

Прочитайте вступление к учебной лекции.

Если читали ранее – можно пропустить этот блок информации.

Учебная лекция в ДО – это учебный материал для конспектирования

Инструкция для работы с учебным материалом (для конспектирования):

1. Первый раз прочитайте всю лекцию, ничего не записывая.
2. Ответьте мысленно на вопрос, что главное в лекции, из скольких основных частей лекция состоит (*на сколько частей ее можно мысленно разбить*), придумайте название для каждой части – это будет план конспекта.
3. Откройте тетрадь для лекций и запишите в тетради тему, дату лекции и план конспекта.
4. Второй раз начинайте читать лекцию и приступайте к конспектированию: в соответствии с планом – в каждой части плана пишите определения величин, формулы законов, формулировки законов, делайте рисунки к разбираемым примерам или другому. Чем больше будет ваших записей, поясняющих о чем идет речь, тем лучше вы поймете и запомните учебный материал.

Внимание! Важно обращать внимание на то, что вы описываете – явление, закон, величину или другое понятие (например, модель объекта).

Руководствуйтесь правилами:

А) если описываете явление – запишите особенности рассматриваемого явления (*в чем заключается явление, каковы условия его возникновения, какие законы и величины используются для исследования явления*)

В) если описываете величину – запишите определение величины (*укажите физическая скалярная или векторная величина, формулу/ы для определения величины, единицу величины, поясните, что характеризует и, если векторная величина, то она как направлена*),

С) если описываете понятие (не величину) – запишите одно предложение, которое раскрывает смысл понятия (*для примера см. система отсчета, материальная точка, система материальных точек и др.*),

Д) если описываете закон – название, формулу, формулировку, физический смысл запишите закона. **Помните, что при записи формулы надо расшифровать названия величин, входящих в данную формулу.**

РАМКА С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВЕЩЕСТВЕ

Действие магнитного поля на рамку с током. Магнитное поле в веществе. Характеристики и законы магнитного поля в веществе.

Введение

Магнитное поле – вид материи, который обладает тремя выраженными свойствами: создается только движущимися зарядами, действует с силой только на движущиеся заряды и может создаваться переменным электрическим полем.

Основные характеристики магнитного поля – магнитная индукция и напряженность магнитного поля, которые связаны друг с другом с помощью магнитной проницаемости вещества и магнитной постоянной. Магнитное поле характеризуют также: 1) в некоторой области пространства с помощью потока вектора магнитной индукции или потока вектора напряженности магнитного поля; 2) вдоль некоторой замкнутой линии с помощью циркуляции вектора магнитной индукции или циркуляции напряженности магнитного поля. Для исследования поля – эти две характеристики играют важнейшую роль (см. предыдущие лекцию и презентацию). Все эти величины зависят от наличия источника магнитного поля – движущихся зарядов (токов), то есть они связаны с первым свойством магнитного поля.

Второе свойство магнитного поля – действовать с силой на движущиеся заряды, – проявляется при механическом силовом действии магнитного поля на движущийся заряд или проводник с током, при взаимодействии проводников с токами (см. предыдущую лекцию), при повороте рамки с током в магнитном поле. Повороту рамки с током в магнитном поле уделяется особое внимание, поскольку это явление находит применение в технике. Закон, который позволяет определить, с какой силой магнитное поле действует на проводники или рамку с током – *закон (сила) Ампера*. Для рамки с током на основе него находится момент сил Ампера и работа сил Ампера, и определяется то, что рамка с током в магнитном поле

разворачивается до тех пор, пока положительная нормаль к ней не совпадет с вектором магнитной индукции. Для описания поведения рамки с током (кругового тока) в магнитном поле вводится такая характеристика, как магнитный момент рамки с током. Аналогично рамке с током ведет себя и круговой ток. Рамка с током может быть любой геометрической конфигурации, круговой ток представляет замкнутую окружность. Круговым током называют и движение электрона в атоме.

Два этих свойства магнитного поля обнаруживают при наведении его на вещество, способное реагировать на магнитное поле. Такое вещество называют магнетиком, среди них выделяют три особых вида: диамагнетик, парамагнетик и ферромагнетик. Для описания свойств магнетиков вводятся такие характеристики, как намагниченность вещества, магнитная проницаемость вещества, магнитная восприимчивость вещества.

