$$\frac{e\hbar}{2mc},$$

где e – заряд электрона, m – масса электрона, c – скорость света, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ (h – постоянная Планка).

Орбитальный магнитный момент электрона, находящегося на орбите с номером n , в n раз больше магнетона Бора. Аналогичным образом возрастает и его механический момент.

Из-за вращения электрона вокруг собственной оси он обладает спиновым магнитным моментом $M_{сп}$. На рис. 3.2 эти моменты показаны как параллельные орбитальным, хотя это и не всегда имеет место. Магнитный спиновый момент равен наименьшему орбитальному моменту – магнетону Бора. Механический спиновый момент вдвое меньше наименьшего механического орбитального момента. Магнитный момент атома составляет геометрическую сумму соответствующих орбитальных и спиновых моментов всех его электронов. Более того, орбитальный магнитный момент равен

$$M_{орб} = \frac{|e|\hbar^2}{4\pi m} \sqrt{l(l+1)},$$

где e , m – заряд и масса электрона, а l – орбитальное квантовое число.

Спиновый магнитный момент

$$M_{сп} = \frac{|e|\hbar}{2m} \cdot \frac{h}{2\pi} = 9,273 \cdot 10^{-24} \text{ Дж / мГ}$$

Магнитный момент атома может быть нулевым, либо отличаться от нуля. Когда магнитный момент атомов или молекул вещества отличается от нуля, это вещество называют парамагнетиком, а при нулевом моменте – диамагнетиком.

Атом парамагнетика можно рассматривать как маленький магнитик. Внешнее магнитное поле ориентирует каждый его атом так, чтобы его магнитный момент был направлен по силовым линиям магнитного поля. Индукция B в веществе увеличивается за счет намагниченности, создаваемой ориентированными атомами. Ориентация атомов парамагнетика будет далеко не полной. Намагниченность его разрушается тепловым движением, препятствующим ориентации магнитных моментов атомов.

У атомов диамагнетиков магнитный момент равен нулю, поэтому внешнее магнитное поле не может их ориентировать. Однако в магнитном поле диамагнетик немного намагничивается, но в противоположном полю направлении. Причина этого явления лежит в эффекте электромагнитной

индукции. При воздействии внешнего магнитного поля электрон на орбите ускоряется или тормозится. Это вызывает согласно правилу Ленца появление суммарной встречной намагниченности. Более строгая теория объясняет это явление прецессионным движением электронных орбит.

Ферромагнетизм возникает лишь в веществах, находящихся в кристаллическом состоянии. Отдельный атом ферромагнитного вещества ничем существенно не отличается от атома парамагнитного. Но в кристалле ферромагнетика возникает сильная спонтанная намагниченность, вызываемая тем, что в соседних атомах спиновые магнитные моменты электронов ориентируются параллельно друг другу. Кроме того, ферромагнитное состояние возникает в кристаллах, в которых атомы расположены в определенном порядке. Между соседними атомами возможен обмен электронами, попадающими в сферу действия то одного, то другого атома. Этот процесс вызван так называемыми “обменными силами” и они заставляют часть электронов в соседних атомах ферромагнетика ориентироваться так, что их спиновые моменты становятся параллельными друг другу. Это соответствует минимуму потенциальной энергии кристалла. В парамагнетиках параллельной ориентации моментов соседних атомов нет и появляется лишь небольшая составляющая магнитного момента в направлении поля. Поэтому их намагниченность значительно меньше, чем у ферромагнетиков.

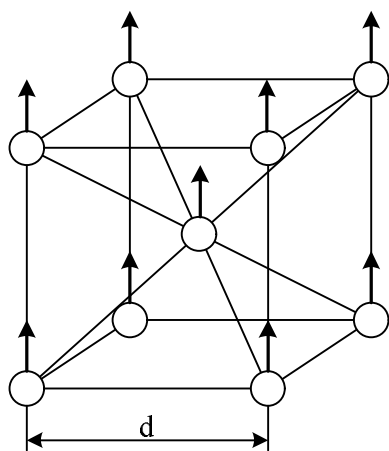


Рис. 3.3.

