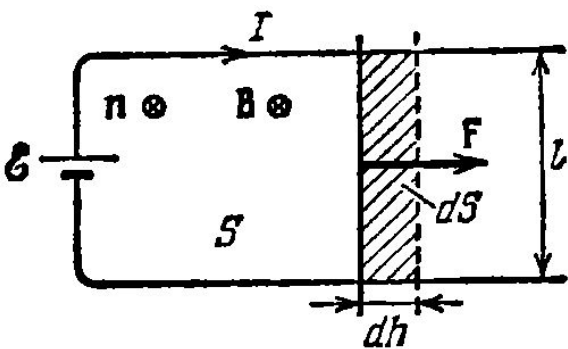


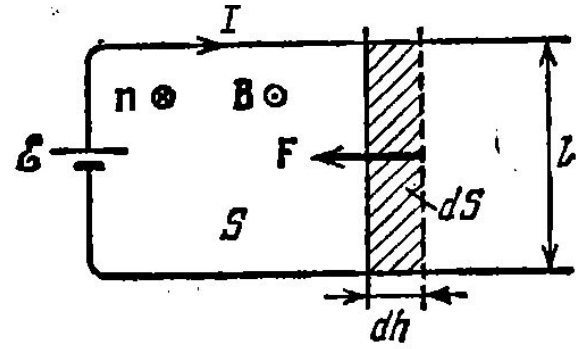
1. Протокол. Листочек с номерами вопросов и задач.
2. Графики – миллиметровка.
3. Выводы – у каждого свои.
4. Не Вы выбираете работу, а она Вас!
5. К аттестации (~02.11):  
Сделать 4 работы, Сдать 3 работы

# Работа по перемещению тока в МП



а)

$$F_A = IBl$$



б)

Контур с током образован неподвижными проводами и скользящей по ним перемычкой длины  $l$ .

$\mathbf{B}$  однородно и перпендикулярно плоскости тока.

Б

)

Перемещение перемычки вправо на  $dh$

$$dA = F_A dh = IBldh = IBdS$$

$$\Phi = \int \mathbf{Bn}dS = BS$$

$n$  - положительная нормаль

$$dA = -F_A dh = -IBldh = -IBdS$$

$$\Phi = \int \mathbf{Bn}dS = -BS$$

При перемещении перемычки поток получает положительное приращение  $dS$ , т.о.

$$d\Phi = Id$$

При перемещении перемычки поток получает отрицательное приращение  $dS$ , т.о.

$$dA = I\mathbf{Bn}dS$$

$$\Phi = \int IdA = I \int d = (\Phi_2 - \Phi_1)$$

# ***Магнитное поле в веществе***

# Намагничивание магнетика

Всякое вещество способно под действием внешнего магнитного поля приобретать магнитный момент, т.е. намагничиваться. Эти вещества называют **МАГНЕТИКОМ**. Такое вещество создает свое магнитное поле  $\mathbf{B}'$ , которое накладывается на внешнее  $\mathbf{B}_0$ :

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}'$$

**$B$  – магнитная индукция.**

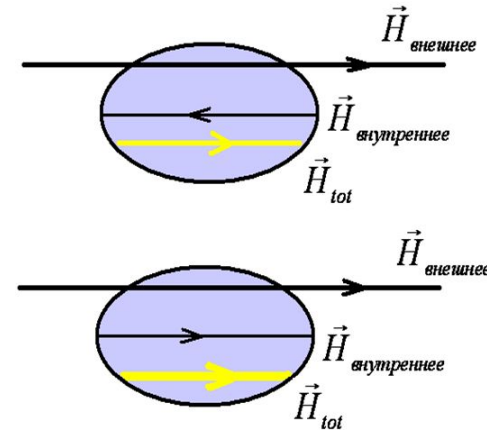
$$B \sim H, \quad B = \mu\mu_0 H$$

## Причина намагничивания тел (предположение Ампера)

Существование молекулярных токов (циркуляция круговых токов в молекулах вещества) наличие у каждого тока магнитного момента, создающего свое МП.

**Без внешнего МП:** молекулярные токи ориентированы произвольно, общее суммарное поле = 0.

**При наличии внешнего поля:** моменты молекул направленно ориентируются в пространстве, суммарный магнитный момент не равен 0.



# Намагниченность

Таким образом, вещество, помещенное во внешнее магнитное поле, приобретает дополнительный магнитный момент – **намагничивается**.

Количественная характеристика намагниченного состояния вещества – **намагниченность**, магнитный момент единицы объема вещества:

$$J = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n P_{mi}$$

Где  $P_{mi}$  – магнитный момент  $i$ -го атома из числа  $n$  атомов, содержащихся в объеме  $\Delta V$ .

**Намагниченность** изотропной среды пропорциональна **напряженности** внешнего магнитного поля:

$$J = \chi H$$

$\chi$  – **магнитная восприимчивость среды** – характеризует магнитные свойства вещества.

Безразмерная величина  $\mu = 1 + \chi$  – относительная магнитная проницаемость среды или просто магнитная проницаемость

# МАГНЕТИКИ

## ДИАМАГНЕТИКИ

вещества, намагничивающиеся против направления внешнего МП. В отсутствие внешнего МП диамагнетики немагнитны.  
 $|\chi_M| \sim 10^{-11} \text{ м}^3/\text{моль}$

## ПАРАМАГНЕТИКИ

вещества, которые намагничиваются в направлении внешнего магнитного поля. Относятся к слабомагнитным веществам.  
 $|\chi_M| \sim 10^{-10} \text{ м}^3/\text{моль}$

## ФЕРРОМАГНЕТИКИ

Сильномагнитные вещества.  
 $|\chi_M| \sim 1 \text{ м}^3/\text{моль}$

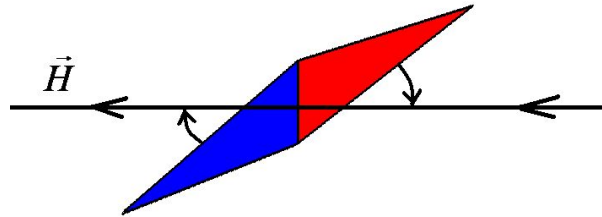


# Магнитный момент

Силовое действие внешнего магнитного поля на магнит тем больше, чем выше напряженность магнитного поля  $H$ .

