

ЛЕКЦИЯ 8

2 апреля 2013г.

Электромагнетизм

План лекции

1. Намагниченность. Напряженность магнитного поля.
2. Теорема о циркуляции вектора \vec{H} .
3. Связь между векторами \vec{J} и \vec{H} . Виды магнетиков.
4. Ферромагнетики. Петля гистерезиса.
5. Условия на границе двух магнетиков.
6. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле.
7. Явление электромагнитной индукции. Природа ЭДС индукции.

Намагниченность. Напряженность магнитного поля

Если несущие ток проводники находятся в некоторой среде (не в вакууме) или если в магнитное поле внести вещество, магнитное поле изменится.

Причина: всякое вещество является *магнетиком*, т.е. способно под действием магнитного поля приобретать магнитный момент (намагничиваться).

Намагниченное вещество создает свое магнитное поле \vec{B}' .

Результирующее поле: $\vec{B} = \vec{B}' + \vec{B}_0$

\vec{B}_0 - поле токов проводимости.

Характеристика степени намагничивания магнетика - *магнитный момент единицы объема* \mathbf{J} .

Намагниченность. Напряженность магнитного поля

$$\vec{J} - \text{вектор.} \quad \vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum \vec{p}_m$$

где ΔV - бесконечно малый объем, \vec{p}_m - магнитный момент отдельной молекулы. Суммируются все молекулы в объеме ΔV .

Намагниченность можно представить как
$$\vec{J} = n \langle \vec{p}_m \rangle$$

где n - концентрация молекул, $\langle \vec{p}_m \rangle$ - средний магнитный момент одной молекулы.

Вектор \vec{J} сонаправлен со средним вектором $\langle \vec{p}_m \rangle$.

Намагниченность. Напряженность магнитного поля

В теореме о циркуляции вектора \vec{B} необходимо учитывать молекулярные токи:

$$\oint_L (\vec{B}, d\vec{l}) = \mu_0 (I + I')$$

I и I' - токи проводимости и молекулярные токи, охватываемые контуром L .

Вычисление токов I' - задача сложная.

Выход: вводится новый параметр - *напряженность магнитного поля* \vec{H} .

Намагниченность. Напряженность магнитного поля

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}$$

Теорема о циркуляции вектора \vec{H} :

Циркуляция вектора \vec{H} по произвольному замкнутому контуру равна алгебраической сумме токов проводимости, охватываемых этим контуром:

$$\oint (\vec{H}, d\vec{l}) = I$$

Введение вектора \vec{H} , как и вектора \vec{D} в электростатике, упрощает изучение поля в различных средах.

Единица измерения \vec{H} - ампер на метр (А/м).

В вакууме $\vec{J} = 0$ и $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$

Связь между векторами \vec{J} и \vec{H} . Виды магнетиков

$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}$ Намагниченность \vec{J} зависит от величины магнитного поля:

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

χ - магнитная восприимчивость вещества (безразмерная величина, характерная для каждого магнетика).

Подставим эту формулу ($\vec{J} = \chi \vec{H}$) в выражение \vec{H} ,

получим
$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \chi \vec{H}$$

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

Безразмерная величина $1 + \chi = \mu$ - **относительная магнитная проницаемость** вещества.

С учетом относительной магнитной проницаемости -
$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$$

Связь между векторами \vec{J} и \vec{H} . Виды магнетиков

В зависимости от знака и величины магнитной восприимчивости χ все магнетики подразделяются на три группы:

- **диамагнетики.** У диамагнетиков χ отрицательна и мала по абсолютной величине. Вектор \vec{J} диамагнетиков имеет направление, обратное направлению вектора \vec{H} ($\vec{J} \uparrow \downarrow \vec{H}$);
- **парамагнетики.** χ парамагнетиков положительна и тоже мала по абсолютной величине. Вектор \vec{J} парамагнетиков имеет направление, совпадающее с направлением вектора \vec{H} ($\vec{J} \uparrow \uparrow \vec{H}$);
- **ферромагнетики.** χ положительна и по абсолютной величине достигает очень больших значений.