На рис.3.3 изображена элементарная ячейка кристалла железа. Ориентация спинов идет вдоль ребер куба, это направление легкого намагничивания. Всякому другому направлению ориентации спинов соответствует большая потенциальная энергия кристалла. Особенно велика эта энергия при их ориентации вдоль диагонали куба (направление трудного намагничивания). Диагонали граней куба называются направлениями среднего намагничивания.

Казалось бы, что любой ферромагнетик всегда должен быть намагничен до насыщения даже в отсутствии внешнего поля. Но это не так, кристалл разбивается на множество микрообъемов (порядка 10^{-7} см^3) – областей самопроизвольного намагничивания, или доменов. Домены намагничены до насыщения, но в разных направлениях и намагниченность соседних доменов взаимно компенсируется. В этом случае магнитный поток замыкается внутри образца и энергия его минимальна.

Ферромагнетизм существует лишь у нескольких элементов периодической системы Менделеева. Обменные силы ориентируют спины параллельно друг другу только в определенных случаях. Для ориентации требуется наличие нескомпенсированных спинов на недостроенных

внутренних электронных оболочках атомов. Электроны, как известно, располагаются вокруг ядра атома слоями или оболочками. В заполненной оболочке все электроны образуют пары с противоположно направленными спиновыми моментами (рис.3.4,а).

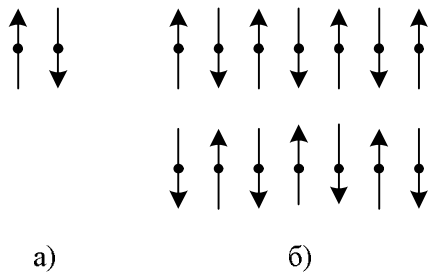


Рис.3.4

Такие связанные попарно электроны уже не могут принимать участие в образовании ферромагнитного состояния. Если же оболочка не заполнена целиком, то часть электронов остается с нескомпенсированными спиновыми моментами. Именно они являются источниками обменных сил, эти обменные силы могут ориентировать спины соседних атомов параллельно друг другу. У железа в оболочке 14 электронов, из них 9 имеют ориентацию спинов в одном направлении, а 5 – в противоположном. Следовательно, 4 спина остаются нескомпенсированными (рис. 3.4,б). Наличие последних на незаполненной внутренней оболочке еще не является достаточным условием для возникновения ферромагнетизма. Требуется выполнение еще одного условия: атомы в узлах кристаллической решетки должны быть расположены не очень близко один от другого. Отношение постоянной кристаллической решетки d (рис.3.3) к радиусу орбиты R , на которой находится электрон с нескомпенсированным спином, должно быть не меньше трех. Так, например, у хрома и марганца имеются соответственно 4 и 5 нескомпенсированных спинов на той же, что и у железа, оболочке, однако они оба не ферромагнитны, т.к. для их кристаллов второе условие не выполняется. Однако, ряд сплавов этих металлов с алюминием, медью ферромагнитны, так как атомы второй компоненты, внедряясь между атомами марганца и хрома, раздвигают их, постоянная решетки увеличивается и второе правило начинает выполняться.

Тепловое движение атомов препятствует параллельной ориентации спинов и при некоторой температуре, называемой точкой Кюри, они уже не могут оставаться ориентированными параллельно; при этом ферромагнетизм исчезает.

Одним из характерных свойств ферромагнитных материалов является нелинейность кривой намагничивания, т.е. зависимости намагниченности I от напряженности поля H . Физическая природа намагничивания на отдельных этапах процесса различна и условно поделена на 4 этапа.