Однако сила, с которой действует магнитное поле на различные магниты, помещенные поочередно в одну и ту же точку поля, оказывается различной – она зависит от магнитных качеств самого магнита. Магнитные качества магнита (или магнетика) определяет **магнитный момент** (или магнитный дипольный момент).  $\mathbf{p}_m = IS\mathbf{n}$

*Поведение магнитной стрелки в магнитном поле:*



Стрелка ориентируется вдоль поля и занимает устойчивое положение равновесия – потенциальная энергия минимальна.

За единицу магнитного момента принимают **магнитный момент ( $\text{Ам}^2$ )** такого магнита, для поворота оси которого на  $90^\circ$  от направления поля напряженностью в 1 эрстед ( $79,5 \text{ А/м}$ ) требуется затратить работу, равную одному эргу ( $10^{-7} \text{ Дж}$ ).

# Орбитальный ток

Электрон, движущийся по орбите в атоме эквивалентен замкнутому контуру с **орбитальным током**:

$$I = \frac{e}{t},$$

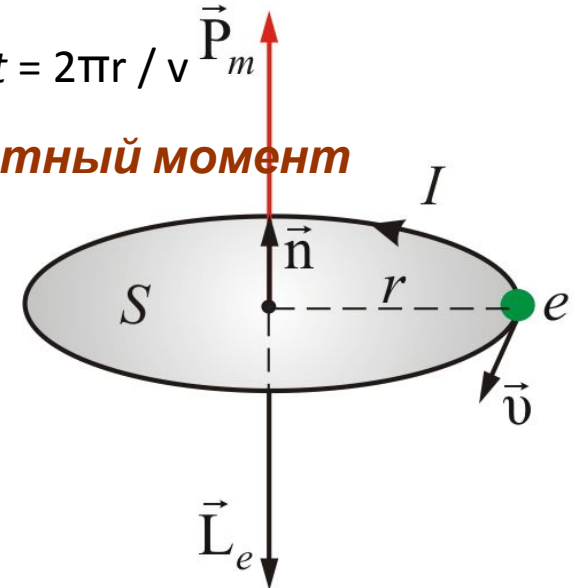
где  $e$  – заряд электрона, время его вращения по орбите:  $t = 2\pi r / v$

Орбитальному току соответствует **орбитальный магнитный момент электрона**

$$p_m = IS = \frac{e\pi r^2 v}{2\pi r} = \frac{evr}{2}$$

$S$  – площадь орбиты

$v$  – скорость электрона



Электрон, движущийся по орбите имеет **орбитальный момент импульса**  $mvr$  который имеет противоположное направление по отношению к  $P_m$ .

Отношение магнитного момента к механическому (моменту импульса) – называется **гиромагнитным отношением**:

$$\frac{p_m}{L_e} = \gamma = -\frac{e}{2m}$$



# Магнитомеханические явления

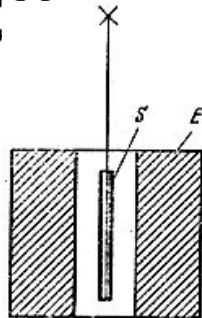
1. Намагничивание магнетика приводит к его вращению

*Экспериментально подтвердили  
Эйнштейн и де Хаас*

При намагничивании стержня из магнетика, магнитные моменты е устанавливаются по полю, а механические против него. Возникает суммарный механический момент электронов  $\sum M_i$ .

Момент импульса системы «стержень-электроны» должен остаться постоянным. Возникает момент импульса стержня  $-\sum$  он приходит во вращение!

$$\gamma = -\frac{e}{m}$$



2. Вращение магнетика приводит к его намагничению

*Экспериментально подтвердил  
Барнетт*

Приводил железный стержень в очень быстрое вращение вокруг оси и измерял возникающее при этом намагничение.

$$\gamma = -\frac{e}{m}$$

**У е существует собственный механический (спин) и магнитный (спиновый) момент!!! – это неотъемлемые свойства е!!!**

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad M_{se} = \frac{\hbar}{2} \quad p_{\text{вн}e} = -\frac{e\hbar}{2m} = -\mu$$

# Электрон в магнитном поле. Диамagnetизм

В магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$  на электрон, движущийся по орбите, эквивалентной замкнутому контуру с током, действует момент сил:

$$\mathbf{M} = [\mathbf{p}_m \mathbf{B}]$$

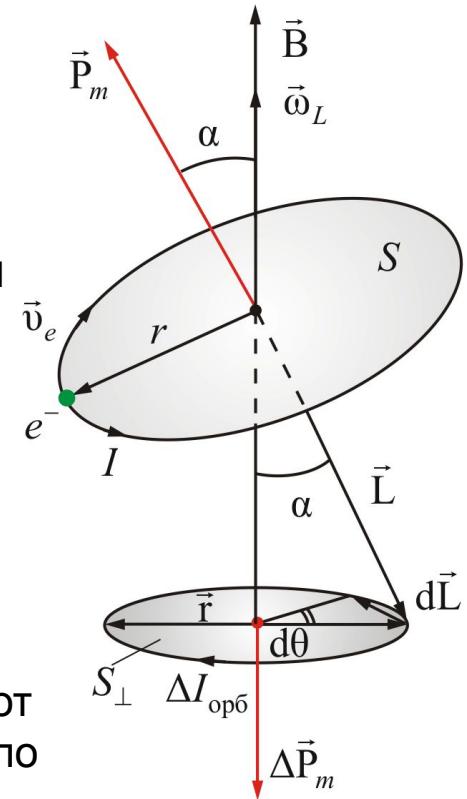
Этот момент сил стремится установить орбитальный магнитный момент электрона по направлению поля. При этом механический момент импульса направлен против поля.

Под действием момента  $\mathbf{M}$  векторы  $\vec{P}_m$  и  $\vec{L}$  совершают прецессию вокруг направления вектора магнитной индукции.

Это Ларморовская прецессия:

$$\vec{\omega}_L = \frac{e}{2m} \vec{B}$$

Угловая скорость прецессии зависит только от индукции магнитного поля и совпадает с ней по направлению.