Диа- и парамагнетики слабомагнитные вещества, для них $\vec{J} = \chi \vec{H}$.

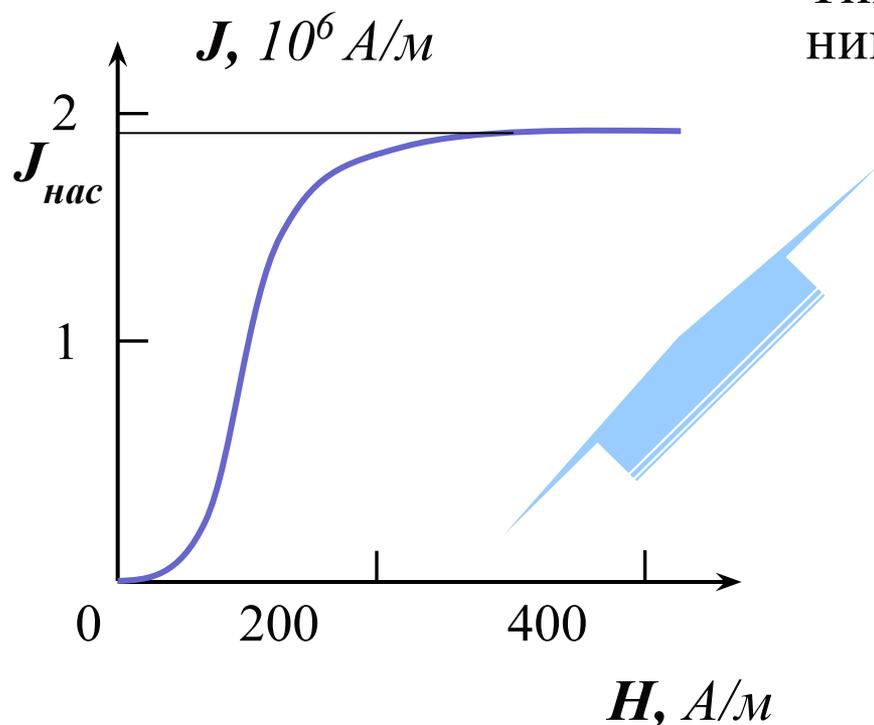
В отсутствие магнитного поля они не намагничены.

У ферромагнетиков магнитная восприимчивость сложным образом зависит от \vec{H} .

Ферромагнетики. Петля гистерезиса.

Ферромагнетики - твердые вещества, обладающие *спонтанной намагниченностью* (могут быть намагничены при отсутствии внешнего магнитного поля).

Типичные представители - железо, никель, кобальт, их сплавы.

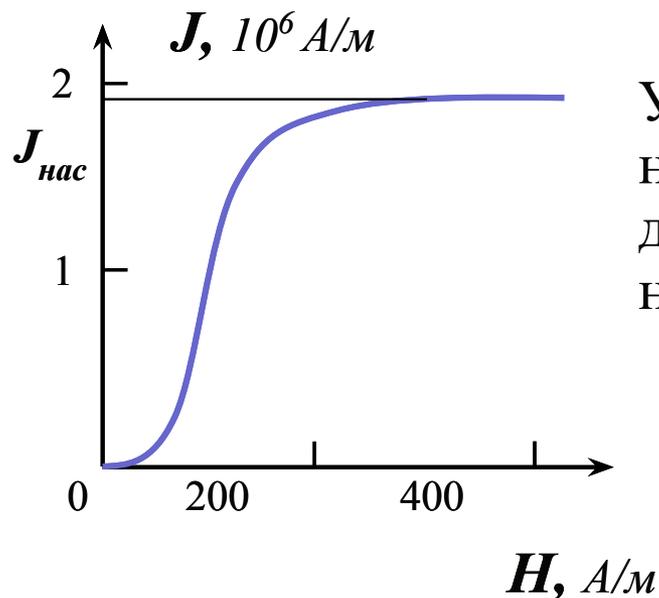


Намагниченность ферромагнетиков до 10^{10} раз превосходит намагниченность диа- и парамагнетиков.