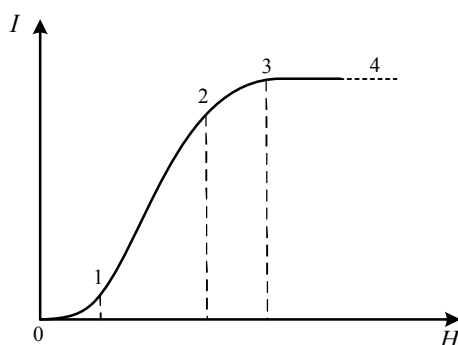


Рис. 3.5

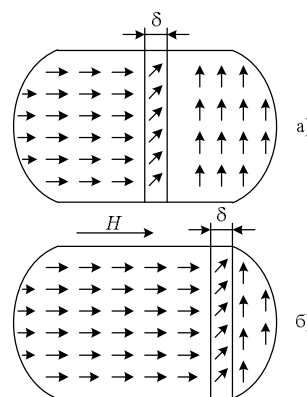


Рис. 3.6.

На участке 0–1 в слабых полях происходит лишь очень небольшое смещение границ между соседними доменами (рис.

3.5). Между доменами 1 и 2 имеется граничный слой шириной порядка 30 – 100 диаметров атомов. Ориентация спинов этого слоя постепенно меняется по мере приближения к границам доменов (рис. 3.6,а).

При наложении слабого магнитного поля спины в граничном слое меняют свою ориентацию, совпадая с направлением поля, или приближаясь к нему. Это приводит к смещению всего граничного слоя в направлении приложенного поля (рис.3.6,б), увеличению объема домена 1 с благоприятной ориентацией спинов и уменьшению объема домена 2 с неблагоприятной ориентацией. Этот процесс приводит к появлению небольшой намагниченности образца. Если магнитное поле снять, то образец возвращается в исходное состояние.

При дальнейшем увеличении напряженности приложенного поля (участок 1–2 кривой) начинаются скачкообразные необратимые смещения границ между доменами. Границы начинают двигаться с довольно большой скоростью, перемещаются в ряде случаев через весь домен и он целиком перемагничивается.

Наконец, намагниченность всего кристалла совпадает с направлением легкого намагничивания, которое является ближайшим к направлению внешнего поля. Теперь весь кристалл можно рассматривать как один домен. При дальнейшем увеличении напряженности поля начинается процесс поворотов спинов из направления легкого намагничивания в направление приложенного поля. Это процесс вращения, он отображен участком кривой 2–3. После его завершения наступает так называемое техническое насыщение образца, ему соответствует участок 3–4 кривой. Намагниченность меняется теперь мало – только за счет увеличения числа спинов, ориентирующихся параллельно. Данный процесс называют парапроцессом по аналогии с намагничиванием парамагнетиков

Особо оговорим важную деталь: обсуждавшиеся выше магнитные домены не есть кристаллики микроструктуры металла. Магнитные домены формируются независимо от микрокристаллической структуры ферромагнетиков,

Основные магнитные характеристики.

Магнитный момент тела M равен произведению намагниченности I на объем тела V :

$$M = I \cdot V$$

Способность вещества изменять свой магнитный момент под действием внешнего магнитного поля напряженностью H характеризуется магнитной восприимчивостью χ :

$$I = \chi \cdot H$$

Результирующее магнитное поле в веществе называют магнитной индукцией B . Она связана с напряженностью внешнего магнитного поля H и намагниченностью вещества I соотношением

$$B = H + 4\pi I$$

Способность вещества менять свою индукцию B при воздействии внешнего поля H характеризуется магнитной проницаемостью μ :

$$B = \mu \cdot H$$

Магнитная проницаемость связана с магнитной восприимчивостью соотношением

$$\mu = 4\pi\chi + 1$$

Размерности перечисленных характеристик следующие: B – Гс, H – Э, I – Гс, μ – Гс/Э, χ – Гс/Э.

А теперь вернемся к существу нашей работы.

Для изготовления сердечников трансформаторов катушек индуктивности и других электромагнитных устройств применяются сильномагнитные материалы ($\mu \gg 1$). Такими материалами являются ферромагнетики и ферриты, кривая намагничивания которых показана на рис.3.5. Из кривой намагничивания можно рассчитать и построить зависимость магнитной проницаемости от напряженности поля (рис. 3.7). Магнитная проницаемость, измеряемая в слабых полях (при $H \rightarrow 0$), называется начальной. Начальная магнитная проницаемость является важнейшей характеристикой магнитомягких материалов. При увеличении напряженности поля магнитная проницаемость сначала растет, что связано со сверхлинейной зависимостью смещения доменных границ от H и с увеличением вклада процессов вращения. При напряженности поля H , соответствующего участку 2–3 на рис.3.5 магнитная проницаемость максимальна, а затем падает из-за насыщения магнитной индукции. При $H \rightarrow \infty$, $\mu \rightarrow 1$.