**Теорема Лармора.** Для отдельной частицы или множества частиц справедлива теорема: если на систему частиц, обладающих одинаковым отношением электрического заряда к массе, наложить постоянное магнитное поле  $\vec{B}$ , то магнитные моменты этих частиц  $\vec{P}_{\text{магн}}$  будут прецессировать относительно поля  $\vec{B}$  с частотой

# Дополнительный орбитальный ток.

Прецессия орбиты электрона в атоме приводит к появлению дополнительного орбитального тока, направленного противоположно току  $I$

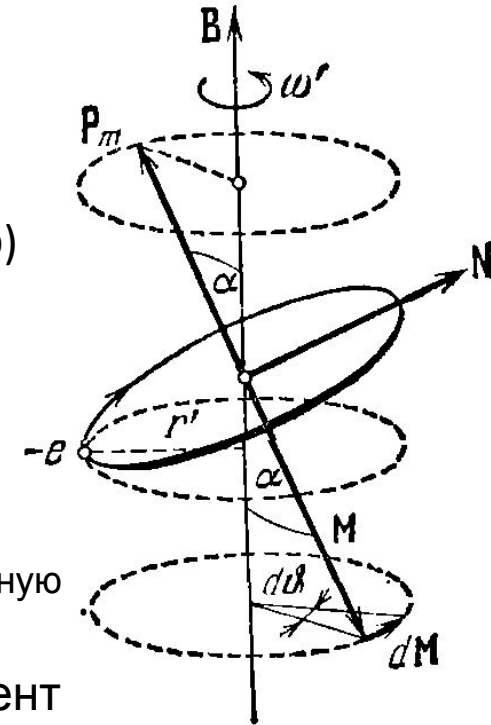
$$\Delta I_{орб} = e \frac{\omega_L}{2\pi}$$

и соответствующего ему наведенного (индуцированного) орбитального магнитного момента  $\Delta P_m$

$$\Delta P_{орб} = -\Delta I S_{\perp} = -\frac{e^2 S_{\perp}}{4\pi m} B$$

где  $S_{\perp}$  – площадь проекции орбиты электрона на плоскость, перпендикулярную вектору.

Знак минус говорит, что наведенный магнитный момент противоположен вектору магнитной индукции.



1. Под действием внешнего МП происходит прецессия электронных орбит с ларморовской частотой.
2. В следствии прецессии возникает наведенный орбитальный момент.
3. Если у атомов есть собственный магнитный момент, внешнее магнитное поле еще и ориентирует их по направлению поля, при этом возникающий положительный момент (по полю) может быть больше наведенного и магнетик ведет себя как парамагнетик.

# Диамagnetизм (есть во всех магнетиках)

**Диамagnetизм** (от греч. *dia* – расхождение) – свойство веществ намагничиваться против приложенного магнитного поля.

**Диамagnetиками называются вещества, магнитные моменты атомов которых в отсутствии внешнего поля равны нулю, т.к. магнитные моменты всех электронов атома взаимно скомпенсированы** (например инертные газы, водород, азот, NaCl, Bi, Cu, Ag, Au и др.).

При внесении диамagnetического вещества в магнитное поле его атомы приобретают наведенные магнитные моменты  $\Delta P_m$  **направленные противоположно вектору** .

**Вектор магнитной индукции собственного магнитного поля**  $\vec{B}_{внутр}$  , создаваемого диамagnetиком при его намагничивании во внешнем поле , **направлен в сторону**  $\vec{B}_{внеш}$  **противоположную**  $\chi < 0$  . Поэтому

$|\chi_M| \sim 10^{-11}$  м<sup>3</sup>/моль – магнитная восприимчивость среды.

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \approx 1$$

- магнитная проницаемость диамagnetика.

# Парамагнетизм

**Парамагнетизм** (от греч. *para* – возле) – свойство веществ во внешнем магнитном поле намагничиваться в направлении этого поля.

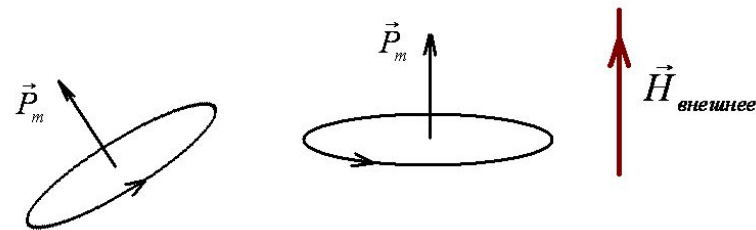
Внутри парамагнетика к действию внешнего поля прибавляется действие наведенного внутреннего поля.

**Парамагнетиками** - вещества, атомы которых имеют в отсутствие внешнего магнитного поля, отличный от нуля магнитный момент  $\vec{p}_m$ .

Эти вещества намагничиваются в направлении вектора  $\vec{H}_{внешн}$ .

Наличие магнитного момента, отличного от нуля свидетельствует о том, что в парамагнетике изначально текут круговые токи. Под действием внешнего магнитного поля они ориентируются так, что их плоскости перпендикулярны направлению поля.

В отсутствие внешнего магнитного поля **намагниченность парамагнетика  $J = 0$** , так как векторы  $\vec{p}_m$  разных атомов ориентированы беспорядочно из-за теплового движения.



$$\chi > 0$$

$$\mu = \frac{B}{H} \geq 1$$

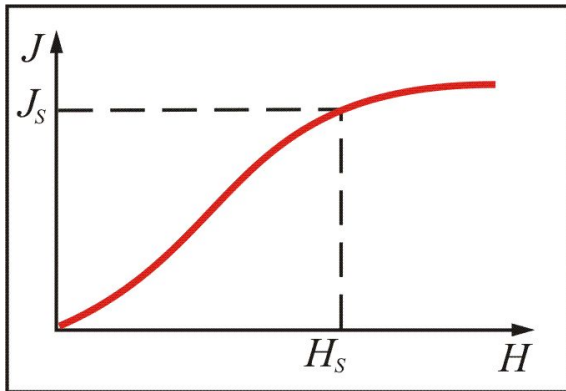
# Ферромагнетизм. Гистерезис. Д

**Ферромагнетики** – класс веществ, которые обладают собственным магнитным полем даже в отсутствие внешнего магнитного поля.