Сила Ампера (повторение)

Это сила, которая действует со стороны МП на проводник с током, помещенный в него.

Причина существования этой силы – это свойство МП оказывать механическое силовое воздействие на движущиеся заряды.

Сила, действующая на элемент dl с током I в МП с индукцией B численно равна

$$\boxed{d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}]} \quad - \text{ закон (сила) Ампера.}$$

Проводник определенной длины

$$\vec{F} = I \int_L [d\vec{l}, \vec{B}]$$

Модуль силы Ампера $dF = Idl \cdot B \cdot \sin \alpha$,

α - угол между векторами $d\vec{l}$ и \vec{B} .

Максимальная сила Ампера будет тогда, когда синус угла между указанными векторами будет равен единице (между векторами должно быть 90 градусов):

$$dF_{\max} = I \cdot dl \cdot B$$

В общем случае, если проводник не изогнутый, а прямолинейный, то сила Ампера, действующая со стороны МП на проводник с током, определяется с помощью очень простой формулы:

$$\vec{F} = I [\vec{l}, \vec{B}].$$

Для определения направления силы Ампера применяют правило левой руки, которое родилось как следствие рассуждения о векторном произведении $[\vec{dl}, \vec{B}]$.

Правило левой руки

Если левую руку поместить так, чтобы четыре вытянутых пальца были направлены по направлению тока, а линии вектора магнитной индукции входили в ладонь, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы Ампера

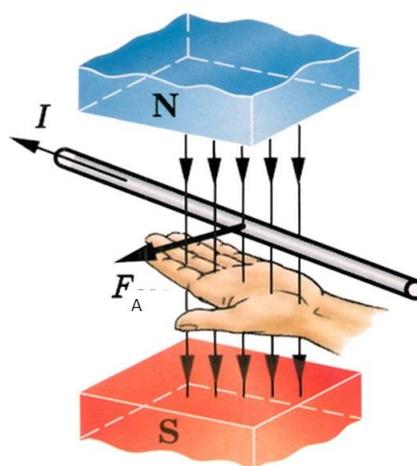


Рисунок 1. Действие МП на проводник с током и правило левой руки

Обратите внимание, что силовые линии магнитного поля выходят из северного полюса магнита, а входят в южный полюс магнита (см. презентацию по предыдущей теме).

Действие МП на рамку (контур) с током. Силы и момент сил Ампера

Рассмотрим, что произойдет, если в однородное МП поместить не проводник с током, а рамку с током.

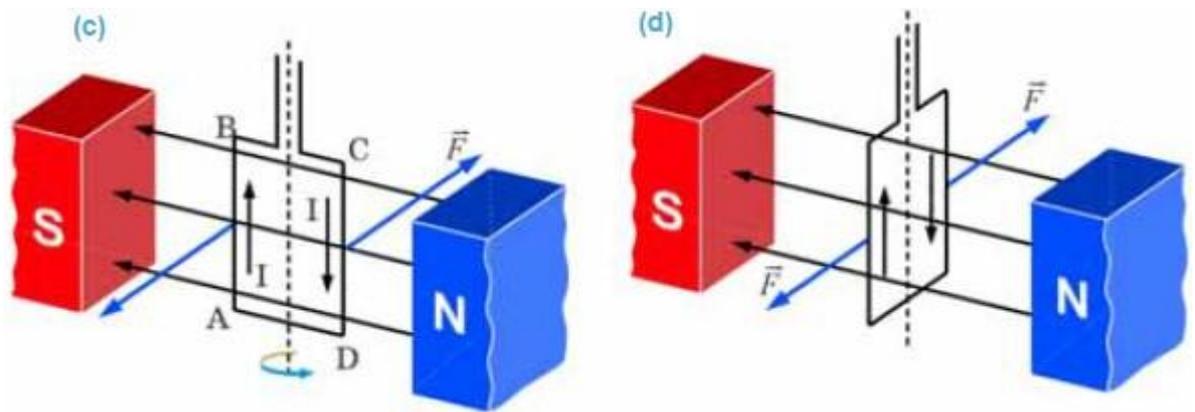


Рисунок 2. Действие МП на рамку с током

На стороны BC и AD магнитное поле не оказывает силовое воздействие потому, что направления токов коллинеарны (сонаправлены) направлению вектора магнитной индукции (выходит из северного полюса магнита и входит в южный полюс магнита). В этом случае МП не действует на проводник с током! Закон Ампера это учитывает: угол между векторами $d\vec{l}$ и \vec{B} будет равен нулю, синус нуля градусов равен нулю ($\alpha = 0^\circ$) и модуль силы Ампера $dF = Idl \cdot B \cdot \sin \alpha = 0$