Если после намагничивания образца до насыщения внешнее поле медленно уменьшить до нуля, то индукция в нуль не обратится, а примет значение B_r (рис.3.8), называемое остаточной индукцией. Остаточная индукция вызвана сориентированными при максимальной напряженности поля H доменами, которые затем зафиксировали свое состояние силами металлических связей. Сами они вернуться в исходное состояние уже не способны, этому противодействуют прочностные свойства материала. На них необходимо воздействовать внешним магнитным полем противоположного направления. Чтобы уменьшить индукцию до нуля, необходимо приложить обратно направленное поле напряженностью H_c , называемое коэрцитивной силой. В зависимости от численного значения H_c ферромагнетики делят на магнитомягкие и магнитотвердые.

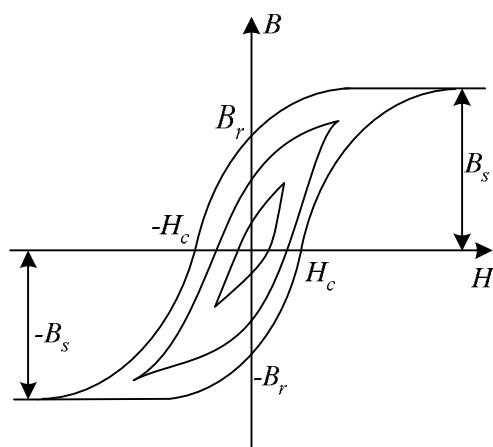


Рис.3.2.

Условно магнитомягкими считают материалы, у которых $H_c < 800$ А/ма, а магнитотвердыми с $H_c > 4$ кА/м. Величины B_r и H_c являются параметрами статической предельной петли гистерезиса, т.е. ПГ, полученной при медленном циклическом перемагничивании намагниченного до насыщения образца. Площадь статической ПГ характеризует потери энергии на гистерезис $\mathcal{E}_g$, обусловленные необратимыми процессами смещения и вращения за один цикл перемагничивания. При достаточно быстром изменении H по величине и знаку зависимость $B(H)$ описывает динамическую ПГ. При намагничивании до одинакового предельного значения индукции площадь динамической ПГ металлических ферромагнетиков больше площади статической ПГ на величину, характеризующую потери энергии на вихревые токи $\mathcal{E}_{вт}$.

Для металлических ферромагнетиков характерно уменьшение измеряемой величины магнитной проницаемости с ростом частоты, наблюдаемое на достаточно низких частотах, когда инерционность процессов намагничивания еще не проявляется (рис. 3.9). Это объясняется размагничивающим действием вихревых токов. Вихревые токи, индуцируемые в ферромагнитном сердечнике, создают в соответствии с законом Ленца собственный поток магнитной индукции, находящийся в противофазе с основным потоком. Плотность потока, создаваемого вихревыми токами, максимальна в центре сердечника и равна нулю на его поверхности. Поэтому результирующая магнитная индукция убывает от поверхности вглубь сердечника. Относя измеренный поток ко всему сечению сердечника, мы определяем некоторое эффективное значение магнитной проницаемости.

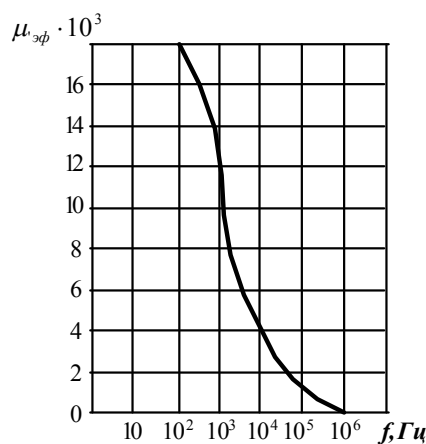


Рис.3.9

Для уменьшения потерь на вихревые токи и замедления спада μ с ростом частоты сердечники дросселей, трансформаторов и других электромагнитных устройств набирают из изолированных друг от друга пластин, толщина которых меньше глубины проникновения поля в материал ферромагнетика на заданной частоте.