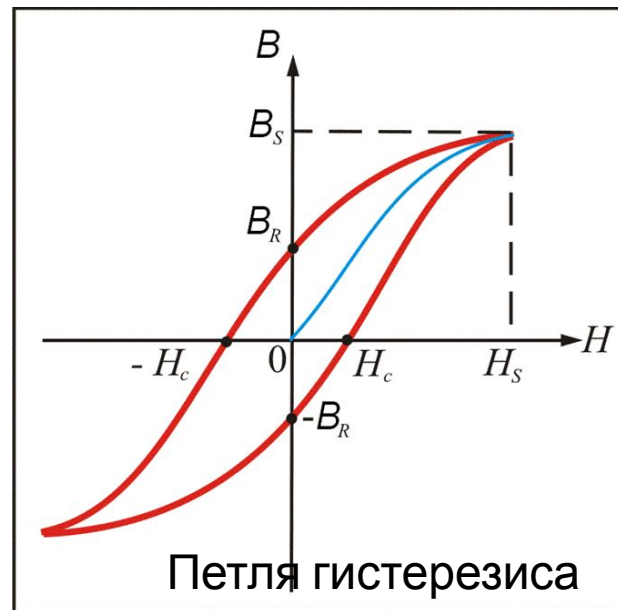
Намагниченность и магнитная индукция ферромагнетиков растут с увеличением напряженности магнитного поля нелинейно!

У ферромагнетиков магнитная восприимчивость положительна и очень велика

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \gg 1$$



Кривая намагничения ФМ, у которого первоначально  $P_m=0$ .



Петля гистерезиса

$B_s$  – индукция насыщения  
 $B_R$  – остаточная индукция  
 $H_c$  – коэрцитивная сила.

Синяя кривая – основная или нулевая кривая намагничения

**Напряженность  $H_c$**  магнитного поля, полностью размагниченного ферромагнетика, называется **коэрцитивной силой**.

Она характеризует способность ферромагнетика сохранять намагниченное состояние.

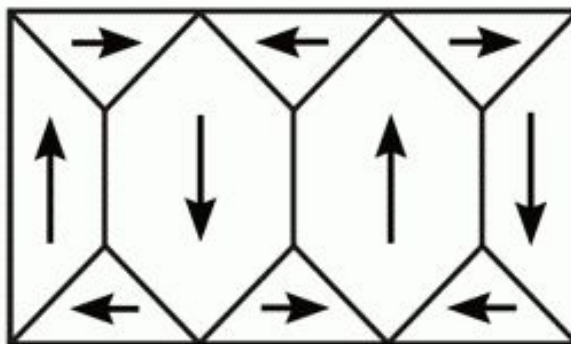
# Доменная структура ферромагнетика

Электрон как квантовый объект обладает собственным механическим и магнитным моментами. Эти магнитные моменты взаимодействуют между собой в пределах монообластей – доменов.

Это приводит к самопроизвольному намагничиванию доменов.

Весь большой исходный кусок железа разбит на множество очень маленьких ( $10^{-2} \div 10^{-3}$  см), полностью намагниченных областей – доменов.

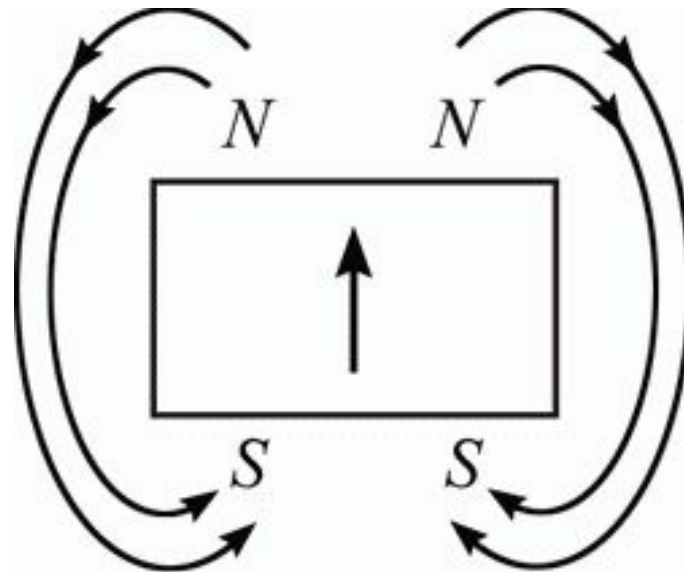
Векторы намагниченности доменов в отсутствие внешнего магнитного поля ориентированы произвольно, поэтому полный магнитный момент ферромагнитного материала равен нулю.



Разбиение на доменные структуры соответствует минимуму свободной энергии куска ферромагнетика.

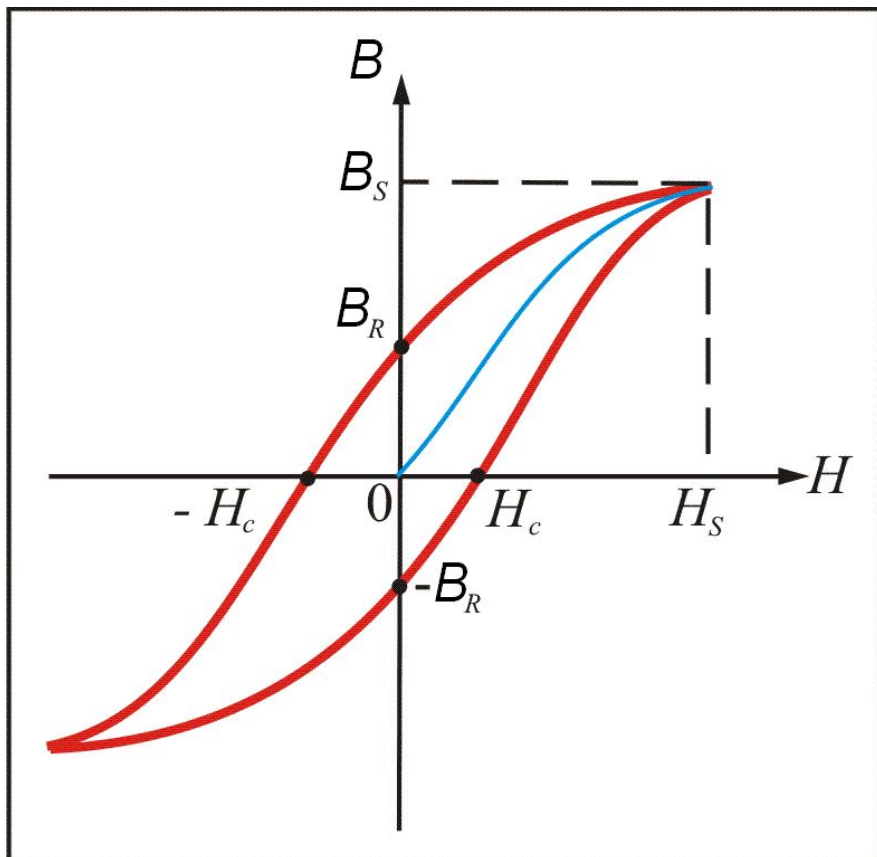
Во внешнем магнитном поле в ферромагнетике начинается движение доменных стенок. Они перемещаются так, чтобы областей с ориентацией вектора намагниченности по полю стало больше, чем областей с противоположной ориентацией.