Сторону АВ магнитное поле стремится повернуть к нам, а сторону CD – от нас (**проверьте с помощью правила левой руки, применяя его к каждой стороне рамки с током**). В итоге рамка с током разворачивается и становится перпендикулярно силовым линиям МП. То есть МП оказывает на рамку с током ориентирующее действие – поворачивает рамку с током до тех пор, пока силы не компенсируют друг друга. Если использовать величины, характеризующие вращательное движение, то можно сказать, что силы Ампера, действующие на стороны АВ и CD, в начальный момент времени создали момент сил, отличный от нуля, а в тот момент, когда рамка развернулась *момент сил Ампера* стал равен нулю.

Обозначим стороны АВ и CD через a , стороны BC и AD через b и определим момент сил, действующих на рамку в однородном МП, используя формулу механики для определения момента сил:

$M = F \cdot b \cdot \sin \alpha$, b – здесь это длина верхней или нижней стороны рамки, b учитывает, что две одинаковые силы создают в начале движения два

момента сил относительно оси вращения (плечо равно половине нижней или верхней длины проводника с током, см.рис. 2), которые суммируются, в результате чего результирующее значение момента силы относительно оси вращения удваивается (одна вторая длины проводника пропадает).

Раскроем природу этих сил – это силы Ампера, то есть каждая из них равна $F_A = I \cdot a \cdot B$. Сила Ампера здесь все время перпендикулярна силовым линиям МП. Подставим выражение для силы в уравнение для момента сил:

$$M = I \cdot a \cdot b \cdot B \cdot \sin \alpha .$$

Обратите внимание, что произведение $S = a \cdot b$ – это площадь рамки, то есть, можно записать момент сил Ампера так:

$$M = I \cdot S \cdot B \cdot \sin \alpha .$$

Если заменить площадь на вектор, который по модулю равен площади рамки, а по направлению совпадает с вектором единичной положительной нормали $\vec{S} = S \cdot \vec{n}$, то момент сил Ампера, действующий на рамку с током запишется в виде векторного произведения, которое легко запомнить (вектор магнитной индукции всегда стоит на втором месте в векторном произведении):

$$\vec{M} = I [\vec{S}, \vec{B}]$$

После введения вектора $\vec{S} = S \cdot \vec{n}$ можно ввести еще одну важную характеристику, которая позволяет предсказывать поведение рамки с током или кругового тока в магнитном поле – магнитный момент.

Магнитный момент – физическая векторная величина, которая характеризует магнитные свойства рамки (контура) с током, позволяет предсказать поведение рамки (контура) с током в МП, магнитный момент численно равен

$$\vec{P}_m = I \cdot \vec{S}, \quad \text{где} \quad \vec{S} = S \cdot \vec{n}$$

\vec{P}_m направлен также, как и вектор положительной нормали, то есть перпендикулярно поверхности, ограниченной проводником с током, при

этом с острия движение тока наблюдается против часовой стрелки (см. рис.3).



Рисунок 3. Формула для определения, единица измерения и направление вектора магнитного момента контура с током

Понаблюдаем, что происходит с этим вектором \vec{P}_m (вектором магнитного момента), когда в МП рамка (контур) с током под действием сил Ампера разворачивается. Как видим (см.рис.2), **рамка (контур) с током в магнитном поле разворачивается до тех пор, пока вектор магнитного момента \vec{P}_m не совпадет с вектором магнитной индукции \vec{B}** . Поверхность станет перпендикулярна вектору магнитной индукции \vec{B} , а **вектор магнитного момента \vec{P}_m совпадет с \vec{B}** . Именно это свойство рамки (контура) с током и позволяет предсказывать поведение ее в магнитном поле: как только на рамку (контур) с током будет наведено МП, она развернется так, что вектор магнитного момента совпадет с вектором магнитной индукции (см.рис.2).