Ферритами называют оксидные материалы, имеющие химическую формулу $MeO \cdot Fe_2O_3$ где Me – обозначение одного или двух двухвалентных металлов (никеля, марганца, цинка, кобальта, магния и др.). Ферриты могут быть изготовлены в виде монокристаллических или поликристаллических (керамических) образцов различной конфигурации и в виде пленок, нанесенных на подложку из другого материала. Чаще всего применяются поликристаллические ферриты, изготовление которых требует наименьших затрат.

Ферриты, как и металлические ферромагнетики, обладают в определенном интервале температур спонтанной намагниченностью и доменной структурой. Намагничивание их внешним полем происходит также за счет смещения доменных границ (ДГ) и вращения вектора намагниченности.

Магнитомягкие ферриты (т.е. ферриты, обладающие достаточно большой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой) применяются в качестве материалов для изготовления сердечников электромагнитных устройств, работающих в диапазоне радиочастот. Достоинством их по сравнению с металлическими магнитными сердечниками в данном случае является большое удельное сопротивление ρ , что препятствует индуцированию вихревых токов. Поэтому в широком диапазоне частот магнитная проницаемость ферритов остается постоянной (рис. 3.10), а потери энергии на перемагничивание практически обусловлены только потерями на гистерезис. Спад магнитной проницаемости феррита при частотах выше некоторого критического значения $f_{кр}$ обуславливается в основном инерционностью процессов перемагничивания, а вихревые токи не вносят существенного вклада в зависимость $\mu(f)$ (в отличие от металлических ферромагнетиков). У некоторых ферритов существенный вклад в дисперсию

μ (т.е. в ее частотную зависимость) вносят резонансные процессы колебания ДГ. Тогда спаду кривой $\mu(f)$ может предшествовать сравнительно небольшой резонансный максимум (см. рис. 3.10, кривая μ_2).

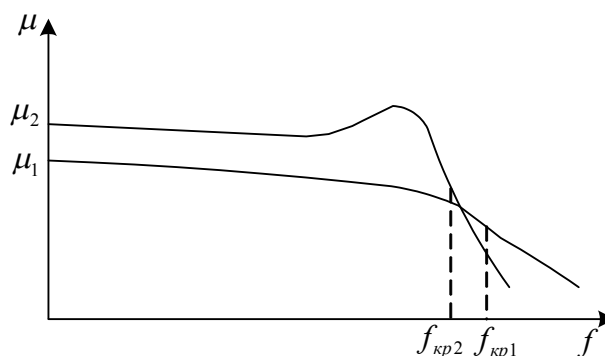


Рис.3.10.

Наибольшими значениями начальной магнитной проницаемости обладают марганец-цинковые ферриты (двухвалентный металл в составе феррита - марганец и цинк в разных процентных соотношениях). Поликристаллические марганцево-цинковые ферриты изготавливаются с начальной магнитной проницаемостью от 700 (марка 700 НМ) до 20000 (марка 20000 НМ). Наряду с марганцево-цинковыми ферритами, широкое применение в диапазоне частот от единиц килогерц до нескольких мегагерц находят также никель-цинковые ферриты.

Максимальным значением начальной магнитной проницаемости среди этой группы материалов обладает феррит 2000 НН.

В марках феррита цифра означает величину начальной магнитной проницаемости при низких ($< f_{кр}$) частотах, первая буква Н – «низкочастотный» (т.е. $f_{кр}$ сравнительно невысока), вторая буква указывает состав феррита (М – в состав входит оксид марганца, Н – оксид никеля).