Такое движение доменных стенок понижает энергию ферромагнетика во внешнем магнитном поле. По мере нарастания магнитного поля весь кристалл превращается в один большой домен с магнитным моментом, ориентированным по полю.





# Явление гистерезиса. Петля гистерезиса



$B_S$  – индукция насыщения

$B_R$  – остаточная индукция

$H_c$  – коэрцитивная сила.

Синяя кривая – основная или нулевая кривая намагничения

**Напряженность  $H_c$**  магнитного поля, полностью размагниченного ферромагнетика, называется **коэрцитивной силой**.

Она характеризует способность ферромагнетика сохранять намагниченное состояние.

Большой коэрцитивной силой (широкой петлей гистерезиса) обладают **магнитотвердые магнетики**, используемые для изготовления постоянных магнитов. Малую коэрцитивную силу имеют **магнитомягкие магнетики** (используются для изготовления трансформаторов). В последних малы энергетические потери на перемагничивание.

**Демонстрация явления гистерезиса**

***Явление  
электромагнитной  
индукции***

# Квазистационарное электромагнитное поле

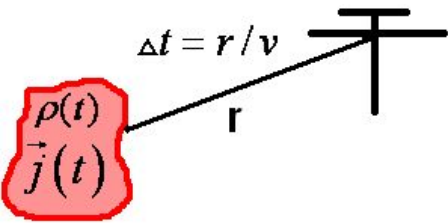
- Переменные электромагнитные поля вызываются переменными источниками:  $\rho(t)$ ,  $\vec{j}(t)$
- В этом случае  $\frac{d}{dt} \neq 0$
- Действует концепция близкодействия.

$$\Delta t = \frac{r}{v}$$

Скорость переноса возмущения определяется свойствами среды.

При изучении квазистационарных полей временем задержки будем пренебрегать по сравнению с периодом изменения в источнике.

$$\Delta t \ll T$$



**Концепция дальнодействия:**  
изменения в полях мгновенно следуют за изменениями в источнике.

**Представители:**

закон Кулона,

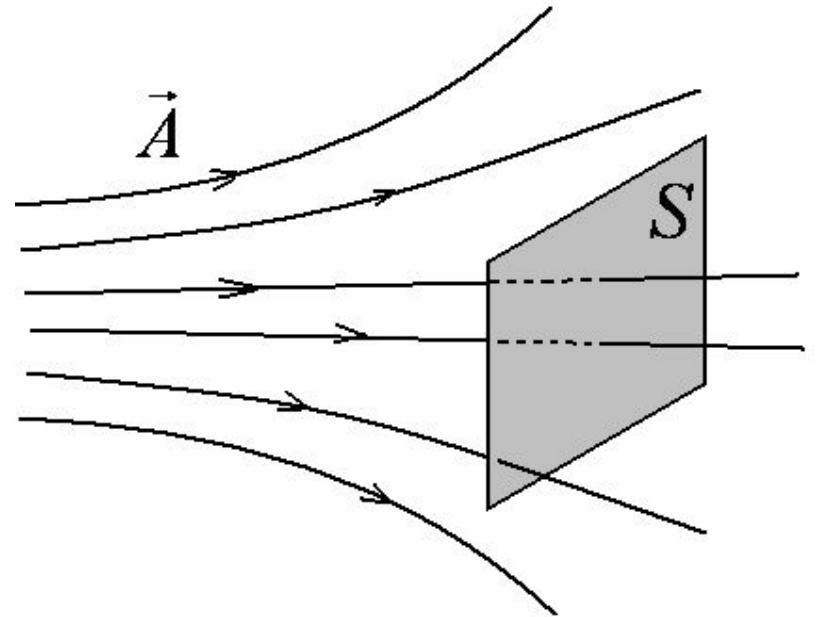
закон Био-Савара-Лапласа.

**Концепция близкодействия:**  
изменения в полях запаздывают по сравнению с изменениями в источнике на время, необходимое для переноса возмущения от источника к приемнику.