Теперь можно использовать \vec{P}_m , чтобы упростить формулу для момента сил Ампера, действующих на рамку (контур) с током в магнитном поле:

$$\vec{M} = I[\vec{S}, \vec{B}], \quad \vec{M} = [I\vec{S}, \vec{B}], \quad \vec{P}_m = I\vec{S}, \quad \vec{M} = [\vec{P}_m, \vec{B}]$$

$$M = I \cdot S \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad M = P_m \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Проверим эту формулу, если угол между вектором магнитного момента \vec{P}_m и вектором магнитной индукции \vec{B} не равен нулю (начальное положение на рис.2), то синус угла не равен нулю и момент силы не равен нулю, то есть на рамку (контур) будет действовать момент сил, который будет разворачивать ее. Если угол между вектором магнитного момента \vec{P}_m и вектором магнитной индукции \vec{B} равен нулю (конечное положение на рис.2), то синус угла будет равен нулю и момент силы равен нулю, то есть рамка (контур) с током будет в равновесии в МП.

Изобразите вектор магнитного момента \vec{P}_m на двух рисунках (см.рис. 2) в своем конспекте, обратите внимание, что в конечном положении этот вектор совпадет с вектором магнитной индукции \vec{B} (см. рис.2, d).

Если есть силы, то необходимо определить работу этих сил.

Работа сил Ампера по перемещению и развороту проводника и рамки (контура) с током

1. *Работа сил Ампера по перемещению проводника с током (см.рис.4).*

Для определения работы МП по перемещению проводника с током используем формулу-определение из механики:

$$\delta A = \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

- Рассмотрим **контур с током**, образованный неподвижными проводами и скользящей по ним подвижной перемычкой длиной l
- Этот контур находится во внешнем однородном магнитном поле B , перпендикулярном к плоскости контура.

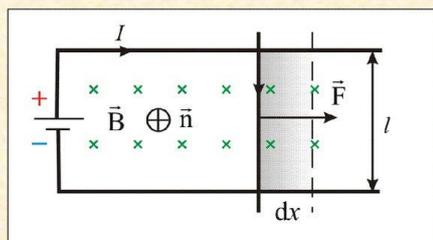


Рисунок 4. Перемещение прямолинейного отрезка проводника с током длиной l под действием магнитного поля

В формуле-определении работы и на рисунке изображена сила F – это сила Ампера F_A . Перемещение происходит вдоль одной координатной оси Ox $dr=dx$, вектора в формуле-определении можно не указывать, так как перемещение стороны рамки происходит в том же направлении, в котором действует сила Ампера ($\cos 0^\circ = 1$):

$$\delta A = F_A \cdot dr.$$

Подставим в это определение для работы выражение для силы Ампера $\vec{F}_A = I[\vec{l}, \vec{B}]$ и учтем, что в скалярной форме сила Ампера равна произведению трех величин:

$$F_A = I \cdot l \cdot B (\sin 90^\circ = 1).$$

Получим $\delta A = I \cdot l \cdot B \cdot dr$. Это уравнение можно использовать для расчета работы сил Ампера, но его можно значительно упростить. Для этого переставим в этой формуле две величины B и dr : $\delta A = I \cdot l \cdot dr \cdot B$. Переставим для того, чтобы увидеть, что произведение двух других величин l и dr равно площади $dS = l \cdot dr$, которую прочерчивает проводник с током при движении (см.рис.4). Тогда $\delta A = I \cdot dS \cdot B$.

Сделаем еще одну замену в формуле для определения работы, а именно заменим $\delta \Phi_m = B \cdot dS$ – это магнитный поток, пронизывающий площадку dS . Окончательно после интегрирования по всей площади S получим $\Phi_m = B \cdot S$

$$A = I \cdot \Phi_m$$

Формула для определения работы сил Ампера по перемещению проводника с током получилась простой: **работа сил Ампера при перемещении проводника с током численно равна произведению тока на магнитный поток, пронизывающий поверхность, прочерченную проводником с током при движении.**

2. *Работа МП при развороте рамки (контура) с током.* Без вывода запишем формулу для определения работы, чтобы показать, что эта формула похожа на предыдущую. В общем случае работа сил Ампера по развороту рамки с током равна:

$$A = I \cdot \Delta\Phi_m \quad \text{или} \quad A = I(\Phi_2 - \Phi_1)$$

Φ_2 и Φ_1 – магнитные потоки, которые пронизывают рамку с током в конечном и начальном положении рамки. В этом случае очень важно учитывать, чему равен угол между нормалью к площади контура \vec{n} и вектором магнитной индукции \vec{B} , так как магнитный поток в этом случае зависит от этого угла: $\Phi_m = B \cdot S \cdot \cos \alpha$.