4.3. Лабораторный стенд и методика измерений

Схема испытания приведена на рис. 3.11, где Φ – испытуемый сердечник с первичной обмоткой W_1 и вторичной W_2 , G - генератор синусоидальных сигналов, PV – ламповый вольтметр, N – осциллограф, R_T – образцовый («токовый») резистор, $R_{и}$ и $C_{и}$ – интегрирующая цепочка. К пластинам горизонтального отклонения осциллографа (вход канала I) прикладывают напряжение $U_x = U_R$ снимаемое с резистора R_T и пропорциональное току I, протекающему в обмотке W_1 . U_R пропорционально напряженности поля H, поскольку $H = W_1 I / (2\pi r_{ср})$, где $2\pi r_{ср}$ - средняя длина линий напряженности поля.

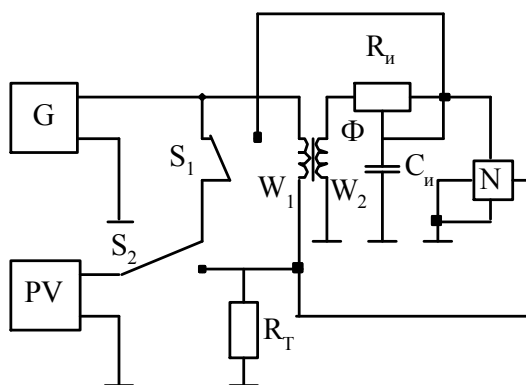


Рис.3.11.

Таким образом, ток от генератора G протекает через обмотку W_1 , резистор R_T и уходит на землю. Падение напряжения на R_T , названное нами как U_R , так же связано с током, как и создаваемое на оси катушки магнитное поле. В это магнитное поле H помещен исследуемый нами ферромагнетик. Следовательно величина $U_x = U_R$ пропорциональна H и отображается на горизонтальной оси осциллограммы.

Магнитное поле H , созданное катушкой W_1 , наводит в ферромагнетике Φ внутреннее поле, в μ раз более мощное, это индукция B . Обнаруживается она по воздействию на вторичную катушку W_2 , с которой ток идет по цепи через интегрирующую цепочку R_u, C_u на землю.

На вертикальный вход осциллографа (вход канала II) подают напряжение $U_y = U_c$, снимаемое с конденсатора C_u интегрирующей цепочки, которое определяется выражением

$$U_i = \frac{1}{C_u} \int i_u,$$

где i_u - ток в интегрирующей цепочке.

Если $R_u \gg 1/\omega C_u$, то $I_u = E_2/R_u$, где E_2 – ЭДС во вторичной обмотке. Согласно закону Ленца $E_2 = W_2 S (dB/dt)$, где S – сечение магнитного образца.

С учетом выражений для U_i и i_u , закон Ленца можно выразить

$$U_c = \frac{1}{R_u C_u} \int E_2 dt = \frac{W_2 S B}{R_u C_u},$$

т.е. напряжение U_c пропорционально индукции в образце.

При одновременном приложении напряжений U_R и U_c к пластинам осциллографа на его экране получится петля гистерезиса, характеризующая зависимость $B=f(H)$ на переменном сигнале.

Для исследования частотной зависимости $\mu_{эф}$ в образце создается слабое магнитное поле, соответствующее начальному участку кривой намагничивания. Значение H контролируется по падению напряжения U_R на резисторе R_T . Измеряя напряжение на входе схемы $U_{вх}$, можно найти падение напряжения U_L на катушке индуктивности с исследуемым сердечником.

4.4. Порядок выполнения лабораторной работы

Соедините выход генератора с гнездом G измерительного стенда, к гнезду U подключите вольтметр. Входы каналов X и Y осциллографа соедините с гнездами X и Y измерительного стенда соответственно. Ручки переключения коэффициентов усиления каналов X и Y поставьте в положения 50 мВ/дел и 20 мВ/дел. соответственно ($U_X = 50$ мВ, $U_Y = 20$ мВ). Включите приборы в сеть. Прогрейте в течение 5 мин. С помощью ручек осциллографа добейтесь положения луча в центре экрана. Установите частоту сигнала генератора 50 Гц. При помощи регулятора выхода генератора получите на экране осциллографа предельную петлю гистерезиса. Вершина петли по координате X должна занимать четыре клетки, считая от центра экрана. Напряжение, измеряемое вольтметром, должно равняться при этом ~ 1 В.