Кривая намагниченности ферромагнетиков — это зависимость $J(H)$.

Основная или нулевая кривая, т.е. зависимость для ферромагнетика, магнитный момент которого первоначально был равен нулю

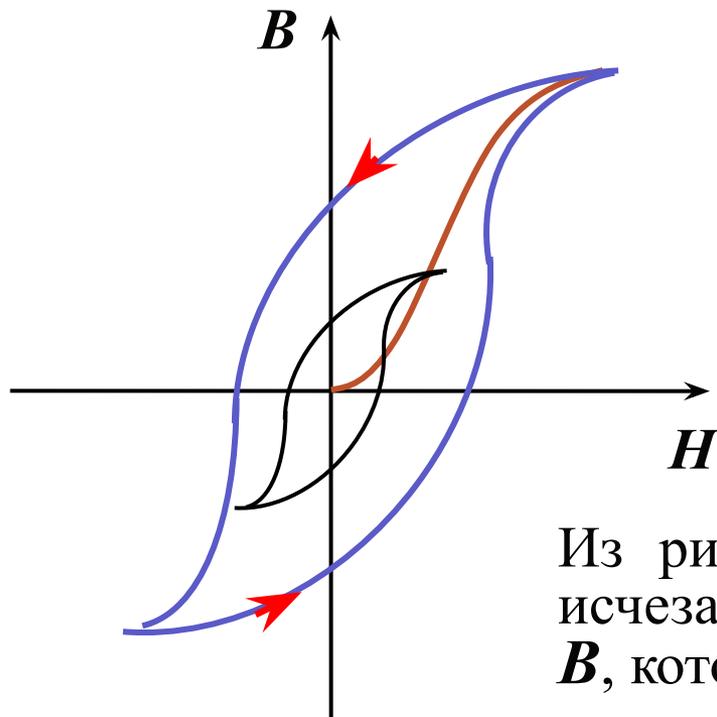
Ферромагнетики. Петля гистерезиса.



Уже при небольших полях кривая намагниченности достигает насыщения $J_{нас}$, дальнейший рост поля H не увеличивает намагниченность J .

Кроме того, для ферромагнетиков характерно наличие *петли гистерезиса*: связь между B и H или J и H оказывается неоднозначной и определяется предшествующей историей намагничивания ферромагнетика.

Ферромагнетики. Петля гистерезиса.



Если первоначально ненамагниченный ферромагнетик намагничивать, а затем уменьшать H , то кривая намагничивания образует петлю.

Это **петля гистерезиса**.

Из рисунка: при $H = 0$ намагничивание не исчезает, а характеризуется некоторой величиной B , которая называется **остаточной индукцией**.

С наличием остаточного намагничивания связано существование постоянных магнитов.

Точка Кюри (температура Кюри) - температура при которой ферромагнетик теряет свою намагниченность, 300- 700 С.

Условия на границе двух магнетиков

При переходе магнитного поля через границу раздела двух сред векторы \vec{B} и \vec{H} скачкообразно меняются по величине и направлению. Соотношения, характеризующие эти изменения, называют **граничными условиями**. Таких условий четыре.

**Далее -
самостоятельно!**

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

Если проводник с током перемещается в магнитном поле, то сила Ампера совершает работу. Определим величину этой работы.

Пусть элемент тока $I d\vec{l}$ перемещается в магнитном поле с индукцией \vec{B} на расстояние $d\vec{r}$.

Действующая на элемент тока сила Ампера $\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}]$ совершает работу:

$$dA = (\vec{F}, d\vec{r})$$

Подставим выражение для силы Ампера. После преобразований:

$$dA = I d\Phi_B$$

$d\Phi_B = B_n dS$ - магнитный поток через поверхность dS .

Это выражение для работы силы Ампера по перемещению в магнитном поле элемента тока.