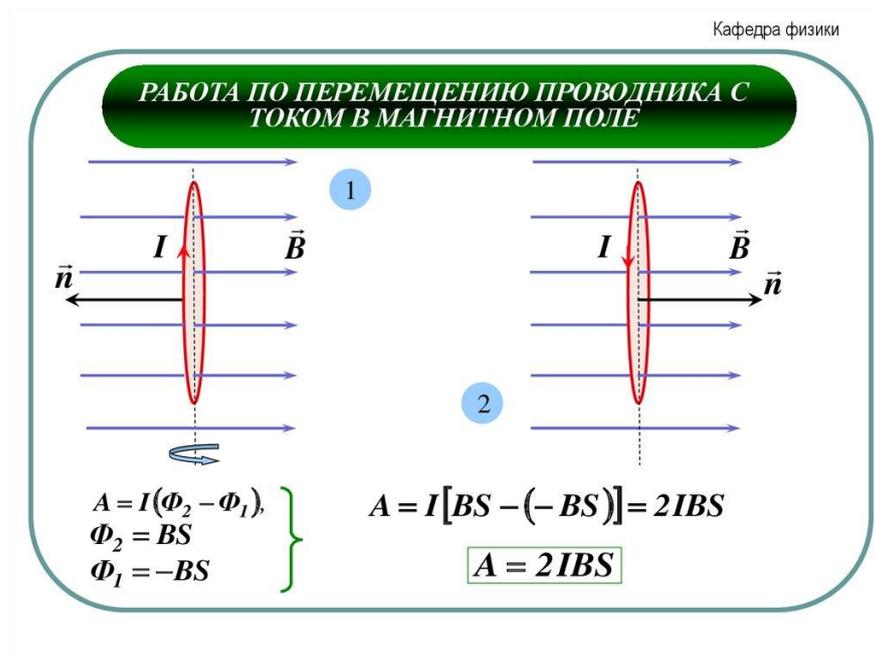


Рисунок 5. Пример расчета работы сил Ампера по развороту рамки с током на 180 градусов

Математическая формулировка определения работы сил Ампера по развороту проводника с током: **работа сил Ампера по повороту проводника с током численно равна произведению тока на разность магнитных потоков, пронизывающих поверхность проводника в конечном и начальном положении.**

Дополнительно можно сделать один важный вывод. Обратите внимание каждый раз рамка (контур) с током разворачиваются так, что магнитное поле рамки (контура) с током совпадают. Почему природа действует таким образом объяснить можно только на «языке энергий»: **рамка с током в МП разворачивается до того положения, в котором магнитный поток, пронизывающий ее, максимален, в этом положении потенциальная энергия**

рамки (контура) с током минимальна, то есть это положение энергетически выгодно для рамки с током (не надо тратить дополнительно усилия, чтобы поддерживать это состояние).

$$W_n = -\vec{P}_m \cdot \vec{B}$$
$$W_n = -P_m \cdot B \cdot \cos \alpha$$

– потенциальная энергия контура с током. Положение

устойчивого равновесия соответствует минимуму потенциальной энергии. Это положение, когда угол между вектором магнитного момента \vec{P}_m и вектором магнитной индукции \vec{B} равен нулю, выражение будет иметь минимальное значение (-1 меньше нуля).

Магнитное поле в веществе

Различают 3 основных вида веществ (магнетиков) по их магнитным свойствам, они по-разному реагируют на внешнее магнитное поле: диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. Их свойства обусловлены наличием в веществе микротоков: в веществе происходит движение каждого электрона, каждое из которых можно представить в виде элементарного кругового тока. Структура этих трех веществ такова, что их элементарные токи по-разному ведут себя при помещении в магнитное поле. Но одно свойство проявляется во всех магнетиках – это диамагнетизм: намагничивание вещества против внешнего МП и выталкивание его из МП за счет этого. Однако диамагнетиками становятся не все вещества. Если явление диамагнитного намагничивания слабее, чем возникновение отдельных собственных магнитных моментов \vec{P}_m , то происходит выстраивание этих магнитных моментов по внешнему магнитному полю – вещество намагничивается по полю и усиливает общее магнитное поле. Это явление получило название парамагнетизм, а такое вещество называли парамагнетиком. Парамагнетики усиливают внешнее МП, а потому всегда втягиваются в магнитное поле (так энергетически выгодно).