4.4.1. Снятие основной кривой намагничивания. Изменяя величину сигнала на выходе генератора, зарисуйте семейство петель гистерезиса и запишите в таблицу 3.1. координаты их вершин при $X=1,2,3,4$ делений.

Таблица 3.1.

X, дел	H_m , А/м	Y, дел.	B_m , Тл	μ

Масштабы осей осциллографа рассчитайте по формулам:

$$m_x = \frac{U_x W_1}{2\pi r_{cp} R_T}, \frac{\text{А}}{\text{м}}/\text{дел}; \quad m_y = \frac{U_y C_{и} R_{и}}{W_2 S}, \frac{\text{Тл}}{\text{дел}}$$

где $R_T=10$ Ом; $r_{cp}=0,021$ м; $W_1=100$; $W_2=1330$; $C_{и}=10^{-6}$ Ф; $R_{и}=10^{-5}$ Ом; $S=10^{-4}$.

Напряженность поля и магнитная индукция в образце, соответствующие отклонению луча осциллографа в точке с координатами (X,Y) равны

$$H_m = m_x X; \quad B_m = m_y Y.$$

Значение магнитной проницаемости по данным осциллографических исследований вычисляется из основной кривой намагничивания согласно выражению:

$$\mu = \frac{B_m}{\mu_0 H_m},$$

где $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Результаты расчета занесите в таблицу 3.1 и постройте по ним основную кривую намагничивания и зависимость $\mu(H)$.

4.4.2. Определение частотной зависимости эффективной магнитной проницаемости.

При помощи регулятора выхода генератора получите на экране осциллографа предельную петлю гистерезиса. Произведите измерения на частотах 50,60,80,100,150,200 Гц. На каждой частоте фиксируйте значения

U_R по положению координаты X вершины петли гистерезиса ($U_R = XU_X$) и показания вольтметра U_V . Входное напряжение при этом равно $U_{BX} = \sqrt{2} U_V$. Результаты измерений занесите в таблицу 3.2.

Таблица 3.2.

f , Гц	U_R , В	U_V , В	U_{BX} , В	U_L , В	L , Гн	$\mu_{эф}$

Для определения эффективной магнитной проницаемости на различных частотах рассчитывается индуктивность катушки с испытуемым сердечником:

$$L = \frac{U_L}{2\pi f I},$$

где $I = U_R / R_T$ - ток, протекающий в цепи, А; U_L - падение напряжения на катушке индуктивности, В. Полагая, что сопротивление катушки индуктивности носит чисто индуктивный характер (что справедливо при малых амплитудах H_m), напряжение U_L можно вычислить из соотношения:

$$U_L = \sqrt{U_{ex}^2 - U_R^2}$$

Эффективная магнитная проницаемость рассчитывается по формуле:

$$\mu_{эф} = \frac{2\pi r_{cp} L}{\mu_0 W_1 S}$$

Результаты расчета данных $\mu_{эф}=f(f)$ занесите в таблицу 3.2. и представьте в виде графика.

Контрольные вопросы

1. Каким образом на экране осциллографа можно получить петлю гистерезиса?
2. Какие механизмы перемагничивания обуславливают гистерезисные свойства ферромагнетиков?
3. Каким образом Вы получили основную кривую намагничивания?
4. Объясните зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности магнитного поля.
5. Чем отличаются динамические кривые намагничивания от статических? Какие кривые снимались в данной работе?
6. Что характеризует площадь ПГ, которую Вы наблюдали в данной работе?
7. Назовите основные виды потерь в ферромагнитных сердечниках. Какие потери и почему более опасны на высоких частотах?

8. Как объяснить влияние частоты на значение магнитной проницаемости металлического ферромагнетика?
 9. Из чего изготовлен пермаллой и где он применяется? Охарактеризуйте его магнитные свойства.
 10. Что представляет собой феррит и почему ферритовые сердечники можно использовать на высоких частотах?
 11. Объясните ход кривой намагничивания и зависимости магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля.
- Назовите области применения ферритов.