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

Работа по перемещению произвольного контура с током в постоянном однородном или неоднородном магнитном поле:

$$A = \int_1^2 I d\Phi_B = I(\Phi_{B_2} - \Phi_{B_1})$$

Работа, совершаемая силой Ампера при перемещении замкнутого контура с током в магнитном поле, равна произведению силы тока на изменение магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром.

Явление электромагнитной индукции

Электрические токи создают вокруг себя магнитные поля.

Иначе, существует связь магнитного поля с током.

Магнитные поля в свою очередь должны вызывать протекание тока в проводниках.

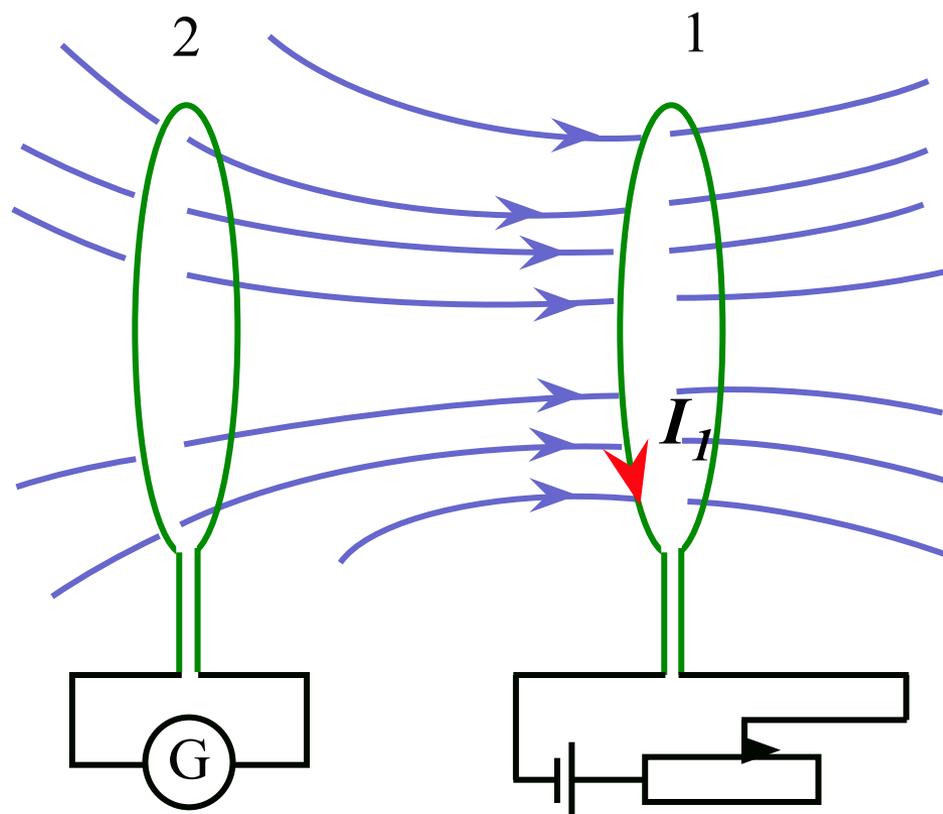
1831 год - открытие явления электромагнитной индукции (английский физик Фарадей).

Суть явления электромагнитной индукции:

в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, охватываемого этим контуром, возникает электрический ток.

Этот ток назван *индукционным*.

Явление электромагнитной индукции



Опыты Фарадея — два контура.