# Понятие магнитного потока

Поток вектора любого поля: 
$$\Phi = \int_S \vec{A} dS$$

$\Phi$  - поток вектора  $\vec{A}$  через замкнутую поверхность  $S$

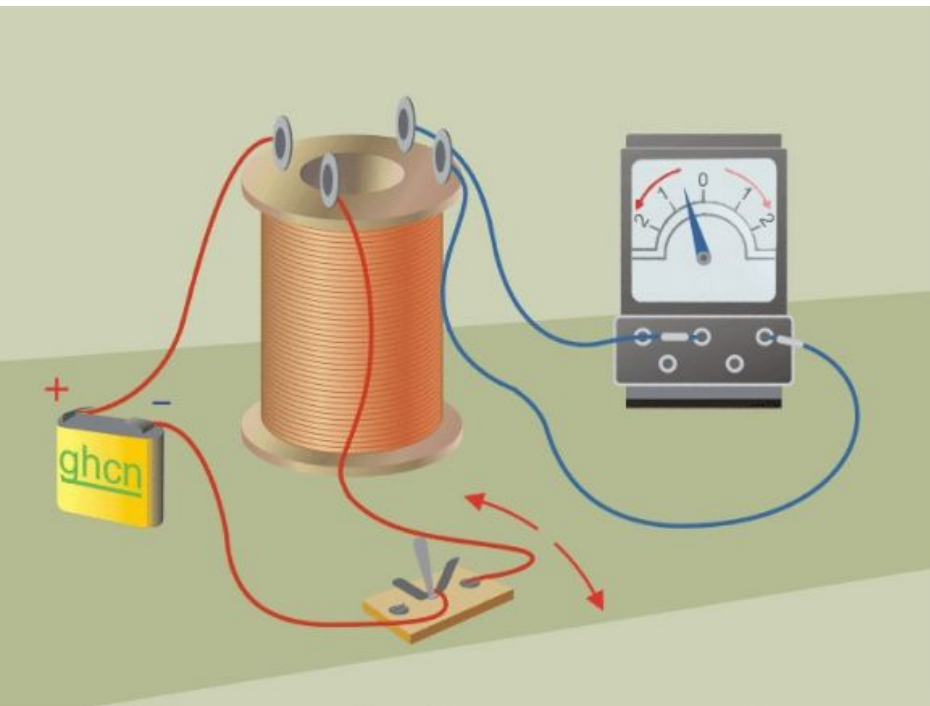


Для магнитного потока: 
$$\Phi = \int_S \mu_0 \vec{H} dS$$

**Поток вектора какого-либо поля – это количество линий поля, пересекающих замкнутую поверхность**

# Опыт Фарадея

1831 г. Фарадей обнаружил, что в замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток. Это явление называют **электромагнитной индукцией**, а ток – **индукционным**.



Опыт Фарадея.

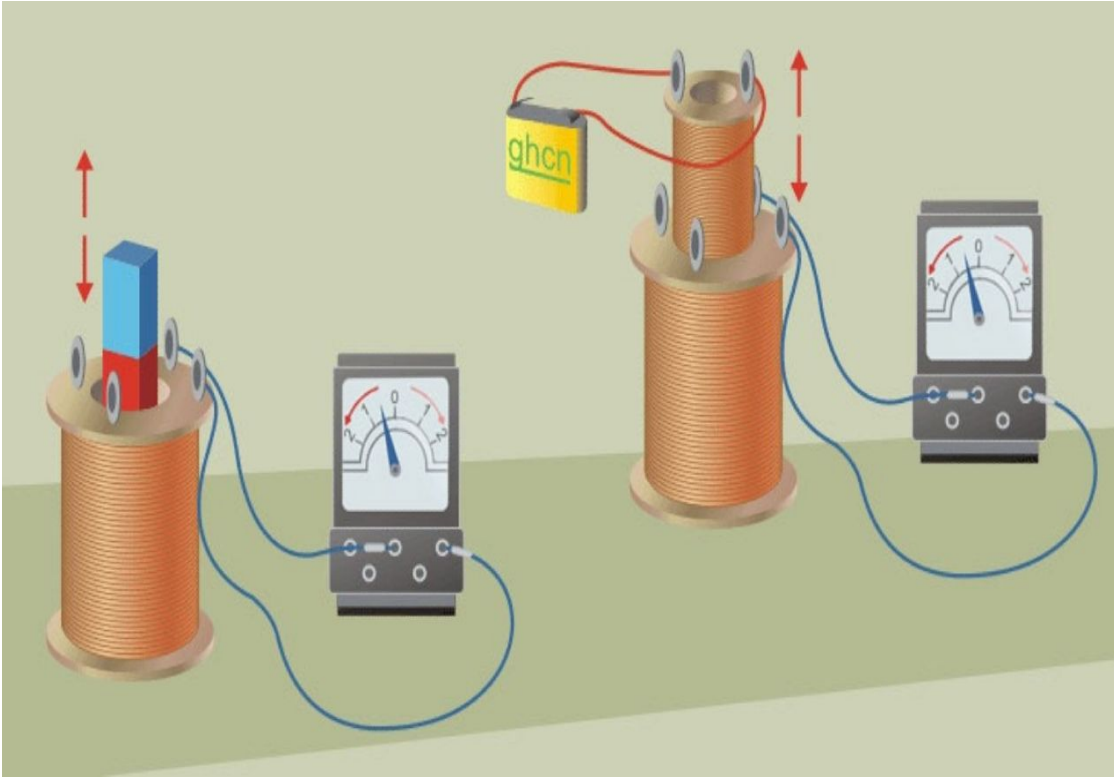
Электрический ток создает вокруг себя магнитное поле. А возможно ли обратное явление, когда магнитное поле является источником электрического тока?

Положительный ответ на этот вопрос удалось получить М. Фарадею 29 августа 1831 года, когда он обнаружил явление **электромагнитной индукции**. Сам Фарадей так описывал свое открытие: «На широкую деревянную катушку была намотана медная проволока и между витками ее намотана проволока, изолированная от первой хлопчатобумажной нитью. Одна из этих спиралей была соединена с гальванометром, а другая - с сильной батареей. При замыкании цепи удавалось заметить внезапное действие на гальванометре, и то же самое замечалось при прекращении тока».

**Демонстрация опыта**

# Явление электромагнитной индукции

Индукционный ток возникает в контуре независимо от того, каким образом там меняется магнитное поле.



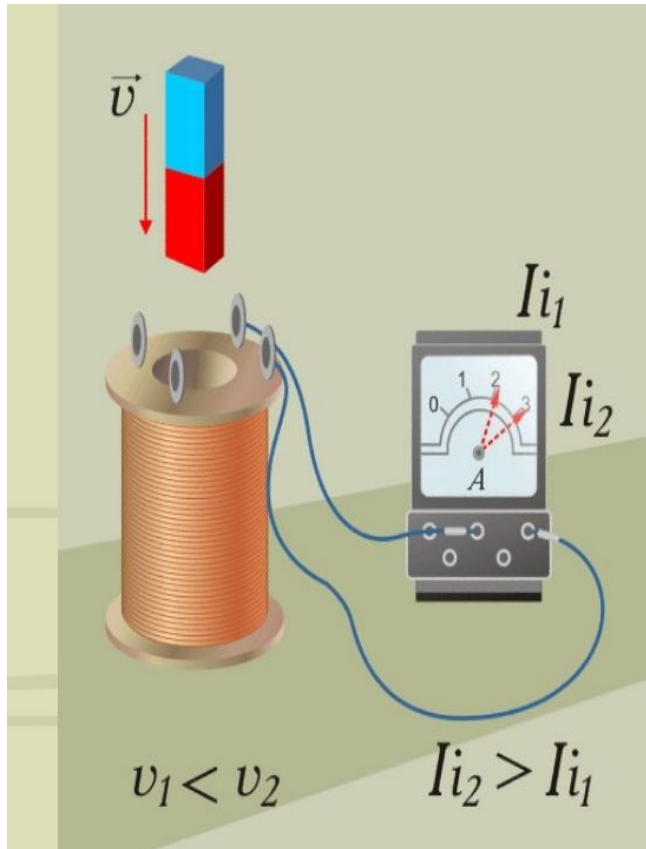
Способы изменения  
поля:

1. Перемещаем проводник с током;
2. Меняем поле с помощью постоянного магнита;
3. Перемещаем сам контур или изменяем его площадь.