И диамагнетики, и парамагнетики проявляют свои магнитные свойства только под действием внешнего МП. Стоит «выключить» МП – они возвращаются в свое первоначальное ненамагниченное состояние.

Отмечается очень слабая зависимость (практически отсутствие) свойств диамагнетиков от температуры и явная зависимость свойств парамагнетиков от температуры.

В третьем веществе существуют не просто отдельные собственные магнитные моменты \vec{P}_m , а целые области (участки), которые обладают собственным магнитным моментом. Эти области (участки) называли доменами. Такое вещество называли ферромагнетиком. Ферромагнетик способен достаточно быстро реагировать на внешнее магнитное поле и «забывать» свое первоначальное состояние – оставаться намагниченным даже в отсутствии магнитного поля, поскольку свое «выгодное» энергетическое состояние он находит под действием внешнего магнитного поля (более строгое объяснение явлению ферромагнетизма может дать только квантовая физика).

1. Диамагнетики – вещества, которые намагничиваются во внешнем МП (образуют собственное МП по всему объему противоположно направлению внешнего МП). Это приводит к тому, что диамагнетик ориентируется во внешнем МП перпендикулярно силовым линиям внешнего МП или в неоднородном МП диамагнетик выталкивается в область более слабого МП.
2. Парамагнетики – вещества, которые намагничиваются (создают собственное МП по направлению внешнего МП). Это приводит к ориентации парамагнетиков вдоль силовых линий внешнего МП или в неоднородном МП парамагнетик перемещается в область более сильного МП.
3. Ферромагнетики – вещества, которые обладают самопроизвольной намагниченностью в отдельных областях вещества. Эти области с одинаковым направлением намагниченности в каждой называют *домены*, в результате чего ферромагнетик намагничивается во внешнем МП нелинейно и

может усиливать внешнее МП в сотни и десятки тысяч раз.

Ферромагнетик намагничивается по направлению внешнего МП.

Еще раз, свойства ферромагнетика обусловлены наличием доменов и их способностью во внешнем МП быстро намагничиваться по направлению внешнего МП. Свойства ферромагнетиков явно зависят от температуры и при определенной температуре (точке Кюри) могут переходить в свойства парамагнетиков.

Механизм явлений диа-, пара- и ферромагнетизма

(Таблицу не конспектировать! Нарисовать только график для ферромагнетиков)

Диамагнетизм	Парамагнетизм	Ферромагнетизм
Свойства магнетиков можно объяснить с помощью микротоков. В веществе МП создается микротоками – токами, образуемыми движением электронов в атомах, молекулах, кристалле (в веществе), и макротоками – токами проводимости и конвекционными токами (вне вещества). Собственное МП в веществе создается только микротоками.		
<p>Поведение микротока во внешнем МП для диамагнетика.</p> <p>Во внешнем МП вектора \vec{P}_m и \vec{L} движутся так, что рисуют конус, ось которого совпадает с вектором \vec{B}, т.е. магнитный момент микротока пытается совпасть с вектором \vec{B} внешнего МП, но не совпадает с ним, а очерчивает конус. Этому движению дали название – прецессия Лармора.</p> <p>Прецессионное движение микротока, созданного электронами в атоме, – такое движение, при</p>	<p>Парамагнетизм обусловлен существованием отдельных собственных магнитных моментов по всему объему магнетика, которые в отсутствие внешнего МП скомпенсированы. При внесении магнетика во внешнее МП собственные магнитные моменты начинают ориентироваться по нему, что приводит к усилению МП в</p>	<p>Ферромагнетизм – явление самопроизвольного (спонтанного) намагничивания вещества по всему объему, что обусловлено существованием доменов и приводит к нелинейной зависимости собственного МП от внешнего. В отсутствие внешнего МП домены намагничены таким образом, что суммарный магнитный момент равен нулю. При внесении магнетика во внешнее МП границы доменов начинают «растягиваться», захватывая все новые области. Магнитные моменты по всему объему ориентируются по внешнему МП. В результате это приводит к резкому усилению внешнего МП.</p> <p>График, отражающий свойства ферромагнетиков получил название петля гистерезиса.</p>

котором вектор магнитного момента рисует конус с осью, совпадающей с вектором индукции внешнего МП.