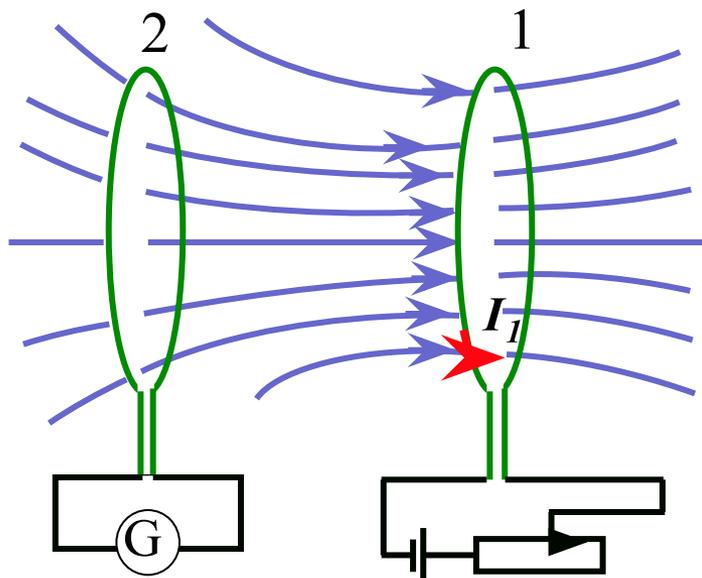
В первом ток регулировался реостатом.

Во второй контур включен гальванометр.

Ток в первом контуре создает магнитное поле, пронизывающее контур 2.

Явление электромагнитной индукции

Два способа наблюдения индукционного тока:

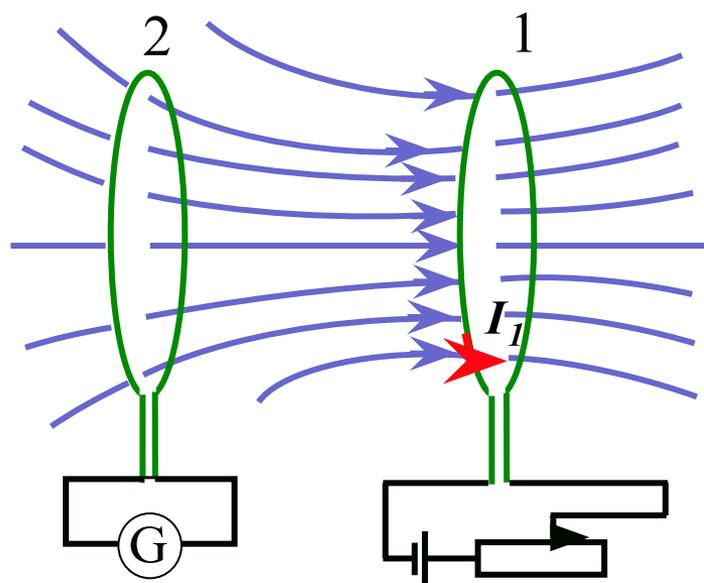


Способ 1. Контуры неподвижны. С увеличением тока I_1 растет поток магнитной индукции через контур 2.

В контуре 2 появляется индукционный ток I_2 , который регистрируется гальванометром G .

Уменьшение тока вызовет убывание магнитного потока через контур 2. В этом контуре появится индукционный ток противоположного направления.

Явление электромагнитной индукции



Способ 2. Один из контуров поворачивается или перемещается относительно другого так, чтобы менялся угол между нормалью контура 2 и направлением магнитного поля. $I_1 = const.$

Правило определения направления индукционного тока (правило Ленца):

Индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине, его вызывающей.

Явление электромагнитной индукции

Появление индукционного тока означает, что при изменении магнитного потока в контуре возникает *ЭДС индукции*.

Магнитным потоком Φ_B называется поток вектора магнитной индукции:

$$\Phi_B(t) = \int_S (\vec{B}(t), d\vec{S})$$

Опыт показывает, что возникающая в контуре ЭДС индукции \mathbf{E} пропорциональна скорости изменения магнитного потока через контур, т.е. пропорциональна производной $d\Phi_B(t)/dt$:

$$\mathbf{E} = - \frac{d\Phi_B(t)}{dt}$$

Явление электромагнитной индукции

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B(t)}{dt}$$

Это закон электромагнитной индукции (закон Фарадея).