**меняем магнитный поток!!!**

**при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего площадь замкнутого контура, в этом контуре возникает индукционный электрический ток. Значит в контуре действует индуцированное электрическое поле и соответственно ЭДС.**

# Величина индукционного тока



Опыты показывают, что **величина индукционного тока** определяется скоростью изменения магнитного потока: чем быстрее изменяется магнитный поток, тем больше сила индукционного тока. Чем быстрее вдвигается или выдвигается магнит в катушку, тем быстрее изменяется магнитный поток, и тем больше сила индукционного тока.

Однако при одинаковой скорости и величине изменения магнитного потока индукционный ток в разных проводниках может отличаться, поскольку сопротивление проводников может быть различным.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

**Закон  
электромагнитной  
индукции Фарадея**

**ЭДС индукции в контуре равна по величине скорости изменения потока вектора напряженности магнитного поля, пронизывающего этот контур.**

# Правило Ленца

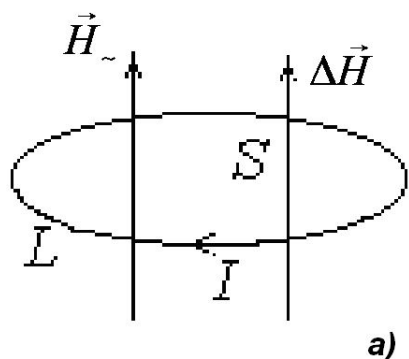
Закон электромагнитной индукции:  $\xi_i = -\frac{\Phi}{dt}$

Знак минус в этом законе выражает **правило Ленца**:

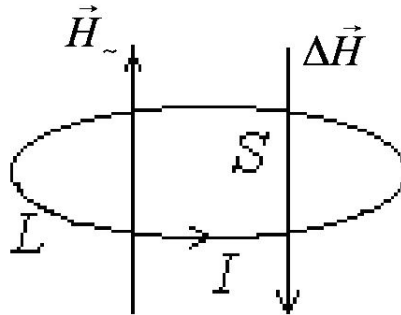
**Возникающий индукционный ток имеет такое направление, при котором он своим магнитным полем противодействует причине, его вызывающей.**

**Это означает, что индукционный ток всегда препятствует изменению магнитного потока.**

Правило Ленца позволяет легко определять направление индукционного тока по знаку изменения магнитного поля:

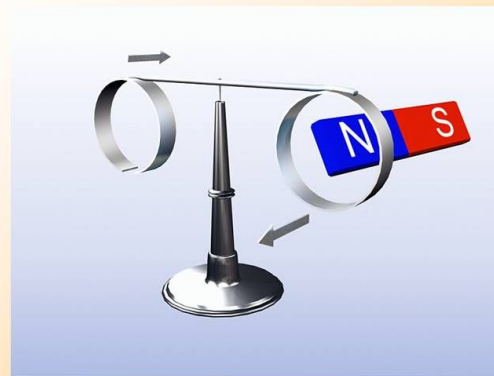


а)



б)

## Правило Ленца





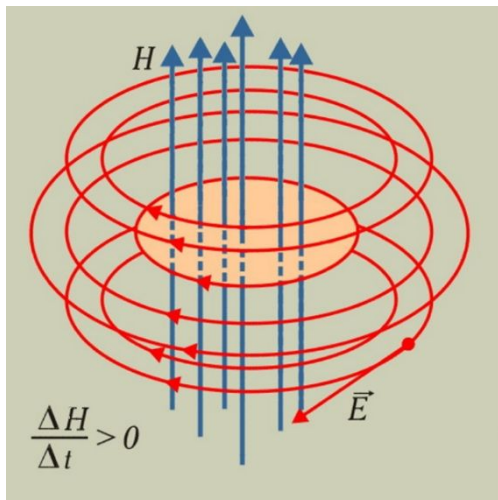
# Связь электрического и магнитного поля

$$\Phi(t) = \mu_0 \int_S \vec{H} d\vec{S}$$

$$\xi_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\mu_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{H} d\vec{S} = -\mu_0 \int_S \frac{d\vec{H}}{dt} d\vec{S}$$

$$\xi_i = \oint_L \vec{E} d\vec{l} \longrightarrow \oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\mu_0 \int_S \frac{d\vec{H}}{dt} d\vec{S}$$

Это фундаментальная связь **магнитного и электрического** поля: изменение магнитного поля в точке со временем вызывает возникновение и изменение электрического поля в пространстве !!!



Линии напряженности такого электрического поля замкнуты – оно является **вихревым**. Т.е. оно **НЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО** в отличие от электростатического поля.

Работа сил этого вихревого электрического поля по замкнутому контуру не равна нулю !!!