Прецессия Лармора приводит к тому, что возникает дополнительный магнитный момент, всегда направленный против внешнего МП. Таким образом, по всему объему вещества дополнительный магнитный момент приводит к созданию собственного МП, направленного всегда против внешнего МП. Это явление получило название диамагнетизм.

Диамагнетизм – явление создания собственного МП по всему объему магнетика при внесении его во внешнее МП, причем направление собственного МП всегда противоположно внешнему.

Диамагнетизм присущ всем веществам.

Вещества, в которых этот эффект не перекрывается другими явлениями – диамагнетики.

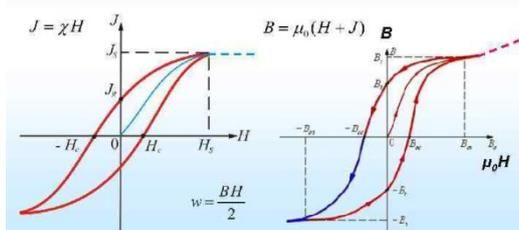
веществе.

Свойства ферромагнетиков явно зависят от температуры, при этом всегда есть особая точка (точка Кюри) – температура, выше которой ферромагнетики теряют свои свойства и становятся парамагнетиками.

Магнитный гистерезис

Гистерезис магнитный (Hysteresis magnetic) – запаздывание намагничивания материала под воздействием любого циклического изменения прикладываемого магнитного поля.

Основная кривая намагничивания, насыщение ($\sim 100 \text{ A/m}$), остаточное намагничивание, остаточная индукция, коэрцитивная сила.



Таким образом, диамагнетики ослабляют внешнее МП, парамагнетики незначительно усиливают его, а ферромагнетики усиливают до десятков тысяч раз внешнее МП.

Характеристики магнитных свойств магнетиков – намагниченность (связана с магнитными моментами микротоков), магнитная проницаемость и магнитная восприимчивость).

Намагниченность – физическая векторная величина, которая характеризует магнитный момент единицы объема вещества, численно равная векторной сумме магнитных моментов, заключенных в некотором единичном объеме ΔV .

$$\vec{j} = \frac{\sum \vec{P}_{mi}}{\Delta V} \quad \vec{j} \uparrow \uparrow \sum \vec{P}_{mi}$$

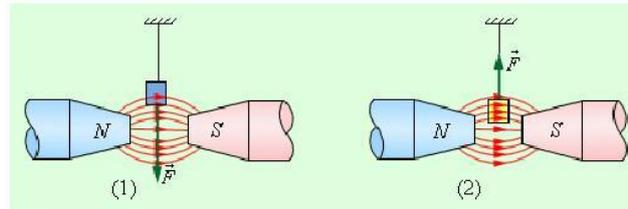
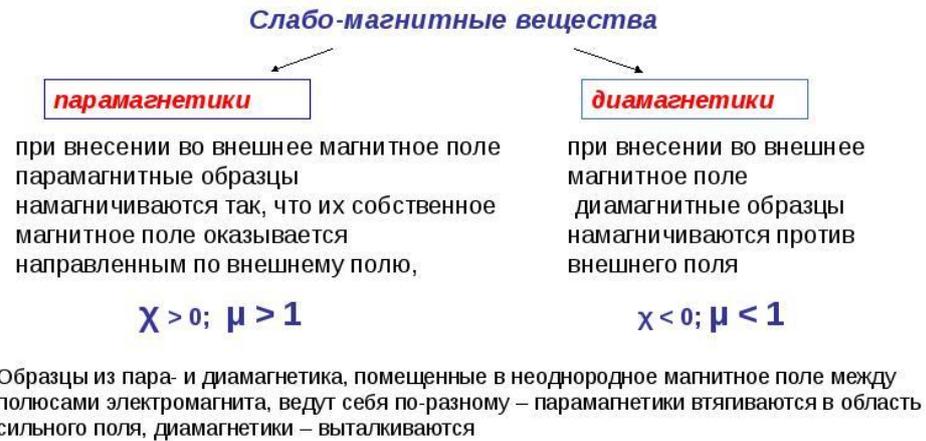
$$[j] = 1 \text{ А/м} \quad [P_m] = 1 \text{ А}\cdot\text{м}^2$$