Какова бы ни была причина изменения потока магнитной индукции, охватываемого замкнутым проводящим контуром, возникающая в контуре ЭДС определяется формулой

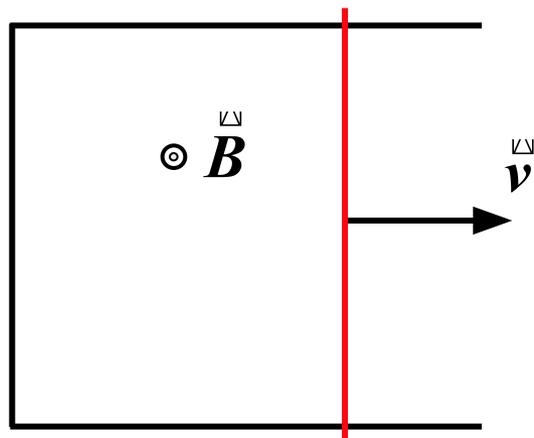
$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B(t)}{dt}$$

ЭДС электромагнитной индукции в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром.

Природа ЭДС электромагнитной индукции

Два способа получения индукционного тока: в постоянном магнитном поле перемещением или поворотом контуров и в переменном магнитном поле, когда контуры неподвижны. Рассмотрим природу электромагнитной индукции в этих двух случаях.

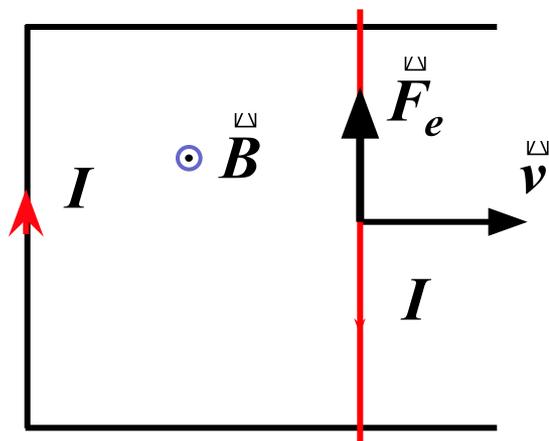
1. Контур движется в постоянном магнитном поле.



Пусть в контуре отсутствует источник ЭДС, тока нет.

Начнем двигать проводник с током вправо со скоростью \vec{v} . С такой же скоростью начнут двигаться вместе с проводником и носители тока – электроны.

Природа ЭДС электромагнитной индукции



В результате на каждый электрон вдоль перемычки начнет действовать магнитная сила (сила Лоренца) $\vec{F} = -e[\vec{v}, \vec{B}]$

Электроны начнут перемещаться – потечет ток.

На положительно заряженную частицу будет действовать сила, направленная вниз по проводнику, на электрон – вверх.

В рассматриваемом случае магнитная сила \vec{F} играет роль сторонней силы

Ей соответствует электрическое поле $\vec{E}^* = \vec{F} / (-e) = [\vec{v}, \vec{B}]$

Таким образом, возбуждение ЭДС индукции при движении контура в постоянном магнитном поле объясняется действием на носители заряда магнитной силы, которая возникает при движении проводника.

Природа ЭДС электромагнитной индукции

2. Контур покоится в переменном магнитном поле.

Если контур неподвижен, магнитная сила на заряды не действует.

Однако, индукционный ток возникает. Это свидетельствует о том, что переменное магнитное поле вызывает в контуре появление сторонних сил.

Какова природа этих сил?

Заставить покоящуюся заряженную частицу двигаться может только одна сила: qE .

Таким образом, остается предположить, что переменное магнитное поле каким-то образом приводит к появлению электрического поля, которым и обусловлен индукционный ток.

Природа ЭДС электромагнитной индукции

Максвелл предположил, что изменяющееся во времени магнитное поле приводит к появлению в пространстве электрического поля. Контур позволяет обнаружить электрическое поле по возникающему индукционному току.

Таким образом, причиной возникновения индукционного тока в покоем контуре в переменном магнитном поле является электрическое поле, порождаемое меняющимся во времени магнитным полем.

Свойство этого поля: оно способно перемещать заряды в замкнутом контуре, вызывая появление тока.

Линии напряженности такого электрического поля - замкнутые линии. Такое поле называется **вихревым**. Итак, *переменное магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.*