# Явление самоиндукции

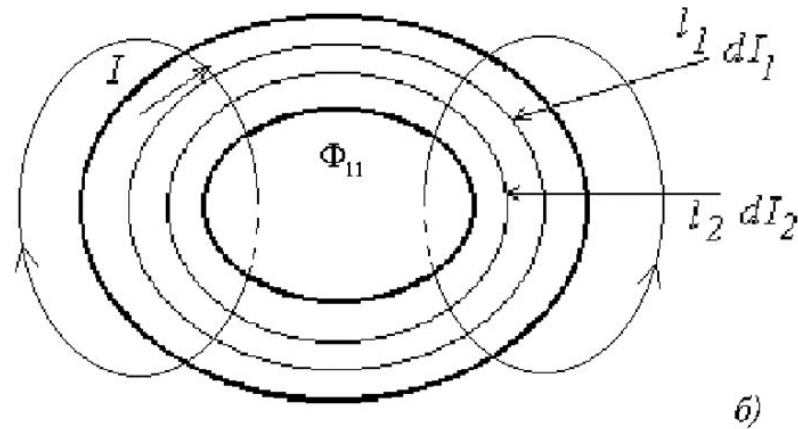
Фарадей – изменение магнитного потока в контуре приводит к возникновению ЭДС индукции, препятствующей возникновению тока в контуре

**при изменении силы тока в контуре в нем возникает ЭДС индукции, препятствующая этому изменению – явление самоиндукции**

Магнитный поток, сцепленный с контуром, зависит не только от силы тока в нем, но и от размеров и формы контура, а также от магнитных свойств окружающей среды. Однако во всех случаях он пропорционален силе тока, протекающего в контуре, т.е.

$$\Phi = LI$$

где  $L$  – коэффициент пропорциональности, называемый индуктивностью контура, и зависящий только от геометрических свойств контура и магнитных окружающей среды



$$\xi_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

**Демонстрация  
явления  
самоиндукции**

# Магнитная энергия тока.

Рассмотрим цепь с соленоидом (внутри соленоида  $B = \mu\mu_0 nI$ ) и сопротивлением  $R$ . При замыкании ключа в цепи установится ток  $I$ .

Если ключ разомкнуть, то некоторое время через  $R$  будет течь убывающий ток, поддерживаемый ЭДС самоиндукции в соленоиде.

Работа этого тока равна:

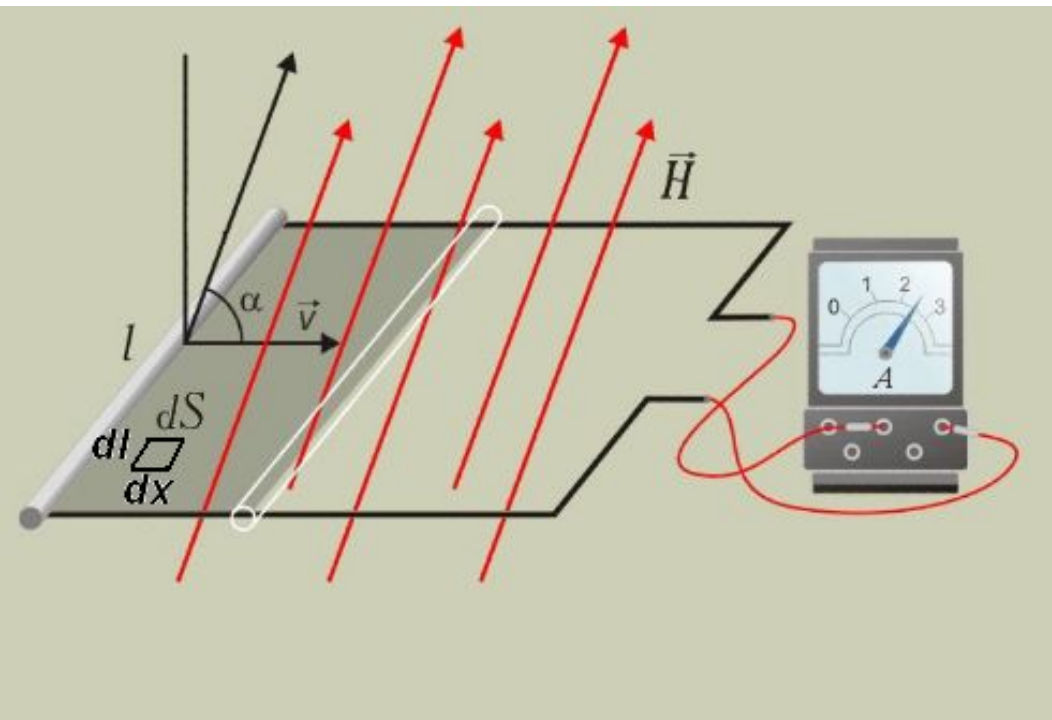
$$dA = \xi_i I dt = - \frac{d\Phi}{dt} I dt = -I d\Phi = -IL dl$$
$$A = - \int_I^0 LI dl = \frac{LI^2}{2}$$

Эта работа идет на изменение внутренней энергии проводников ( их нагрев), поэтому магнитное поле, которое было вокруг соленоида, исчезает. Никаких других изменений в окружающих телах не происходит, следовательно носителем энергии является МП:

$$W = \frac{L I^2}{2}$$
$$L = \mu_0 \mu n^2 V$$
$$H = nI \quad - - I = \frac{H}{n}$$
$$W = \frac{\mu_0 \mu n^2 V H^2}{2n^2} = \frac{\mu_0 \mu H^2 V}{2}$$

$w = \frac{\mu_0 H^2}{2}$

# ЭДС индукции в движущемся проводнике



ЭДС в движущемся проводнике возникает благодаря действию закона э/м индукции Фарадея, поскольку при движении проводника площадь контура с током изменяется (меняется величина магнитного потока).

По другому: ЭДС возникает при движении проводника в магнитном поле, т.к. на заряды в проводнике действует сила Лоренца. Они перемещаются к разным концам проводника в зависимости от знака заряда.

Проводник длиной  $l$  и сопротивлением  $R$  движется в магнитном поле  $H$ .

Величина возникшего индукционного тока:

$$I_K = \frac{\nu B l \sin \alpha}{R_0}$$

$$I_K R_0 = E = \frac{A_{cm}}{q} = \frac{F_L l}{q} = \frac{q B v l \sin \alpha}{q} = B v l \sin \alpha$$

# Уравнения Максвелла

$$\oint_S \mathbf{E} d\mathbf{S} = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum q$$

Теорема О-Г

$$\oint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0$$

Отсутствие магнитных зарядов,  
замкнутость силовых линий МП

$$\oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l} = -\mu_0 \int_S \frac{d\mathbf{H}}{dt} d\mathbf{S}$$

Связь Э и М полей

$$\oint_S \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{j} d\mathbf{S} + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} d\mathbf{S}$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}$$

$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$  Ток смещения, возникающее при изменении магнитного потока,  
переменное электрическое поле.