Рисунок 6. Зависимость намагниченности от внешнего магнитного поля

Магнитная проницаемость вещества μ – физическая безразмерная величина, характеризует способность магнетика усиливать или ослаблять внешнее МП, численно равна $\mu = \frac{B}{B_0}$, B_0 – внешнее МП, B – результирующее поле в веществе.

Магнитная восприимчивость вещества χ – физическая безразмерная величина, характеризует способность магнетика реагировать на внешнее МП, связанная с магнитной проницаемостью уравнением $\mu = \chi + 1$.



Парамагнетик (1) и диамагнетик (2) в неоднородном магнитном поле

Закон полного тока для МП в веществе

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 (I_{\text{макро}} + I_{\text{микро}})$$

$$I_{\text{микро}} = \oint_L \vec{J} d\vec{l}$$

Микротоки определяются намагниченностью вещества в той области, которая очерчена контуром L :

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{макро}} + \mu_0 \oint_L \vec{J} d\vec{l}$$

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} - \mu_0 \oint_L \vec{J} d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{макро}}$$

$$\oint_L (\vec{B} - \mu_0 \vec{J}) d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{макро}} \quad (: \mu_0)$$

$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} \right) = I_{\text{макро}}$$

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

Напряженность МП – физическая векторная величина, которая характеризует МП, создаваемое только макротоками, она численно равна

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} \quad [\text{H}] = 1 \text{ А/м}$$

Очевидно, что вектор намагниченности вещества зависит от внешнего МП.

$$\vec{J} = \chi \vec{H}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \chi \vec{H} \quad , \text{ здесь } \chi - \text{ магнитная восприимчивость вещества,}$$

характеризует свойства магнетика, способность реагировать на внешнее МП.

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H}$$

$1 + \chi = \mu$ - связь между χ и μ .

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

Используя (*), окончательно получим $\oint_L \vec{H} d\vec{l} = I_{\text{макро}}$

Математическая формулировка закона полного тока (теоремы о циркуляции вектора напряженности МП): циркуляция вектора напряженности МП вдоль произвольного замкнутого контура равна алгебраической сумме макротоков, охватываемых данным контуром L .

Физический смысл закона: магнитное поле создается электрическими токами (движением электрических зарядов).

Выводы:

1. МП действует с силой на движущиеся заряды, а следовательно, и на проводники с током. Круговой ток под действием силы Ампера стремится развернуться в МП таким образом, чтобы его вектор магнитного момента совпал с вектором магнитной индукции внешнего МП. При этом контур всегда разворачивается до того

положения, в котором его пронизывает максимальный магнитный поток, а его потенциальная энергия становится минимальной.

2. МП в веществе обусловлено существованием микротоков.
3. При внесении любого магнетика во внешнее МП вследствие прецессии Лармора всегда создается дополнительный магнитный момент по всему объему вещества, который приводит к ослаблению внешнего МП (этот дополнительный магнитный момент всегда направлен против внешнего МП). Это явление диамагнетизма, оно присуще всем веществам.
4. Парамагнетизм обусловлен существованием собственных магнитных моментов, которые в отсутствие внешнего МП скомпенсированы (суммарный магнитный момент равен нулю). При внесении во внешнее МП собственные магнитные моменты ориентируются по внешнему полю, что приводит к усилению магнитного поля в веществе.
5. Ферромагнетизм обусловлен существованием доменов. При внесении магнетика во внешнее МП границы доменов начинают «растягиваться», захватывая все новые области. Магнитные моменты по всему объему ориентируются по внешнему МП. В результате это приводит к резкому усилению внешнего МП. Особые свойства ферромагнетиков отражаются на графике под названием петля гистерезиса (запаздывания). Свойства ферромагнетика явно зависят от температуры и при увеличении ее может быть достигнута точка Кюри, выше этой температуры ферромагнетик теряет свои свойства, становится парамагнетиком.